

УДК 621.791.04

Волков Д. А., Кошевой А. Д., Заблоцкий В. К., Голуб Д. М., Землякова В. К.

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ И ВЫБОР ФЛЮСА ДЛЯ НАПЛАВКИ ЖЕЛЕЗО-КОБАЛЬТ-МОЛИБДЕНОВЫХ СПЛАВОВ

Создание технически совершенного, экономичного и качественного штампового инструмента для деформирования металла является важной научно-технической проблемой.

В настоящее время существенное увеличение стойкости режущих кромок пуансонов и матриц удается получить при использовании неметаллических твердых сплавов. Однако, высокая трудоемкость, сложность изготовления штампов из твердых сплавов и их дороговизна резко ограничивает область их применения. Большие резервы в повышении ресурса прессовых штампов заложены в технологических возможностях наплавки их рабочих поверхностей термо- и износостойкими сплавами. Поэтому увеличение стойкости режущих и вырубных штампов холодной штамповки является весьма актуальным вопросом [1].

Для решения данной проблемы была поставлена задача поиска и разработки новых сплавов, наплавка которых могла бы позволить существенно повысить износостойкость штампов без усложнения технологии и дороговизны их изготовления.

В настоящее время наиболее перспективными являются наплавочные материалы с эффектом вторичного твердения (мартенситно-стареющие и дисперсионно-твердеющие стали), эксплуатационные свойства которых значительно превышают свойства инструментальной стали. Для этих целей используются в основном сплавы системы Fe–Co–Mo (комолы) и Fe–Co–W с некоторыми добавками легирующих элементов. Имеется опыт использования порошковых проволок для получения наплавленного металла, обладающего свойствами дисперсионного твердения [2–4].

К характерным деталям, наплавленным такими порошковыми проволоками, относятся инструменты горячего деформирования. Однако, большинство таких материалов создает небольшой эффект повышения твердости, а некоторые из них имеют значительную первоначальную твердость. Кроме того сплавы системы Fe–Co–W плохо работают в условиях больших динамических нагрузок вследствие выкрашивания и хрупкого разрушения [5, 6]. Легирование данных наплавочных материалов дефицитными дорогостоящими элементами (кобальтом, вольфрамом), общее содержание которых достигает 20 %, обуславливает их высокую стоимость и несколько ограничивает применение [3, 4].

Поэтому для разработки порошковой проволоки для наплавки резцов и штампов холодной штамповки была выбрана система легирования Fe–Co–Mo.

Целью работы является представление результатов экспериментальных исследований и математического моделирования по оптимизации состава шихты порошковой проволоки, обеспечивающей в наплавленном слое эффект вторичного твердения и предназначенной для наплавки рабочей поверхности инструментов горячего деформирования.

Для повышения вязкости матрицы системы без уменьшения твердости сплава после наплавки и старения, была предпринята попытка исследования влияния таких легирующих элементов в порошковой шихте, как Nb, Ni, Cr и Al + Mg на ударную вязкость (a_n) и твердость (HRC) этих сплавов. В качестве основы порошкового сердечника наплавочного материала была принята смесь порошков, содержащая 15 % Co + 15 % Mo и остальное Fe, которые при высокой твердости обладают сравнительно низкими показателями вязкости, что значительно сужает область их применения. Поэтому нами были проведены исследования по разработке наплавочного материала в виде порошковой проволоки, обеспечивающей получение сплавов с необходимой величиной ударной вязкости при твердости не выше 60 HRC после дисперсионного твердения.

Исследование влияния легирующих элементов в порошковой шихте: Nb, Ni, Cr и Al + Mg на ударную вязкость (a_n) и твердость (HRC) в процессе старения, проводилось с использованием методов математического планирования эксперимента, с целью сокращения количества опытов [5]. Моделирование осуществляли в программной среде системы Statistica (StatSoft) [6].

