

УДК 621.791.75

Кассов В. Д., Малыгина С. В., Тимченко В. В.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛАВКИ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ЭКСКАВАТОРОВ**

В условиях дефицита материальных и энергетических ресурсов восстановительная наплавка порошковой лентой опорных катков, гусеничных звеньев экскаваторов является высокоэффективным ресурсосберегающим технологическим приемом, обеспечивающим удовлетворение регламентации надежности и долговечности, соблюдение принципов взаимозаменяемости и экономичности [1, 2]. Возможность широко варьирования химическим составом наплавленного металла, небольшой производственный цикл получения разнообразных материалов, высокие сварочно-технологические характеристики определяют эффективность этого способа [3]. При этом важное значение приобретают вопросы качества наплавленного металла, обеспечения требуемой износостойкости [4, 5]. Получение металла наплавки заданного состава является обязательным условием оптимального технологического процесса дуговой наплавки [6].

Цель работы – оптимизация наплавки деталей ходовой части экскаватора порошковой лентой на основе установления взаимосвязи химического состава наплавленного слоя с технологическими особенностями процесса.

При наплавке малого числа слоев для расчета содержания элемента  $Me^n$  в  $n$ -ом слое наплавки необходимо знать его концентрацию в основном  $Me_0$  и наплавленном  $Me_n$  металле, а также доли участия основного металла в металле второго и последующих валиков  $j$  и доли участия металла предыдущего валика в последующем  $d$ . Концентрацию элемента в  $n$ -ом слое наплавки можно определить по формуле:

$$Me^n = Me_H - (Me_H - Me_0) \cdot \left( \frac{j}{1-d} \right)^n \tag{1}$$

Из макрошлифов валиков, наплавленных порошковой лентой, видно, что форму сечения усиления наплавленного валика можно принять в виде прямоугольника, скругленного дугой окружности радиуса  $h_1$  (рис. 1), а форму сечения проплавления основного металла в виде параболы с уравнением вида:

$$y = a \cdot x^2 - h_2,$$

где  $h_2$  – глубина проплавления;  $h_1$  – высота усиления валика.

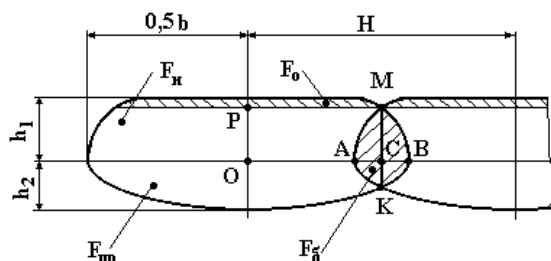


Рис. 1. К расчету коэффициентов  $\delta$ ,  $\varphi$  при наплавке порошковой лентой

Найдем площадь сечения наплавленного валика:

$$F_H = (b - 2 \cdot h_1) \cdot h_1 + \pi \cdot h_1^2 / 2 = b \cdot h_1 - h_1^2 \cdot (2 - \pi / 2) = h_1 \cdot [b - h_1 \cdot (2 - \pi / 2)] \tag{2}$$

Из соотношения  $a \cdot (b/2)^2 - h_2 = 0$  находим:

$$a = 4 \cdot h_2 / b^2.$$

Тогда форму сечения проплавления основного металла можно описать уравнением вида:

$$y = \frac{4 \cdot h_2}{b^2} \cdot x^2 - h_2. \quad (3)$$

Найдем площадь сечения проплавления основного металла:

$$\begin{aligned} F_{np} &= \left| 2 \cdot \int_0^{b/2} y dx \right| = 2 \cdot \int_0^{b/2} \left( -\frac{4 \cdot h_2}{b^2} \cdot x^2 + h_2 \right) dx = 2 \cdot \left( -\frac{4 \cdot h_2}{b^2} \cdot \frac{x^3}{3} + h_2 \cdot x \right) \Bigg|_0^{b/2} = \\ &= 2 \cdot \left( -\frac{4 \cdot h_2}{b^2} \cdot \frac{b^3}{3 \cdot 8} + h_2 \cdot \frac{b}{2} \right) = -\frac{h_2 \cdot b}{3} + h_2 \cdot b = \frac{2}{3} \cdot h_2 \cdot b. \end{aligned} \quad (4)$$

