

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПЛАВКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ХРОМО-БОРИСТЫХ СПЛАВОВ

**Цель работы.** Целью данного исследования является установление математических зависимостей влияния технологических параметров нанесения износостойких сплавов на твердость поверхностного слоя и геометрические параметры шва как при ручной, так и при автоматической электродуговой наплавке гетерогенным хромо-бористым сплавом.

**Методы исследования.** При анализе влияния технологических показателей на физико-механические свойства износостойких гетерогенных хромо-бористых сплавов при ручной и автоматической электродуговой наплавке было решено использовать математическое планирование исследований на основе активного эксперимента, с созданием численного описания математического ожидания.

**Полученные результаты.** На основе теории научного математического планирования эксперимента проведен комплекс соответствующих опытов, который позволяет математически описать характеристики сплава, дать теоретическую оценку корреляции параметров между собой.

**Научная новизна.** Впервые получена математическая модель  $HRC = f(H, C, B, \alpha, I)$  в виде уравнений регрессии на основе полинома второй степени, позволяющий связать агрегатную твердость сплава после нанесения на рабочую поверхность с  $H$  – глубиной проплавления,  $C$  – высотой усиления,  $B$  – шириной шва,  $\alpha_n$  – коэффициентом наплавки и  $I$  – силой тока наплавки.

**Практическое значение.** Полученные результаты приведенных исследований позволяют в рамках технической и технологической точности, необходимой в практических инженерных расчетах, получить численные значения прогноза физико-механических свойств износостойких гетерогенных хромо-бористых сплавов при варьировании параметров для ручной и автоматической электродуговой наплавке.

**Ключевые слова:** наплавка, оптимизация, износостойкость, сплав, регрессия, геометрия шва, прогнозирование.

### Постановка проблемы

Сила тока и коэффициент наплавки являются крайне важными параметрами при наплавочных работах. В большой степени именно сила тока определяет структурно-фазовое состояние наплавленного металла, физико-механические характеристики и, в конечном счете, геометрию шва. Однако такие параметры шва, как ширина, глубина проплавления и высота усиления трудно поддаются прогнозу, зависят от многих факторов и являются больше индивидуальными для конкретного сплава.

Разработка технологии предварительного восстановления и наплавки износостойкими сплавами является актуальной и важной задачей науки и практики. Это связано с тем, что изменение технологических параметров нанесения износостойких сплавов в значительной степени оказывает влияние на их структурно-фазовое состояние, физико-механические свойства, и, в конечном счете, на износостойкость.

Концепция получения сплавов и структурно-фазовых состояний в большой степени определяется техно-

логией его изготовления. Учитываются такие факторы, как скорость охлаждения металла, технологическое воздействие и т. д. При кристаллизации и формировании структур важное значение, особенно при сварке и наплавке, имеют параметры режима, при котором непосредственно наносится покрытие.

В первую очередь, это связано с тем, что конструкторы и разработчики выбирают стандартизированные материалы, изменяя при этом режимы наплавки, для того, чтобы получить заданные геометрические параметры шва, такие как ширина шва, глубина проплавления, высота усиления и др.

Однако изменение технологии в виде изменения скорости наплавки, силы тока наплавки, напряжения наплавки и т. п. в сочетании с увеличением производительности, в частности, коэффициента наплавки материала  $\alpha_n$ , зачастую приводит к тому, что стандартные материалы, наплавленные на других режимах, могут значительно отличаться по физико-механическим свойствам и структурно-фазовому состоянию.

При этом важно понимать, что создание аналитических зависимостей затруднено сложностью расчётов, которые в первую очередь связаны с различными размерностями используемых величин (миллиметры, секунды, амперы, вольты и т. д.) и зависимость математически может существовать только в обобщённом виде, показывая взаимосвязь и взаимное влияние на выходящий параметр  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  [1].

Многочисленные попытки учёных создать практически дееспособную формулу для установления численных величин пока не увенчались успехом. Вероятно, для этого потребуется значительное количество времени и материальных затрат. Поэтому для научных работников и промышленников крайне необходима технология расчета этих параметров и результаты исследований относительно корреляции этих параметров между собой.