Содержание кобальта и молибдена во всех опытах было постоянным – 15 % Co + 15 % Mo. В качестве параметров оптимизации (откликов) были выбраны: ударная вязкость ($Y-a_n$), твердость ($Y-HRC$). В качестве переменных величин (факторов) содержание компонентов порошковой шихты: Nb, Ni, Cr и Al + Mg. Для получения математического описания влияния легирующих элементов на ударную вязкость и твердость после закалки была реализована полуреплика 2^{4-1} от полного фактора эксперимента (дробный факторный эксперимент – ДФЭ) с учетом взаимодействия факторов. Матрица планирования и ее реализация представлены в табл. 1.

Таблица 1

План-матрица ДФЭ 2^{4-1} и ее реализация, полученная при помощи системы Statistica (StatSoft)

Standard Run	Design: 2**(4-1)					
	Ni	Al+Mg	Nb	Cr	a_n	HRC
1	1,000000	0,700000	1,000000	0,000000	6,2	42
2	1,000000	0,700000	2,000000	3,000000	8,6	41
3	1,000000	0,900000	1,000000	3,000000	9,3	40
4	1,000000	0,900000	2,000000	0,000000	12	37
5	3,000000	0,700000	1,000000	3,000000	9,8	38
6	3,000000	0,700000	2,000000	0,000000	13	36
7	3,000000	0,900000	1,000000	0,000000	11	39
8	3,000000	0,900000	2,000000	3,000000	10	39

Для визуализации результатов были построены трехмерные графики поверхностей отклика рис. 1–6.

После построения моделей провели их анализ, используя систему Statistica (StatSoft). Коэффициенты моделей и их статистические характеристики представлены в табл. 2 и 3.

Из анализа табл. 2 и 3 видно, что общее качество моделей хорошее, т. к. коэффициент достоверности аппроксимации $R-sqr = 0,9912$ и $0,98571$ соответственно, стандартная ошибка $MS Residual = 0,27$ и $0,4$ соответственно.

Таблица 2

Коэффициенты модели и статистические характеристики (переменная $Y-a_n$)

Factor	Regr. Coefficients; Var.: a_n ; R-sqr=,9912; Adj:,93838 2**(4-1) design; MS Residual=,27225 DV: a_n					
	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(1)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-18,1500	3,548459	-5,11490	0,122913	-63,2374	26,93745
(1)Ni	10,6725	1,589062	6,71623	0,094097	-9,5184	30,86345
(2)Al+Mg	26,6250	4,125000	6,45455	0,097853	-25,7881	79,03809
(3)Nb	3,2750	0,825000	3,96970	0,157101	-7,2076	13,75762
1 by 2	-10,3750	1,844756	-5,62405	0,112025	-33,8148	13,06485
1 by 3	-0,7250	0,368951	-1,96503	0,299683	-5,4130	3,96297
1 by 4	-0,2150	0,055000	-3,90909	0,159437	-0,9138	0,48384