Итак, площадь сечения слоя равна:

$$F = F_n + F_{np} = h_1 \cdot [b - h_1 \cdot (2 - \pi/2)] + \frac{2}{3} \cdot h_2 \cdot b = b \cdot \left[ h_1 \cdot (1 - 0,43 \cdot h_1/b) + \frac{2}{3} \cdot h_2 \right]. \quad (5)$$

Найдем площадь криволинейного треугольника АМВ. Имеем:

$$\begin{aligned} F_{AMB} &= 2 \cdot \int_{\omega h_1}^{h_1} \sqrt{h_1^2 - x^2} dx = 2 \cdot \left( \frac{h_1^2}{2} \cdot \arcsin \frac{x}{h_1} + \frac{x}{2} \cdot \sqrt{h_1^2 - x^2} \right) \Bigg|_{\omega h_1}^{h_1} = \\ &= h_1^2 \cdot \arcsin \frac{h_1}{h_1} + h_1 \cdot \sqrt{h_1^2 - h_1^2} - h_1^2 \cdot \arcsin \omega - \omega \cdot h_1 \cdot \sqrt{h_1^2 - \omega^2 \cdot h_1^2} = \\ &= \frac{\pi \cdot h_1^2}{2} - h_1^2 \cdot \arcsin \omega - \omega \cdot h_1^2 \sqrt{1 - \omega^2} = h_1^2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \omega - \omega \sqrt{1 - \omega^2} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Величину  $\omega$  в выражении (6) найдем из соотношения:

$$H/2 - (b/2 - h_1) = \omega \cdot h_1.$$

Тогда:

$$H - b + 2 \cdot h_1 = 2 \cdot \omega \cdot h_1.$$

Отсюда:

$$\omega = \frac{H - b + 2 \cdot h_1}{2 \cdot h_1}.$$

Если  $H = b - 2 \cdot h_1$ , то  $\omega = 0$  и площадь треугольника АМВ достигает максимальной величины  $\pi \cdot h_1^2 / 2$ . Если же  $H = b$ , то  $\omega = 1$  и площадь треугольника АМВ равна 0, т. е. перекрытия валиков нет.

Найдем теперь площадь криволинейного треугольника АКВ. Имеем:

$$\begin{aligned} F_{AKB} &= 2 \cdot \int_{H/2}^{b/2} \left( -\frac{4 \cdot h_2}{b^2} \cdot x^2 + h_2 \right) dx = 2 \cdot \left( -\frac{4 \cdot h_2}{b^2} \cdot \frac{x^3}{3} + h_2 \cdot x \right) \Bigg|_{H/2}^{b/2} = \\ &= -\frac{8 \cdot h_2}{b^2} \cdot \frac{b^3}{3 \cdot 8} + 2 \cdot \frac{h_2 \cdot b}{2} + \frac{8 \cdot h_2}{b^2} \cdot \frac{H^3}{3 \cdot 8} - \frac{2 \cdot h_2 \cdot H}{2} = \\ &= -\frac{h_2 \cdot b}{3} + h_2 \cdot b + \frac{h_2 \cdot b}{3} \left( \frac{H}{b} \right)^3 - h_2 \cdot b \cdot \left( \frac{H}{b} \right) = \frac{2}{3} \cdot h_2 \cdot b - h_2 \cdot b \cdot \left[ \frac{H}{b} - \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{H}{b} \right)^3 \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда площадь криволинейного четырехугольника  $AMBK$  составляет:

$$F_{\delta} = h_1^2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \omega - \omega \cdot \sqrt{1 - \omega^2} \right) + h_2 \cdot b \cdot \left[ \frac{2}{3} - \frac{H}{b} + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{H}{b} \right)^3 \right].$$