На основании вышеизложенного, нами видится выход из этой ситуации, который заключается в том, что для практических расчётов может быть использована математическая зависимость в виде полинома созданного на базе активного эксперимента с известным математическим методом планирования и обработки результатов исследования.

Таким образом, нами была поставлена задача изучить корреляцию силы тока, коэффициента наплавки, ширины шва, высоты усиления и глубины проплавления шва и физико-механических характеристик наплавленных сплавов и их структурно-фазовых состояний.

### Материалы и методика исследований

Экспериментальные сплавы системы легирования Fe-C-Cr-B изготавливали в виде порошковой присадки, в состав которой вводили до 43–48 % порошкообразной шихты из легирующих элементов, что позволило варьировать химическим составом наплавленного металла в достаточно широких пределах. Образцы для испытаний изготавливали путем аргодуговой наплавки неплавящимся электродом исследуемого материала на пластины из Ст. 3.

В результате проведённых нами опытов была получена серия образцов (рис. 1 а, б).

Были произведены измерения соответствующих геометрических параметров шва (рис. 2 а–в), а также твёрдости и коэффициента наплавки, результаты которых отображены в таблицах 1, 2.



Рис. 1. Результаты наплавки экспериментальных образцов: а – в разрезе; б – вид сверху

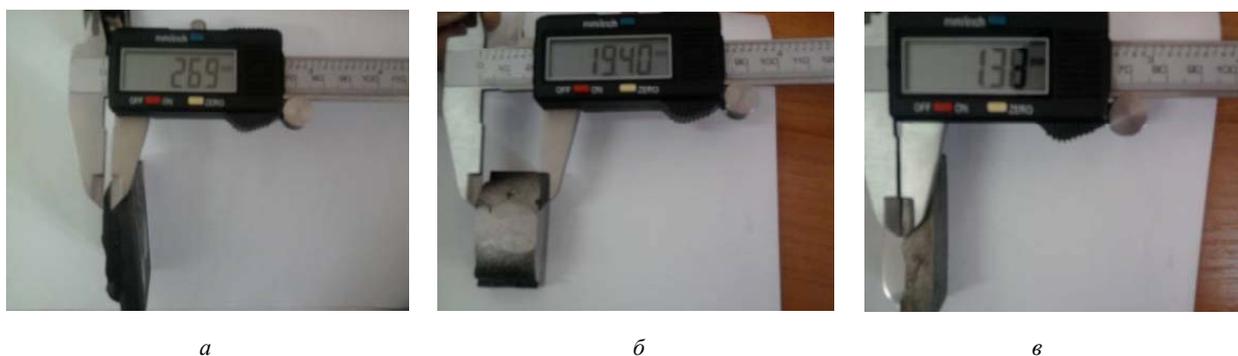


Рис. 2. Методика измерения высоты усиления (а), ширины шва (б), глубины проплавления (в)

**Таблица 1** – Результаты измерений параметров ручной дуговой наплавки

№ опыта	Глубина проплавления Н	Высота усиления С	Ширина шва В	Коэффициент наплавки А	Сила тока I	Среднее значение твердости HRC
1	1,5	3,0	10,9	8,7	180	60
2	1,8	3,8	11,0	9,7	190	61
3	2,2	3,8	11,1	10,3	195	61
4	2,4	4,0	11,1	10,5	200	62
5	2,8	4,3	13,4	11,3	210	62
6	3,2	4,5	15,6	12,1	220	62
7	4	5,0	16,0	13,0	240	64
8	4,2	4,8	17,0	13,1	245	63
9	4,5	4,5	18,0	13,3	250	63
10	4,8	4,5	19,2	13,4	255	63
11	5	4,4	20,3	13,5	260	63
12	5,5	4,2	20,6	13,3	270	62
13	6	4,0	20,9	13,2	280	62
14	6,4	3,9	22,0	12,0	293	62
15	6,8	3,8	24,0	10,5	300	60