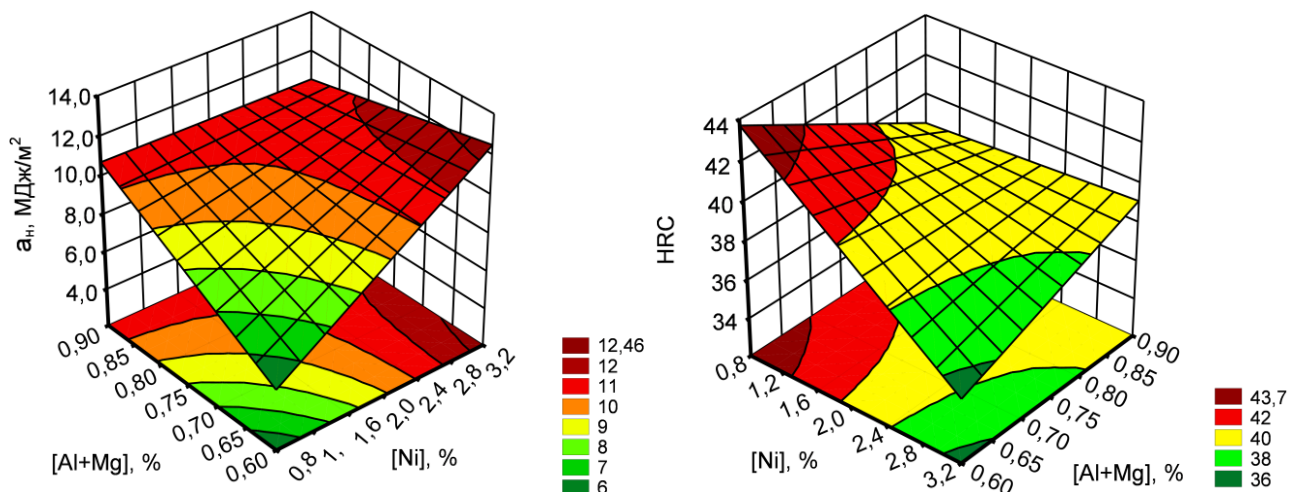


Рис. 1. Поверхности отклика ударной вязкости и твердости после закалки в зависимости от содержания компонентов (Al + Mg и Ni) в сердечнике порошковой проволоки

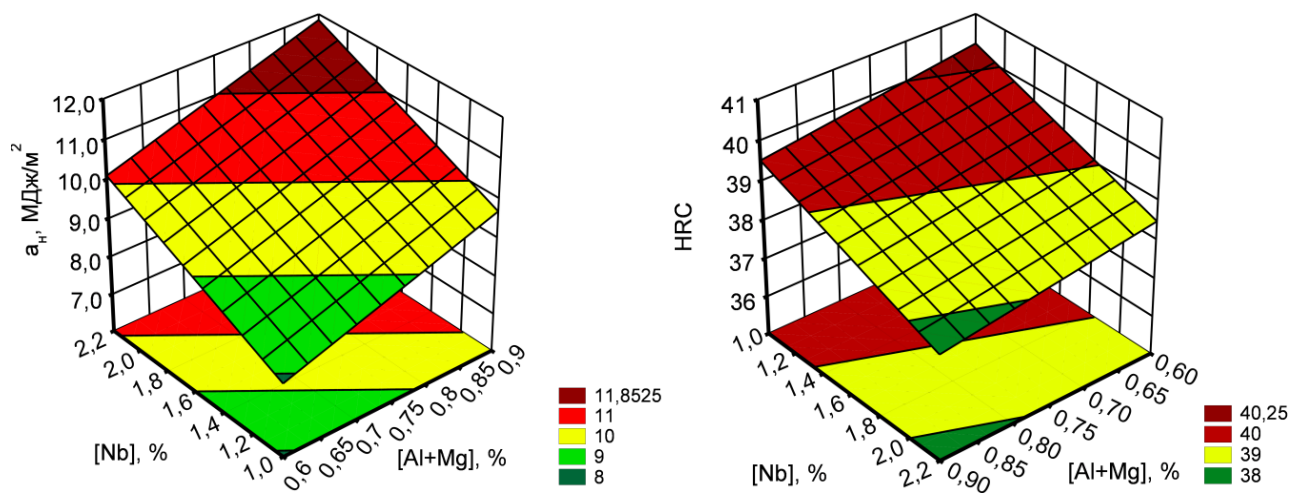


Рис. 2. Поверхности отклика ударной вязкости и твердости после закалки в зависимости от содержания компонентов (Nb и Al + Mg) в сердечнике порошковой проволоки