Обозначая относительный шаг наплавки  $H/b$  через  $\alpha$ , а величину  $h_1/b$  через  $P$ , получим:

$$F_{\delta} = h_1 \cdot b \cdot P \cdot (\pi/2 - \arcsin \omega - \omega \cdot \sqrt{1 - \omega^2}) + h_2 \cdot b \cdot \left( \frac{2}{3} - \alpha + \frac{\alpha^3}{3} \right). \tag{8}$$

Таким образом, долю участия металла предыдущего валика в последующем можно вычислить по формуле:

$$\delta = \frac{F_{\delta}}{F} = \frac{h_1 \cdot P \cdot (\pi/2 - \arcsin \omega - \omega \cdot \sqrt{1 - \omega^2}) + h_2 \cdot \left( \frac{2}{3} - \alpha + \frac{\alpha^3}{3} \right)}{h_1 \cdot (1 - 0,43 \cdot P) + \frac{2}{3} \cdot h_2}.$$

Вводя коэффициент усиления  $\beta = h_1/h_2$ , будем иметь:

$$\delta = \frac{\beta \cdot P \cdot (\pi/2 - \arcsin \omega - \omega \cdot \sqrt{1 - \omega^2}) + 2/3 - \alpha + \alpha^3/3}{\beta \cdot (1 - 0,43 \cdot P) + 2/3}. \tag{9}$$

Выразим коэффициент  $\omega$  через величины  $\alpha$  и  $P$ . Имеем:

$$\omega = \frac{b}{2 \cdot h_1} \cdot \left( \frac{H}{b} - 1 + 2 \cdot \frac{h_1}{b} \right) = \frac{\alpha + 2 \cdot P - 1}{2 \cdot P}. \tag{10}$$

Долю участия основного металла в металле второго и последующих валиков определим по формуле:

$$j = \frac{F_{np} - F_{AKB}}{F} = \frac{h_2 \cdot b \cdot (\alpha - \alpha^3/3)}{b \cdot \left[ h_1 \cdot (1 - 0,43 \cdot P) + \frac{2}{3} \cdot h_2 \right]} = \frac{\alpha - \alpha^3/3}{\frac{2}{3} + \beta \cdot (1 - 0,43 \cdot P)}. \tag{11}$$

В табл. 1 и 2 приведены значения коэффициентов  $\delta$  и  $\varphi$  при изменении параметров  $\alpha$  в пределах 0,6...0,9,  $P$  в пределах 0,05...0,50 и  $\beta$  в пределах 1,0...3,0. Нижняя граница коэффициента  $P$  для каждого  $\alpha$  определяется из формулы (10) при условии, что  $\omega = 0$ .

Таблица 1

Значения коэффициента  $\delta$  при изменении параметров  $\alpha$ ,  $P$  и  $\beta$

$\alpha$	$P$	Значения $\delta$ при $\beta$ равном:		
		1	2	3
0,6	0,20	0,286	0,307	0,317
	0,30	0,269	0,286	0,294
	0,40	0,257	0,271	0,278
	0,50	0,250	0,262	0,268
0,7	0,15	0,198	0,218	0,227
	0,20	0,187	0,205	0,213
	0,30	0,173	0,187	0,193
	0,40	0,163	0,175	0,181
	0,50	0,158	0,168	0,173
0,8	0,10	0,120	0,136	0,144
	0,20	0,101	0,113	0,119
	0,30	0,091	0,101	0,106
	0,40	0,086	0,094	0,098
	0,50	0,082	0,090	0,094

Таблица 2

Значения коэффициента  $\varphi$  при изменении параметров  $\alpha$ ,  $P$  и  $\beta$ 

