

Тополянский П.А., Ермаков С.А., Рыбаков К.А., Соснин Н.А. Импульсная плазменная порошковая наплавка. Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: В 2 ч. Часть 1: Материалы 14-й Международной научно-практической конференции: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012, 386 с., С. 188-193

### ИМПУЛЬСНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А., ЕРМАКОВ С.А., РЫБАКОВ К.А., СОСНИН Н.А.  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия, info@plasmacentre.ru

Рассмотрены преимущества и варианты импульсной плазменной порошковой наплавки и алгоритм решения тепловой задачи.

Ключевые слова: наплавка, импульсная наплавка, плазменная наплавка, порошковая наплавка.

The advantages and options of pulsed plasma powder surfacing and an algorithm for solving the heat problem.

Key words: surfacing, impulse surfacing, plasma surfacing, powder surfacing.

С учетом того, что при наплавке источник теплоты, как правило, является поверхностным, уравнение для движущегося распределённого источника теплоты будет иметь вид [1]:

$$T(x, y, z, t_m) = \frac{Q_3}{4\pi\lambda s} \int_0^{t_m} \frac{1}{t+t_0} \exp\left[-\frac{(x+vt)^2 + y^2}{4a(t+t_0)}\right] \times \\ \times \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \cos\frac{\pi iz}{s} \exp\left(-\pi^2 i^2 \frac{at}{s^2}\right)\right] dt, \quad (1)$$

где:  $Q_3$  – эффективная мощность источника теплоты, Вт;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $s$  – толщина листа основы, м;  $t_0 = R_q^2/4a$ ;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $R_q$  – эффективный радиус пятна нагрева, м;  $v$  – скорость наплавки (скорость движения по оси  $x$ ), м/с;  $x, y, z$  – координаты рассматриваемой точки в подвижной системе координат;  $t_m$  – всё время действия источника теплоты, с;  $t$  – текущее время распространения теплоты от мгновенного источника до начала координат подвижной системы в текущий момент, с.

Текущее время действия мгновенного источника:

$$t' = t_m - t$$

Текущее время действия мгновенного источника с периодом импульсов  $T$ :

$$t'' = (t_m - t) - nT,$$

где  $n$  – число прошедших периодов импульсов:

$$n = E((t_m - t)/T),$$

где  $E()$  – функция, приводящая аргумент к ближайшему меньшему целому.

При  $0 \leq t'' \leq t_m$  в уравнении (1)  $Q_3 = Q_{и}$ .

При  $t_m < t'' \leq T$  в уравнении (1)  $Q_3 = K_p Q_{и}$ , где  $Q_{и}$  – эффективная мощность источника в импульсе;  $K_p$  – отношение эффективной мощности источника в паузе к эффективной мощности источника в импульсе ( $K_p = 0 \dots 1$ ).

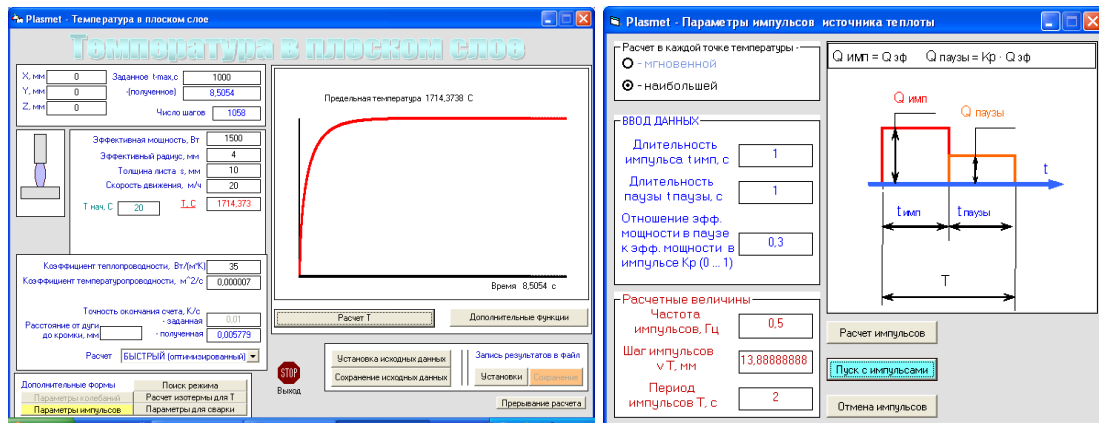
Расчет наибольших возможных температур в неподвижной системе координат ведется по формуле (1) с использованием уравнения связи:

$$x_0 = x + v t_m.$$

Для поиска наибольшей температуры в пределах импульса автоматически варьируется задаваемая в расчете величина  $t_m$ , что изменяет фазу колебаний.