**Таблица 2** – Результаты измерений параметров автоматической дуговой наплавки

№ опыта	Глубина проплавления Н	Высота усиления С	Ширина шва В	Коэффициент наплавки А	Сила тока I	Среднее значение твердости HRC
1	1,6	2,0	11,8	8,5	260	56
2	1,8	2,2	12,0	8,7	270	56
3	1,9	2,3	12,4	9,0	280	56
4	2,1	2,6	13,0	9,8	300	56
5	2,0	3,0	14,0	11,0	330	61
6	2,1	3,3	14,6	12,4	360	64
7	2,2	3,4	15,0	13,5	389	65
8	2,3	3,8	15,2	14,0	430	64
9	2,3	4,2	15,3	14,1	468	64
10	2,3	4,2	15,3	14,1	478	64
11	2,4	4,3	15,4	14,1	490	64
12	2,4	4,4	15,4	14,2	500	64
13	2,5	4,5	15,5	14,2	510	63
14	2,5	4,8	15,5	14,3	530	63
15	2,5	5,0	15,5	14,3	555	63

Вид функции  $HRC = f(H, C, B, \alpha, I)$  был выбран в виде отрезка полинома с граничными условиями, математическое ожидание которого можно представить в виде:

$$HRC(H, C, B, \alpha, I) = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i < j}^k B_{ij} X_i + \sum_{i=1}^k B_{ij} X_i^2 + \dots \quad (1)$$

В данной ситуации, когда отсутствовала априорная информация об объекте, полиномиальную модель подбирали последовательно, начиная с простейшего линейного уравнения, которое достраивали до полной квадратичной регрессии [2].

При реализации матрицы планирования было осуществлено три серии экспериментов, включающих по 15 опытов. Результаты реализованной матрицы планирования представлены в таблице.

Таблиця 3 – Кодирование факторов и интервалы варьирования плана

Показатель	Глубина проплавления Н	Высота усиления С	Ширина шва В	Коэффициент наплавки А	Сила тока I
Нулевой уровень, $X_{oi}$	1,6	2,0	11,8	8,5	260
Интервал варьирования,	2,5	5,0	15,5	14,3	555
Нижний уровень $X_{min} = -1$	0,45	1,5	1,85	2,9	147,5
Верхний уровень: $X_{max} = +1$	2,05	3,5	13,65	11,4	407,5
Звездные точки:					
Нижний уровень: $X_{min} = -1,215$	1	1	0,5	8	350
Верхний уровень: $X_{max} = +1,215$	2,5	4	3	13,6	420

Связь между кодовым и натуральным значениям фактора определяется по формуле:

$$X_i = \frac{x - X_{i0}}{\delta_{i0}}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора;  $x$  – натуральное значение фактора (Н, С, В, А, I);  $X_{i0}$  – значение  $i$ -го фактора на нулевому уровне.

Интервал варьирования:

$$\delta_{i0} = \frac{(X_{max} - X_{min})}{2}. \quad (3)$$

Нулевой уровень (центр плана):

$$X_{i0} = \frac{(X_{max} + X_{min})}{2}. \quad (4)$$

Расстояние до звёздных точек или уровней плана согласно условию ортогональности находим из выражений:

$$X_{min}^* = (1 + \frac{d}{4})X_{max} - \frac{d}{4}X_{min}. \quad (5)$$

$$X_{max}^* = (1 + \frac{d}{4})X_{min} - \frac{d}{4}X_{max}.$$

Применяя методы планирования эксперимента получены адекватные уравнения регрессии, которые представляют собой функции зависимости твердости (HRC) от ширины шва (В), глубины проплавления (Н), высоты усиления шва (С), коэффициента наплавки ( $\alpha_n$ ) и силы тока (I). Для обоих случаев результаты эксперимента имеют следующий вид (таблица 4).

Обработка результатов эксперимента при вычислении коэффициентов регрессии проводилась с использованием пакета программ Statistica. Оценка статической значимости найденных коэффициентов и проверка адекватности полученной зависимости осуществлялась независимо, используя критерии Стьюдента, Кохрена и Фишера [1]. Результаты статической проверки приведены в таблице 5 (для ручной дуговой наплавки) и таблице 7 (для автоматической дуговой наплавки).