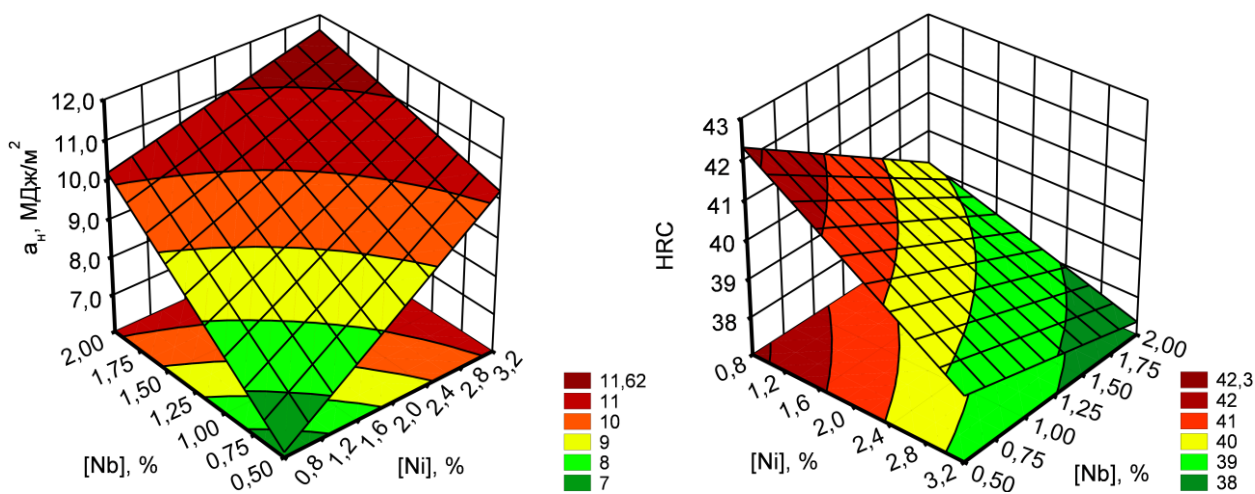


Рис. 3. Поверхность отклика ударной вязкости в зависимости от содержания компонентов (Nb и Ni) в сердечнике порошковой проволоки

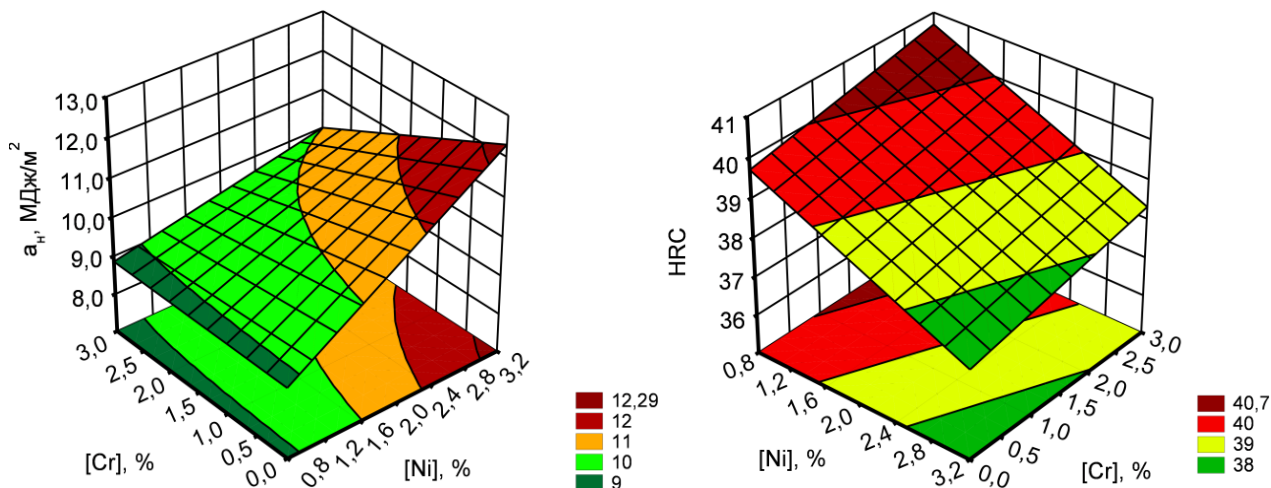


Рис. 4. Поверхность отклика ударной вязкости в зависимости от содержания компонентов (Cr и Ni) в сердечнике порошковой проволоки