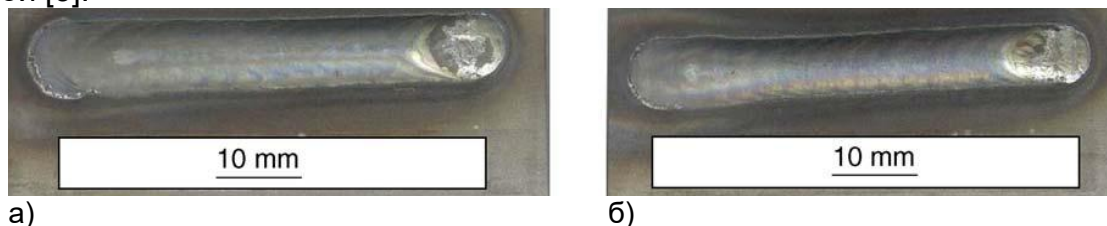
Чтобы учесть возможное влияние тепловложения от последующих периодов импульсов на температуру в данной точке, в расчет закладывается  $k$  периодов импульсов. Из рассчитанных по  $k$  периодам температур выбирается наибольшая в данной точке.

Для инженерных расчётов была разработана компьютерная программа PLASMET [2] (рис. 2). С помощью данной программы можно выбрать режим наплавки и рассчитать температурные поля.



а) б)  
Рис. 1. Окна программы PLASMET: а) «Температура в плоском слое», б) «Параметры импульсов источника теплоты»

Исследования [3] показали, что при высокой частоте импульсов тока и относительно малой скорости наплавки наплавленный слой внешне не отличается от наплавки в непрерывном режиме (рис. 2), однако импульсный режим приводит к более тонкой микроструктуре наплавленного металла, более высокой твердости и к меньшему перемешиванию наплавляемого материала с основой [3].



а) б)  
Рис. 2. Валики, наплавленные в непрерывном (а) и в импульсном режиме при частоте 77 Гц и скорости 6 м/час (б) [3]

Выполняли плазменную наплавку выпускного клапана двигателя внутреннего сгорания ОАО «АвтоВАЗ» из стали 55Х20Г9АН4 (ЭП303) с присадочным материалом, в качестве которого использовали сложнoleгированный порошок на кобальтовой основе типа Stellite F, с гранулометрическим составом 50-160 мкм. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон. Диаметр и длина канала сопла плазмотрона составляли, соответственно 3 и 2,5 мм, а длина дуги – 8 мм.

Ток пилотной дуги (между электродом и соплом) – постоянный – 60 А, а ток основной дуги – импульсный, со следующими параметрами: время цикла –  $t_{ц} = 0,04$  с, время импульса –  $t_{и} = 0,02$  с, время паузы –  $t_{п} = 0,02$  с. Величина действующего значения тока: в импульсе – 110 А, в паузе – 80 А. Шаг

импульсов 0,218 мм. Напряжение основной дуги (среднее значение) – 25 В, а вспомогательной (пилотной) (среднее значение) – 15 В. Расход присадочного порошка (среднее значение) – 9 г/мин. Скорость вращения заготовки – 4 об/мин. (т.е. скорость наплавки 19,62 м/час), угол наклона оси клапана – 47°. Смещение оси плазмотрона вперед от оси клапана 4–5 мм. Расходы газов (в период наплавки постоянные): плазмообразующего – 1,5 л/мин., транспортирующего – 2,5 л/мин., защитного – 6 л/мин.

Поле наибольших температур при импульсной наплавке для указанного режима, рассчитанное по уравнению (1), в неподвижной системе координат показано на рис. 3. Полуширина изотермы 1500 °С равна 3 мм (см. рис. 3). Видно, что при относительно высокой частоте импульсов (25 Гц) расчётная форма краёв наплавленного валика гладкая, что подтверждается экспериментальной проверкой (рис. 4).