Для обоих случаев выполняется условие воспроизводимости результатов эксперимента и адекватности полученного уравнения регрессии:  $G_{расч} < G_{табл}$ ,  $F_{расч} < F_{табл}$ .

Конечный вид уравнения для ручной наплавки имеет вид:

$$HRC(H, C, B, \alpha, I) = -3,56 \cdot H - 0,490 \cdot C - 0,356 \cdot B + 0,337 \cdot \alpha - 0,001I^2, \quad (6)$$

для автоматической наплавки:

$$HRC(H, C, B, \alpha, I) = -9,423 \cdot H - 0,166 \cdot C \cdot B - 7,727 \cdot \alpha + 0,140 \cdot I - 0,00012I^2, \quad (7)$$

Сила тока входит в уравнение с положительным коэффициентом в обоих случаях, что свидетельствует о прямом влиянии силы тока на процессы, которые происходят в расплавленном металле. В то же самое время,  $I^2$  можно рассмотреть, как основной компонент в составе формулы теплоты ( $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ ), входящий в состав полученных уравнений с разными знаками, что свидетельствует о неоднозначности влияния тепловложения в металлургические процессы и процессы при наплавке. Это возможно объяснить тем, что при недостаточной силе тока, а значит и тепловложении, не все легирующие элементы перейдут в состав наплавленного

**Таблица 4** – Результаты эксперимента для автоматической дуговой наплавки

Твердость сплава, HRC				
Обозн, Vij	Знач,коэф,	Эксперимент	Расчет	Погрешность, %
b1	-3,561	56	56,3	0,53 %
b2	-0,490	56	55,4	1,08 %
b3	-0,356	56	55,7	0,54 %
b4	0,337	56	56,7	1,23 %
b5	0,482	61	61,2	0,33 %
b55	-0,001	64	63,5	0,79 %
		65	64,9	0,15 %
		64	64,3	0,47 %
		64	64,2	0,31 %
		64	64,5	0,78 %
		64	63,6	0,63 %
		64	63,7	0,47 %
		63	62,8	0,32 %
		63	62,8	0,32 %
		63	63,3	0,47 %

**Таблица 5** – Таблица статистических критериев достоверности результатов

Критерий Кохрена расчётный	Критерий Кохрена табличный	Критерий Фишера расчётный	Критерий Фишера табличный	Дисперсия адекватности	Дисперсия воспроизводимости
Грасч	Гтабл	Грасч	Гтабл	Сад2	Sy2
0,18	0,22	2,46	2,90	0,72	1,78

**Таблица 6** – Результаты эксперимента для ручной дуговой наплавки

Твердость сплава, HRC				
Обозн, Vij	Знач. коэф.	Эксперимент	Расчет	Погрешность, %
b1	-9,423	60	59,75	0,42 %
b23	-0,166	61	61,22	0,36 %
b4	7,727	60,33	61,23	1,47 %
b45	-0,016	61	61,72	1,17 %
b5	0,140	62	61,99	0,02 %
b55	0,00012	62,33	62,22	0,18 %
		63,33	63,47	0,22 %
		62	63,51	2,38 %
		63,33	63,24	0,14 %
		63,33	62,69	1,02 %
		63,33	62,55	1,25 %
		62	62,38	0,61 %
		62,33	62,10	0,37 %
		61,83	61,8	0,05 %
		60,33	60,10	0,38 %

**Таблиця 7** – Таблица статистических критериев достоверности результатов

Критерий Кохрена расчётный	Критерий Кохрена табличный	Критерий Фишера расчётный	Критерий Фишера табличный	Дисперсия адекватности	Дисперсия воспроизводимости
Грасч	Гтабл	Грасч	Гтабл	Sад2	Sy2
0,2	0,22	1,64	2,90	1,15	1,89

металла, а при слишком большой – легирующие элементы будут выгорать.