$\alpha$	$P$	Значения $\varphi$ при $\beta$ равном:		
		1	2	3
0,6	0,20	0,334	0,212	0,156
	0,30	0,343	0,219	0,161
	0,40	0,353	0,227	0,168
	0,50	0,364	0,236	0,175
0,7	0,15	0,366	0,231	0,169
	0,20	0,371	0,235	0,172
	0,30	0,381	0,243	0,179
	0,40	0,392	0,252	0,186
0,8	0,50	0,403	0,262	0,194
	0,10	0,388	0,244	0,178
	0,20	0,398	0,252	0,185
	0,30	0,409	0,261	0,192
0,8	0,40	0,421	0,271	0,200
	0,50	0,434	0,281	0,208

С увеличением параметра валика  $P$  коэффициент  $\delta$  уменьшается, а  $\varphi$  возрастает. Увеличение шага наплавки  $\alpha$  приводит к уменьшению  $\delta$  и возрастанию  $\varphi$ . При возрастании коэффициента усиления  $\beta$  параметр  $\delta$  увеличивается, а параметр  $\varphi$  уменьшается.

Требуемый химический состав наплавленного металла по легирующему элементу  $Me$  с погрешностью  $\Delta$ , % может быть получен в  $n$ -ом слое, рассчитанном по формуле (1). В табл. 3 приведены расчетные значения  $n$  в зависимости от параметров  $\alpha$ ,  $P$  и  $\beta$  при  $\Delta = 10$  %.

Таблица 3

Расчетные значения числа слоев  $n$  при изменении  $\alpha$ ,  $P$  и  $\beta$ 

$\alpha$	$P$	Значения $n$ при $\beta$ равном:			
		1	2	3	4
0,6	0,20	3,03	1,93	1,54	1,35
	0,30	3,05	1,95	1,56	1,35
	0,40	3,10	1,98	1,58	1,36
	0,50	3,18	2,02	1,61	1,35
0,7	0,15	2,93	1,89	1,51	1,31
	0,20	2,93	1,89	1,51	1,31
	0,30	2,97	1,91	1,53	1,32
	0,40	3,04	1,94	1,55	1,34
0,8	0,50	3,13	1,99	1,59	1,37
	0,10	2,81	1,82	1,47	1,28
	0,20	2,83	1,83	1,47	1,28
	0,30	2,89	1,86	1,50	1,30
0,8	0,40	2,97	1,91	1,53	1,32
	0,50	3,07	1,96	1,57	1,36

Видно, что с увеличением параметра валика  $P$  величина  $n$  незначительно возрастает. С увеличением относительного шага наплавки  $\alpha$   $n$  уменьшается. Наибольшее влияние на число слоев  $n$  оказывает коэффициент усиления  $\beta$ . При увеличении  $\beta$  от 1 до 4 расчетное значение  $n$  уменьшается от 2,7...3,2 до 1,2...1,4. Таким образом, из анализа табл. 3 заключаем, что наплавку порошковой лентой необходимо вести на режимах, обеспечивающих низкие значения параметра  $P$ , т. е. величины отношения высоты усиления валика  $h_1$  к ширине валика  $b$  ( $P \leq 0,3$ ), и с относительным шагом наплавки  $\alpha$  не менее 0,7. При этом, если коэффициент  $\beta \geq 2$ , то требуемый химический состав наплавленного металла будет достигаться уже во втором слое наплавки.

Полученные рекомендации были использованы при восстановительной наплавке. Например, при наплавке экспериментальной порошковой лентой ППл-Q7 на сталь 45 ( $\alpha = 0,8$ ;  $P = 0,23$ ;  $\beta = 3,1$ ) химический состав стабилизировался во втором слое и составлял 1,0 % C; 0,3 % Si; 0,5 % Mn. На рис. 2 показана микроструктура наплавленного металла.