По окончании цикла наплавки проводился двухступенчатый контроль качества наплавленного слоя:

- визуальный – показал хорошее формирование наплавленного валика, равномерность растекания расплава и заполнение им разделки;
- металлографический – показал уменьшение размера пор с 60-80 мкм при непрерывном режиме до 30-40 мкм при импульсном режиме, снижение размера зерен в зоне термического влияния с 300-350 мкм до 280-320 мкм.

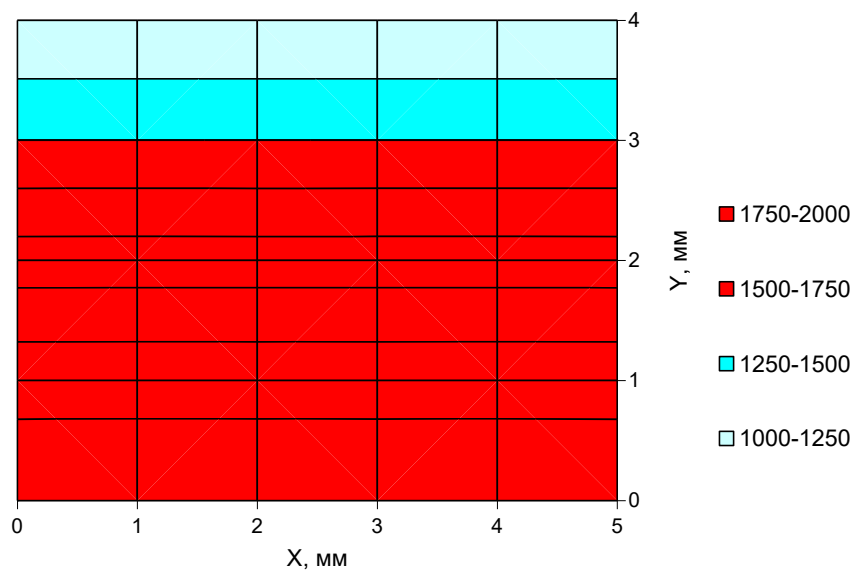


Рис. 3. Температурное поле импульсной наплавки при частоте 25 Гц и скорости наплавки 19,6 м/час

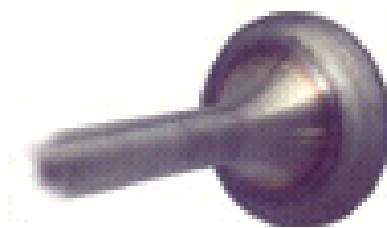


Рис. 4. Выпускной клапан, наплавленный в импульсном режиме при частоте 25 Гц и скорости наплавки 19,6 м/час

Ширина наплавленного за один проход валика с применением сопла диаметром 3 мм увеличилась с 4,5 мм до 7 мм.

По опыту эксплуатации при изготовлении выпускных клапанов двигателей автомобилей ВАЗ 2112, 21203, 21233, 1119, 3411 выявлены следующие преимущества импульсной наплавки:

- повышается стабильность процесса (дуга не «блуждает»), снижается в 1,5-2 раза брак после окончательной механической обработки, т.е. более точно выдерживается форма поверхности наплавки;

- уменьшается (вплоть до полного исчезновения) величина и количество усадочных рыхлот на поверхности наплавки, что свидетельствует об уменьшении объема сварочной ванны;

- уменьшается размер и количество пор в наплавленном слое (см. выше), брак по порам снижается до 10 раз;

- для сравнения, при наплавке постоянным током по обычной технологии протяженность ванны визуально составляет 20–30 мм, при наплавке модулированным током – 12–16 мм;

- снижается степень перегрева металла основы, о чем свидетельствует:

- распределение цветов побежалости на нижней части тарелки клапана после остывания наплавки;

- уменьшение протяженности зоны роста и размер зерна в зоне термического влияния;

- снижается чувствительность процесса к колебаниям длины дуги, в результате чего повышается допуск на биение заготовки при наплавке; так, при наплавке по традиционной технологии суммарное биение должно быть не более 0,15 мм, при наплавке импульсным током допустимо биение 0,4 мм и более;

- увеличивается ширина, заполняемая за один проход без поперечных колебаний. Только таким образом удалось заполнить разделку шириной 7,5-8 мм, используя сопло диаметром 3 мм.