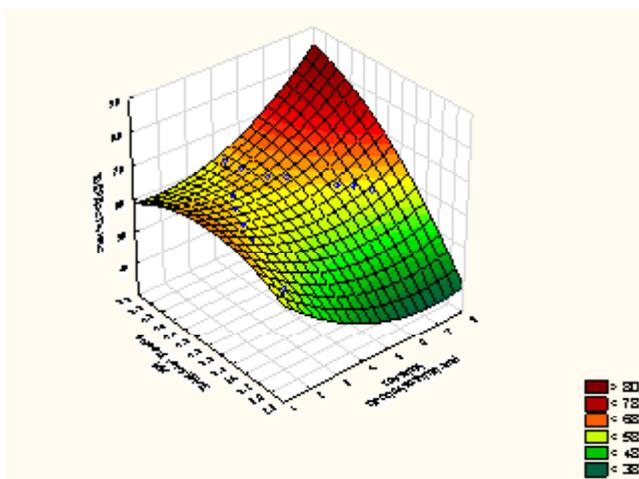
Геометрические параметры шва входят в состав уравнения с отрицательными знаками. Произведение  $C \cdot B$  можно рассматривать обобщенно, как геометрическое описание некоторой части площади сечения шва. Оно также входит в состав уравнения со знаком минус.

Нами была получена серия графиков наглядно показывающих взаимосвязь твёрдости от таких комбинаций параметров, как ширина и глубина проплавления (рис. 7); высоты усиления и глубина проплавления (рис. 3, рис. 7); высота усиления и ширина шва (рис. 4,

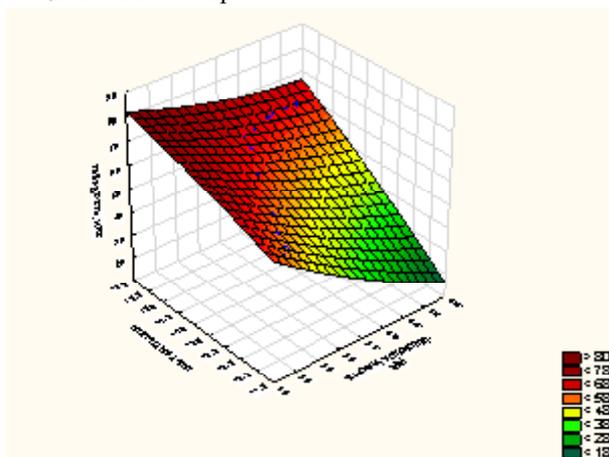
рис. 8); коэффициент наплавки и сила тока наплавки (рис. 5, рис. 9).

Такие же данные были получены и для автоматической наплавки износостойким сплавом 160X10P4Ф2 (рис. 8–9).

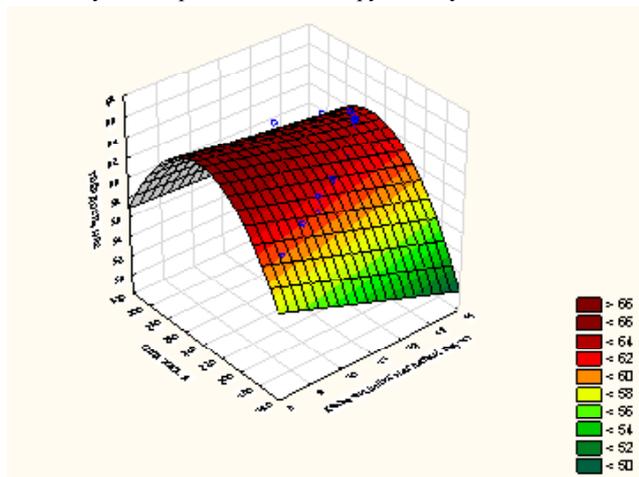
Степень полинома была взята не больше второй степени, так как вычисления показали, что в данном эксперименте это приводит к получению наиболее адекватной модели. Вследствие этого, графики представляют собой параболические зависимости разного характера. Такой вид зависимости ещё раз говорит о сложности процессов происходящих при формировании шва, в частности о конкуренции в геометрии его лицевой части и корня.