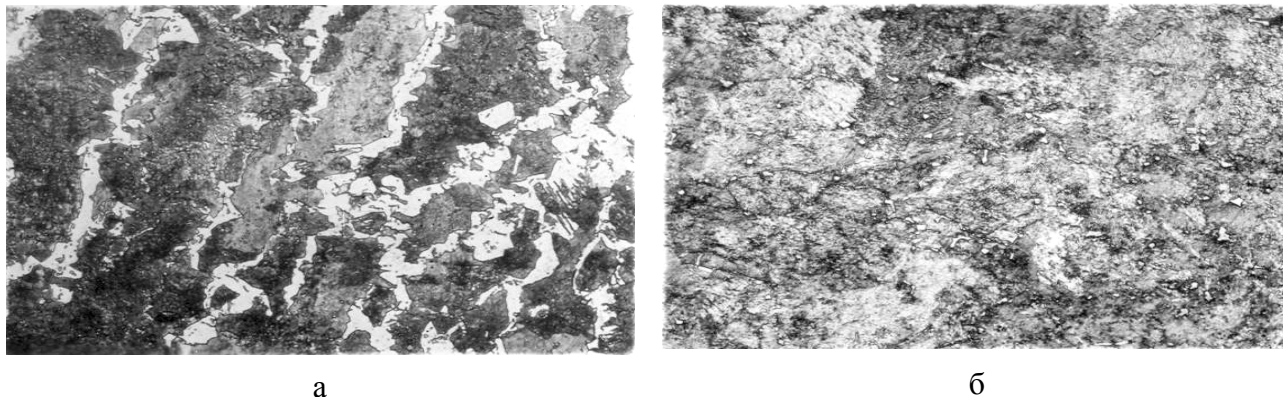


Рис. 2. Микроструктура металла наплавки первого (а) и второго (б) слоя ( $\times 300$ )

Составляющие микроструктуры первого слоя: феррит ( $Hv_{100} = 2254 \text{ Н/мм}^2$ ), перлит ( $Hv_{100} = 2710 \text{ Н/мм}^2$ ) и карбиды. Структура ориентирована вдоль направления наплавки (рис. 2, а). Составляющие микроструктуры второго слоя: сорбитообразный перлит ( $Hv_{100} = 3861 \text{ Н/мм}^2$ ), карбиды и по границам зерен отдельные участки феррита (рис. 2, б).

При наплавке деталей ходовой части экскаватора экспериментальной порошковой лентой ППл-Q5 ( $\alpha = 0,7$ ;  $P = 0,21$ ;  $\beta = 3,2$ ) химический состав стабилизировался во втором слое и составлял 1,8 % C; 1,4 % Mn; 0,3 % Si; 3 % Ti; 0,5 % V.

Таким образом, предложены уравнения, обладающие высокой информативностью, для расчета с достаточной точностью химического состава наплавленного слоя с учетом долей участия основного и наплавленного металла предыдущего валика в последующем.

## ВЫВОДЫ

Предложены выражения для расчета с достаточной точностью химического состава наплавленного слоя с учетом долей участия основного металла  $\phi$ , металла предыдущего валика в последующем  $\delta$  и относительного шага  $\alpha$  для различных режимов наплавки. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что требуемый химический состав наплавленного металла достигается во втором слое независимо от шага наплавки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 1999. – № 1. – С. 4–15.
2. Горынин Н. В. Тенденции развития современного материаловедения / Н. В. Горынин // Судостроение. – 1996. – № 10. – С. 133–135.
3. Рябцев И. А. Высокопроизводительная широкослойная наплавка электродными проволоками и лентами / И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 36–41.
4. Самотугин С. С. Структура и характер разрушения сварных соединений, наплавленных и упрочненных материалов / С. С. Самотугин, Л. С. Лецинский, Н. Х. Соляник. – Мариуполь : ПГТУ, 1996. – 179 с.
5. Кассов В. Д. Підвищення працездатності деталей наплавленням порошковим дротом / В. Д. Кассов, В. В. Чигарьов, О. П. Литвінов // Вісті Академії інженерних наук України. – 2008. – № 3. – С. 20–23.
6. Кассов В. Д. Многокритериальная оптимизация состава износостойкого сплава / В. Д. Кассов, В. В. Чигарев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк : ДонНТУ, 2002. – Вип. 51. – С. 108–113.