Объяснить полученные результаты можно тем, что в момент нарастания тока происходит одновременное увеличение количества теплоты, выделяемой в активном пятне дуги, и повышение давления плазменной струи. Это комплексное воздействие в момент импульса тока вызывает увеличение температуры сварочной ванны, при одновременном вытеснении расплава из центральной части ванны к ее периферии и принуждает к заполнению расплавом заранее подготовленной разделки. Ширина наплавленного за один проход слоя оказывается при этом увеличенной по сравнению с другими известными способами.

Осуществление ускоренного охлаждения расплавленного металла в период паузы тока препятствует перегреву металла основы и вытеканию расплавляющегося металла из разделки, а также ускоренной кристаллизации наплавленного металла в малом объеме, в результате чего уменьшается усадочная пористость в наплавленном слое.

Использование импульсной подачи в зону наплавки порошкового материала, синхронизированной с импульсами тока сжатой дуги, даёт возможность расширить область регулирования режимов плазменной наплавки, в частности, при существенно различающихся теплофизических свойствах наплаваемого и основного материала [4]. Так, при наплавке более легкоплавкого материала на основу, имеющую повышенную температуру

плавления (или высокую теплопроводность), необходимо сначала разогреть подложку током импульса  $I_{и}$ , после чего можно подавать порцию более легкоплавкого порошка при меньшем токе паузы  $I_{п}$  (рис. 5-а). Наоборот, наплавляя тугоплавкий материал на легкоплавкую основу, целесообразно сначала в течение паузы с относительно небольшим током  $I_{п}$  (обеспечивающим, при необходимости, катодную зачистку основы при обратной полярности дуги) подать на наплавляемую поверхность порцию порошка, после чего расплавлять его повышенным током импульса  $I_{и}$ . Синхронизация момента подачи порошка и импульса тока обеспечивается временем задержки  $t_3$  (см.рис. 5-а, 5-б).

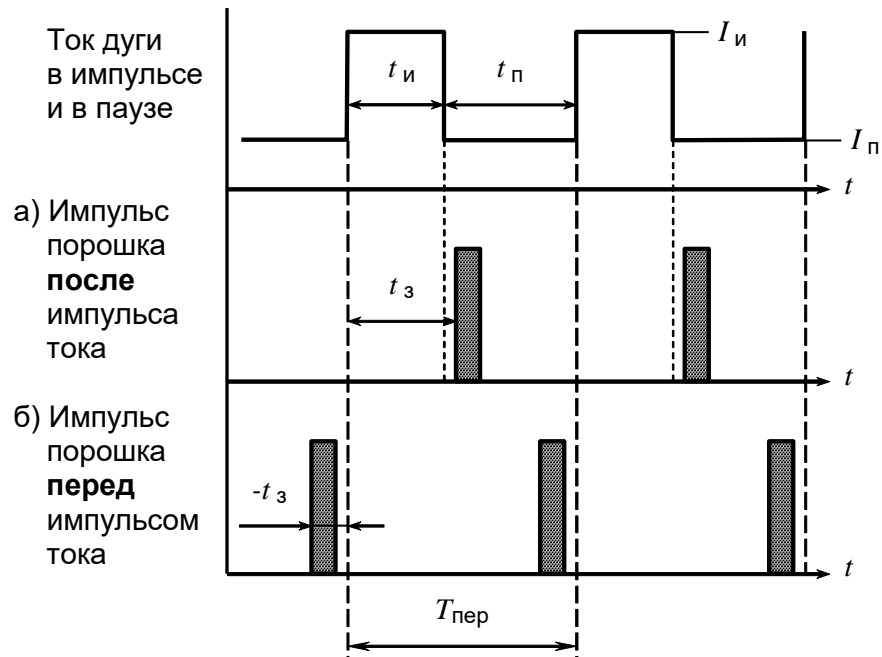


Рис. 5. Диаграммы импульсной порошковой наплавки со сдвигом подачи порции порошка относительно импульса тока сжатой дуги

Основным преимуществом специального импульсного порошкового питателя (рис. 6) является то, что порошок не соприкасается с движущимися частями питателя, а сбрасывается в поток транспортирующего газа импульсами газа с длительностью 0,02 с и с регулируемой частотой следования. Величина порций порошка дополнительно определяется диаметром жиклера (1...4) мм и высотой камеры, регулируемой от 0 до 3 мм с точностью 0,1 мм. Такая конструкция питателя обеспечивает надежную подачу любых порошковых материалов с грануляцией от 4 до 400 мкм и производительностью по металлическим порошкам от 0,3 до 16 кг/ч. Результаты испытаний питателя приведены в таблице.