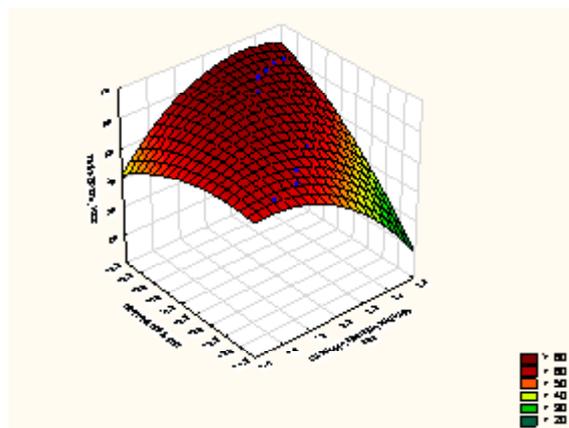
**Рис. 3.** График зависимости твёрдости от высоты усиления и глубины проплавления для ручной дуговой наплавки



**Рис. 4.** График зависимости твёрдости от высоты усиления и ширины шва для ручной дуговой наплавки



**Рис. 5.** График зависимости твёрдости от коэффициент наплавки и сила тока наплавки для ручной дуговой наплавки



**Рис. 6.** График зависимости твёрдости от ширины и глубины проплавления для автоматической дуговой наплавки

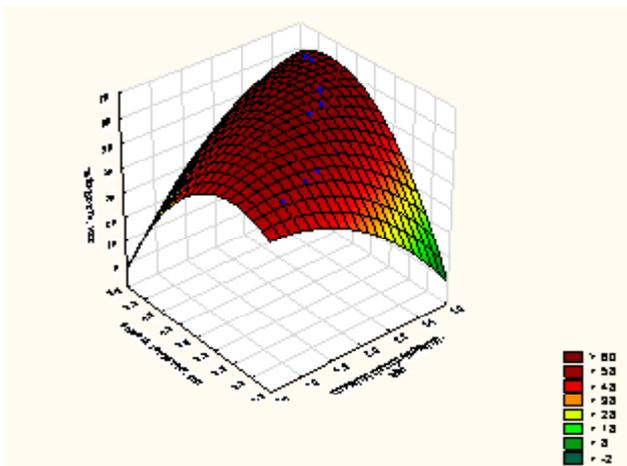


Рис. 7. График зависимости твёрдости от высоты усиления и глубины проплавления для автоматической дуговой наплавки

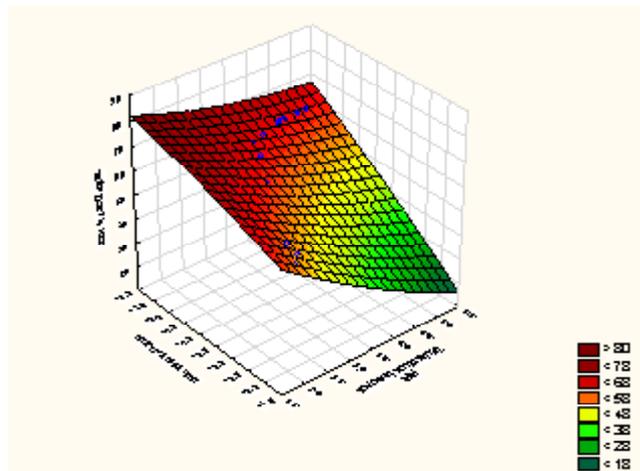


Рис. 8. График зависимости твёрдости от высоты усиления и ширины шва для автоматической дуговой наплавки

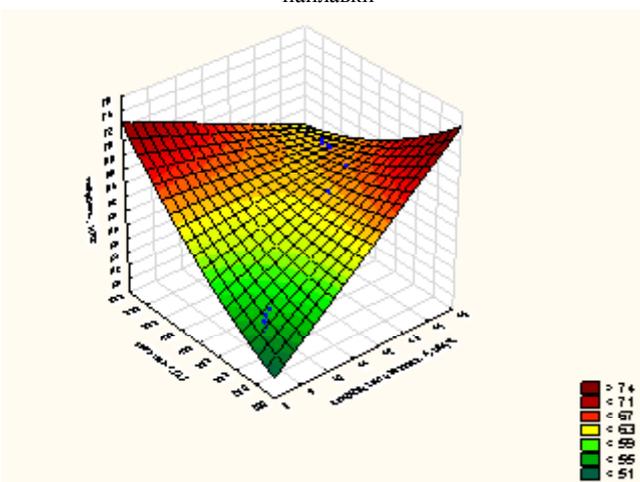


Рис. 9. График зависимости твёрдости от коэффициента наплавки и сила тока наплавки для автоматической дуговой наплавки