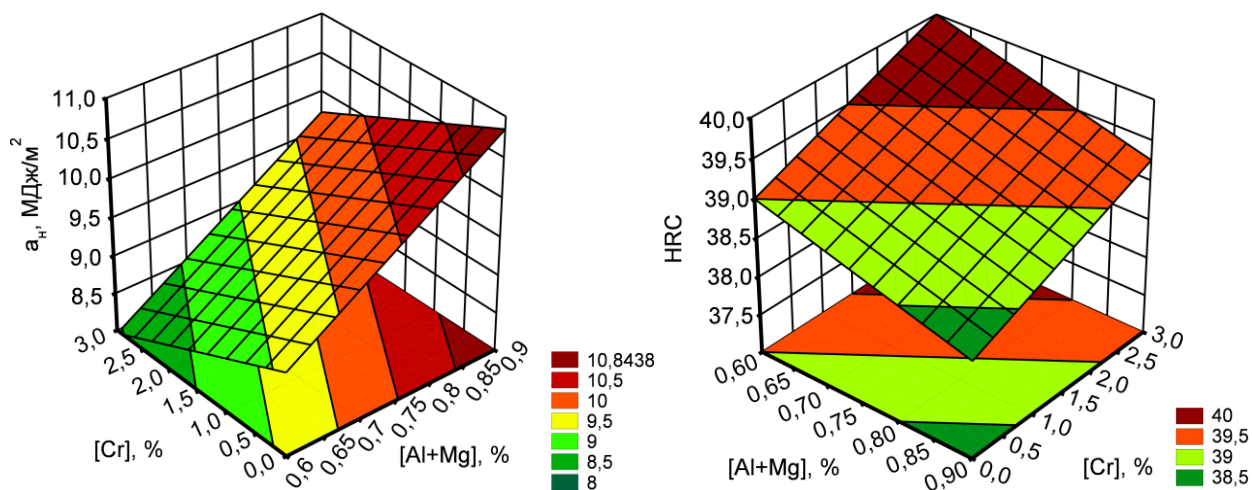


Рис. 5. Поверхность отклика ударной вязкости в зависимости от содержания компонентов (Cr и Al + Mg) в сердечнике порошковой проволоки