Рис. 6. Импульсный порошковый питатель

При относительно низкой частоте импульсной наплавки возможно автоматическое формирование неперекрывающихся участков наплавленного металла (рис. 7), что в ряде случаев даёт дополнительный эксплуатационный эффект, например, при изготовлении почвообрабатывающих инструментов.

Диапазоны регулирования расхода порошкового наплавочного материала (типа Н73Х16СЗР3, фракция 200...280 мкм) с помощью импульсного питателя (кг/ч)

Частота импульсов, Гц	Диаметр жиклера, мм								
	2			3			4		
	Высота дозирующей камеры, мм								
	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0	1,0	2,0	3,0
1	0,30	0,48	1,02	0,30	0,66	1,68	1,20	2,16	3,84
2	0,45	0,90	1,80	0,50	1,32	3,24	2,40	4,08	7,08
3	0,60	1,32	2,64	0,72	1,92	4,44	3,36	6,12	10,30
4	0,78	1,68	3,36	0,96	2,64	5,64	4,32	8,28	13,30
5	1,02	2,04		1,25	3,30	6,84	5,28	10,20	16,80
6	1,20	2,22		1,50			6,36	12,60	
7	1,32			1,68			7,32		
8	1,44			1,92			7,92		
9	1,56			2,16					
10	1,68			2,40					

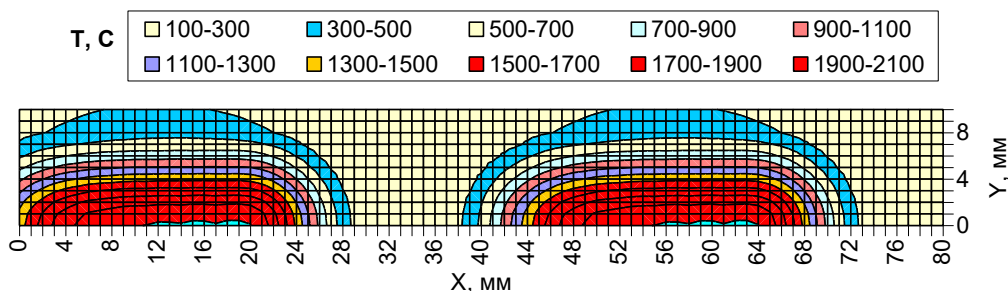


Рис. 7. Поле наибольших температур импульсной наплавки при частоте 0,5 Гц и скорости наплавки 79 м/час (в неподвижной системе координат)

## Выводы

1. Плазменная порошковая наплавка в импульсном режиме при повышенной частоте (в десятки герц) приводит к улучшению структуры и качества наплавленного слоя.

2. Наплавка на низкой частоте даёт возможность автоматически формировать прерывистую наплавку, в ряде случаев повышающую эффект при эксплуатации.
3. Синхронизация импульсов подачи порошка с импульсами тока дуги на частоте до 10 Гц позволяет эффективно наплавлять материалы, существенно отличающиеся по теплофизическим свойствам от основы.

#### Литература

1. Кархин В.А. Тепловые основы сварки Л.: Изд-во ЛГТУ, 1990. 100 с.: ил.
2. Ермаков С.А., Тополянский П.А., Соснин Н.А. Механизация и автоматизация технологических процессов сварочного производства. Автоматизация расчета параметров сварочных процессов: Методические указания. СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2005. 30 с.: ил.
3. A.S.C.M. D'Oliveira, R.S.C. Paredes, R.L.C. Santos. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. (Плазменная наплавка пульсирующей дугой). *Journal of Materials Processing Technology* 171 (2006) 167–174.
4. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. СПб. Изд-во Политехнич. ун-та, 2008. 406 с.: ил.