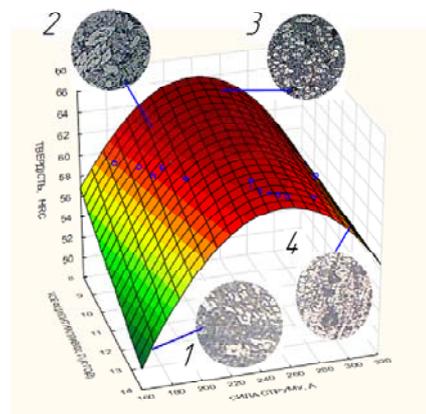


Рис. 10. Зависимость структурно-фазового состояния сплава 160X10P4Ф2 от силы тока и коэффициента наплавки [микроструктура образованная: 1 – при силе тока 160...180А; 2 – 200...230 А; 3 – 250...270 А; 4 – 300...320 А]

Была исследована зависимость структурно-фазового состояния от параметров наплавки на примере графика зависимости твёрдости от силы тока и коэффициента наплавки (рис. 10).

При недостаточной силе тока не все легирующие элементы перейдут в наплавленный металл, что приведёт к снижению количества упрочняющих фаз карбидов, боридов, карбоборидов и борокарбидов. Коэффициент перехода в этом случае будет представлять  $K_{пер} = 0,45...0,55$ . С увеличением силы тока коэффициент перехода постепенно увеличивается к значениям  $K_{пер} = 0,6$ . При оптимальных параметрах тока он достигает своего максимума и равняется  $K_{пер} = 0,65...0,85$ . После этого за счет роста погонной энергии значительная часть легирующих элементов выгорает и коэффициент перехода уменьшается  $K_{пер} = 0,3...0,4$ . Это означает уменьшение количества легирующих элементов в составе наплавленного металла, который приведёт к уменьшению количества образованных химических соединений карбидов, боридов,

карбоборидов, борокарбидов и других, вследствие чего агрегатная твердость уменьшается.

### Выводы

Таким образом, в результате математического исследования и проведения многофакторного эксперимента для износостойкого сплава 160X10P4Ф2, нами были получены следующие результаты:

1. Изучена взаимосвязь между шириной шва, высотой усиления, глубиной проплавления, коэффициентом наплавки, силой тока и твёрдостью.
2. Получены адекватные математические модели.
3. Построены соответствующие многомерные пространственные графические поверхности отклика, позволяющие наглядно анализировать зависимости.
4. Приведена наглядная визуализация влияния различных параметров дуговой наплавки на микроструктуру и структурно-фазовое состояние сплава 160X10P4Ф2.

### Список литературы

1. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М. : Мир, 1977. – 522 с.

- 2 Износостойкость сплавов, восстановление и упрочнение деталей машин / Под ред. В. С. Попова. – Запорожье : Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2006. – 420 с.
- 3 Попов С. Н. Решение задач трибоматериаловедения на основе системных многокритериальных методов математического анализа износостойкости сталей и сплавов / С. Н. Попов, Д. А. Антонюк, Т. В. Попова // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2004. – № 4. – С. 172–181.
- 4 Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 297 с.
- 5 Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л. : Энергоатомиздат. – 1990. – С. 53–88.
- 6 Попов С. Н. Концептуальные проблемы многокритериального подхода при исследовании износостойкости сплавов в условиях интенсивного изнашивания / С. Н. Попов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1999. – № 2. – С. 49–54.
- 7 Попов С. Н. Математическое моделирование износостойких гетерогенных покрытий композиционным биметаллом на базе легирования Fe-Cr-B-V / С. Н. Попов // Композиционные материалы в промышленности. – К. : АТМУ, 1999. – 141 с.
- 8 Попов С. Н. Оптимизация износостойкого наплавочного сплава системы Fe-C-Ti-B для условий изнашивания закреплённым абразивом / С. Н. Попов, Д. А. Антонюк // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – № 1. – С. 93–99.