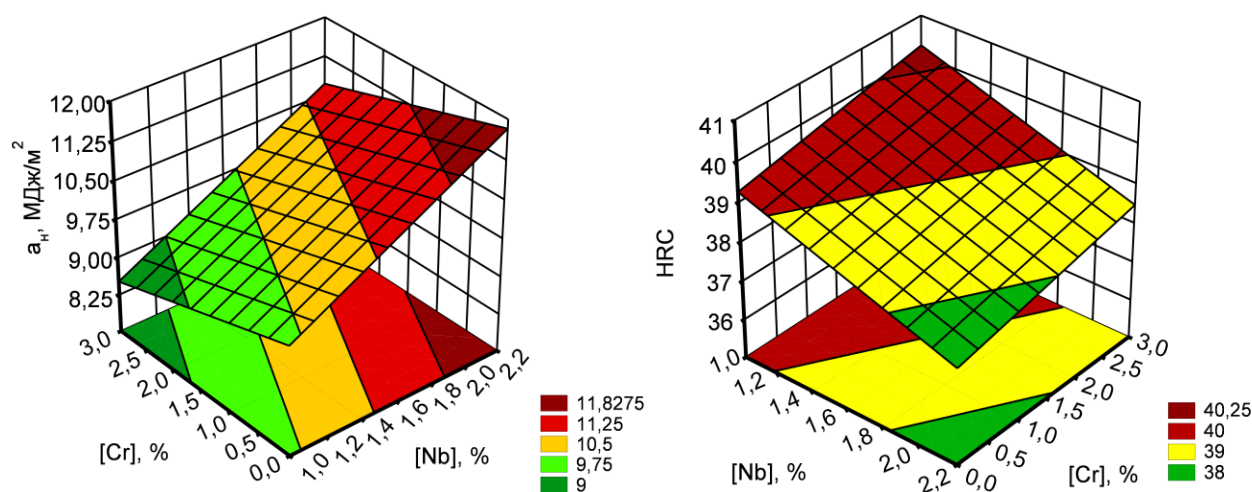


Рис. 6. Поверхность отклика ударной вязкости в зависимости от содержания компонентов (Cr и Nb) в сердечнике порошковой проволоки

Таблиця 3

Коеффіцієнти моделі і статистическіє характеристики (переменная Y -HRC)

Regr. Coefficients; Var.:HRC; R-sqr=,98571; Adj.,9 2**(4-1) design; MS Residual=,4 DV: HRC						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(1)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	66,7500	4,301163	15,51906	0,040965	12,0985	121,4015
(1)Ni	-11,9500	1,926136	-6,20413	0,101737	-36,4239	12,5239
(2)Al+Mg	-27,5000	5,000000	-5,50000	0,114498	-91,0310	36,0310
(3)Nb	-2,5000	1,000000	-2,50000	0,242238	-15,2062	10,2062
1 by 2	12,5000	2,236068	5,59017	0,112690	-15,9119	40,9119
1 by 3	0,5000	0,447214	1,11803	0,464559	-5,1824	6,1824
1 by 4	0,1333	0,066667	2,00000	0,295167	-0,7137	0,9804

Запишем полученные уравнения регрессии в следующем виде:

$$Y_{a_n} = -18,15 + 10,6725 [\%, Ni] + 26,625 [\%, Al + Mg] + 3,27 [\%, Nb] - \\ - 10,375 [\%, Ni][\%, Al + Mg] - 0,725 [\%, Ni][\%, Nb] - 0,215 [\%, Ni][\%, Cr];$$

$$Y_{HRC} = 66,8 - 11,9 [\%, Ni] - 27,5 [\%, Al + Mg] - 2,5 [\%, Nb] + 12,5 [\%, Ni][\%, Al + Mg] + \\ + 0,5 [\%, Ni][\%, Nb] + 0,13 [\%, Ni][\%, Cr].$$

Из анализа полученных уравнений видно, что значение параметра оптимизации возрастает с увеличением содержания Ni, Al + Mg и Nb и уменьшением содержания Cr – для ударной вязкости; для твердости после закалки – возрастает с уменьшением содержания Ni и Nb увеличением содержания Al + Mg.

Как видно из этих уравнений, в рассматриваемом интервале варьирования совместное повышение содержания Ni, Al + Mg и Nb положительно сказывается на ударную вязкость. Кроме того, совместное повышение содержания Ni и Al + Mg вызывает повышение твердости закаленных сплавов, в то время когда Cr практически не оказывает никакого влияния на эти характеристики наплавленного сплава.

Исходя из полученных результатов математического планирования экспериментов и реализованных опытов по выбору сплава для наплавки, для исследования были изготовлены опытные составы порошковых проволок, которые приведены в табл. 4.

Для исследования ударной вязкости и твердости были изготовлены образцы из металла, переплавленного электрошлаковым способом. Для этой цели были изготовлены порошковые проволоки диаметром 4,0 мм. Для изготовления порошковой проволоки применялась стальная низкоуглеродистая лента 0,5 × 18 мм. Коэффициент заполнения находился в пределах $K_z = 0,45 \dots 0,47$.