Одержано 14.02.2019

### **Попов С.М., Шумикін С.О. Дослідження комплексного впливу параметрів наплавлення на фізико-механічні властивості зносостійких гетерогенних хромо-бористих сплавів**

**Мета роботи.** Метою цього дослідження є встановлення математичних залежностей впливу технологічних параметрів нанесення зносостійких сплавів на твердість поверхневого шару і геометричні параметри шва як при ручному, так і при автоматичному електродуговому напавленні гетерогенним хромо-бористим сплавом.

**Методи дослідження.** Під час аналізу впливу технологічних показників на фізико-механічні властивості зносостійких гетерогенних хромо-бористих сплавів при ручному і автоматичному електродуговому напавленні було вирішено використовувати математичне планування досліджень на основі активного експерименту, зі створенням чисельного опису математичного очікування.

**Отримані результати.** На основі теорії наукового математичного планування експерименту проведено комплекс відповідних дослідів, який дає змогу математично описати характеристики сплаву, дати теоретичну оцінку кореляції параметрів між собою.

**Наукова новизна.** Вперше отримана математична модель  $HRC = f(H, C, B, \alpha_n, I)$  у вигляді рівнянь регресії на основі полінома другого ступеня, що дає змогу зв'язати агрегатну твердість сплаву після нанесення на робочу поверхню з  $H$  – глибиною проплавлення,  $C$  – висотою посилення,  $B$  – шириною шва,  $\alpha_n$  – коефіцієнтом напавлення і  $I$  – силою струму напавлення.

**Практичне значення.** Отримані результати наведених досліджень дають змогу в рамках технічної і технологічної точності, необхідної в практичних інженерних розрахунках, отримати чисельні значення прогнозу фізико-механічних властивостей зносостійких гетерогенних хромо-бористих сплавів при варіюванні параметрів для ручного і автоматичного електродугового напавлення.

**Ключові слова:** напавлення, оптимізація, зносостійкість, сплав, регресія, геометрія шва, прогнозування.

### **Popov S., Shumikin S. Research of complex influence of surfacing parameters on the physic-mechanical properties of wear-resistant heterogeneous chrome-bororous alloys**

**Purpose.** The purpose of this study is to establish the mathematical dependencies of the influence of the technological parameters of the deposition of wear-resistant alloys on the hardness of the surface layer and the geometrical parameters of the weld both with manual and automatic electric arc surfacing with heterogeneous chrome-bororous alloy.

**Research methods.** When analyzing the effect of technological indicators on the physic-mechanical properties of wear-resistant heterogeneous chrome-bororous alloys in manual and automatic electric arc surfacing, it was decided to use mathematical planning of research based on an active experiment, with the creation of a numerical description of mathematical expectation.

**Results.** On the basis of the theory of scientific mathematical planning of an experiment, a complex of relevant experiments was carried out, which makes it possible to mathematically describe the characteristics of the alloy, to give a theoretical estimate of the parameters correlation among themselves.

**Scientific novelty.** For the first time a mathematical model was obtained  $HRC = f(H, C, B, \alpha_n, I)$  in the form of regression equations on the basis of a second-degree polynomial, which makes it possible to relate the aggregate hardness of the alloy after deposition on the working surface with  $H$  – penetration depth,  $C$  – gain height,  $B$  – weld width,  $\alpha_n$  – deposition rate and  $I$  – deposit current strength.

**Practical meaning.** The obtained results of the above studies make it possible, within the framework of technical and technological accuracy required in practical engineering calculations, to obtain numerical prediction values of the physic-mechanical properties of wear-resistant heterogeneous chrome-bororous alloys when varying the parameters for manual and automatic arc welding.

**Key words:** surfacing, optimization, wear resisting, alloy, regression, geometry of weld seam, forecasting.