Переplав осуществлялся в медном водоохлаждаемом кокиле диаметром 35 мм и высотой 420 мм под инертным фторидным флюсом АНФ-7 на автомате А-639. Режим переplава был следующим: $I_{св} = 500$ А, $U_0 = 36$ В.

Переplавленные слитки проковывались до получения образцов сечением 20 × 20 мм. Все образцы закаливались от температуры 1250 °С с нагревом в соляной ванне при последующем охлаждении в масле. Затем изготавливались образцы на ударную вязкость. После испытания на ударную вязкость определялась твердость на этих же образцах.

Во всех составах содержание кремнефтористого натрия составляло 0,5 ÷ 1 %. Коэффициент заполнения для всех опытных порошковых проволок составлял $K = 45 \div 49$. Для изготовления проволоки использовалась стальная лента марки 08кп. Коэффициент заполнения

порошковых проволок А1 и А2 колебался в широком диапазоне $K = 28-40$ из-за плохой сыпучести шихтовых материалов, что было вызвано присутствием в нем высокого содержания молибденового порошка. Вследствие этого перемешивание и распределение компонентов в шихте было неравномерное. Наблюдались незаполненные участки в порошковой проволоке.

Таблица 4

Расчетный состав опытных порошковых проволок

Условная марка	Химический состав, вес %							
	Co	Mo	FeMo	Cr	Ni	FeNb	FeTi	Al + Mg
Б01	14	8	10	1,5	3	1,5	–	0,8
Б02	17	9	10	2	3,5	2	–	0,9
Б03	15	9	11	2,5	4	3	–	1,0
Б04	16	10	12	2,5	4	3,5	–	1,0
Б05	16	10	12	3	5	4	–	1,1
А1 ПП-К14М15Н9Б2Т	14	15	–	–	5	–	0,8	–
А2 ПП-К14М15Н9Б2Т	14	16	–	–	9	4	2	–

В опытных проволоках частичная замена молибденового порошка ферромolibденом позволила существенно улучшить сыпучесть шихтовых материалов, перемешивание, распределение компонентов в объеме шихты и заполнение порошковой проволоки.

ВЫВОДЫ

На основании полученных данных можно рекомендовать для дальнейшего исследования следующий состав порошкового сердечника проволоки: 15 % Co, 15 % Mo, 9 % Ni, 4 % FeNb, 1,0 % (Al + Mg), остальное Fe.

Данный состав рекомендуется взять за основу и скорректировать при дальнейших исследованиях сварочно-технологических свойств данного наплавочного материала при наплавке сталей типа Н8М11К10СТ, Н12М8К8С2Т и др. под слоем флюса.

В связи с высокой степенью легирования (содержание легирующих элементов превышает 30–35 %) высокопрочных мартенситностареющих сталей, которая не позволяет изготовить самозащитную порошковую проволоку, обеспечивающую получение наплавленного металла такого класса, принято решение в дальнейших исследованиях комплексно рассмотреть систему порошковая проволока – флюс – режимы наплавки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Г. Н. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей научная монография / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак. – Волгоград : ВолгГТУ, 2005. – 284 с.
2. Кондратьев И. А. Порошковая проволока для наплавки слоя мартенситно-стареющей стали / И. А. Кондратьев, И. А. Рябцев, Я. П. Черняк // Автоматическая сварка. – 2006. – № 4. – С. 50–53.
3. Кальянов В. Н. Мартенситно-стареющие стали для наплавки штампов / В. Н. Кальянов, В. А. Багров // Сварочное производство. – 2003. – № 2. – С. 35–37.
4. Наплавочный материал с эффектом вторичного твердения для повышения стойкости металлообрабатывающего инструмента / Е. Н. Еремин, А. С. Лосев, А. Е. Еремин, Г. П. Румянцев // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения : сб. науч. праць. – Київ, 2011. – № 14. – С. 453–455.
5. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 167 с.
6. Боровиков В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на ком-пьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с. : ил.