

УДК 621.791.927.5:669.018.25

Кошечая А. А., Чигарев В. В., Волков Д. А., Кошевой А. Д.

РАЗРАБОТКА СОСТАВА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ДУГОВОЙ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ НАПЛАВКИ СПЛАВА С ВЫСОКОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТЬЮ

Термическая усталость является основным видом повреждений инструментов для горячего деформирования металлов: прокатных валков, штампов горячей обработки давлением, рабочих втулок контейнеров для горячего прессования цветных металлов и т. д., которая проявляется в образовании сетки трещин разгара в результате циклических высокотемпературных нагрузок [1–3].

Трещины термической усталости определяются усталостным разрушением, зависящим от удельных контактных давлений металла на инструмент, скорости скольжения, количества циклов нагрузки, количества и градиента теплосмен, вызывающих появление сетки разгара, поэтому данный вид износа также называют разгарным [4].

Разгарные трещины усугубляют процесс износа истиранием, а во многих случаях сами становятся причиной выхода из строя прессового инструмента, что значительно увеличивает затраты и время простоя оборудования при проведении ремонтных работ. Поэтому широкое внедрение процессов дуговой наплавки порошковыми проволоками при изготовлении штампового и прессового инструмента является важным резервом экономии металла и повышения рабочих характеристик наплавленных изделий [5].

Однако наплавочные порошковые проволоки, применяемые в настоящее время для упрочнения и восстановления тяжело нагруженного инструмента при обработке металлов давлением, не решают проблемы повышения эксплуатационной стойкости инструмента для горячей обработки металлов, в частности, рабочих втулок для прессования цветных металлов. В тоже время, имеющиеся порошковые проволоки содержат в своем составе значительное количество дорогостоящих и дефицитных легирующих элементов, таких как вольфрам и молибден, что также затрудняет решение данной проблемы.

Разработка более износостойких и недорогих самозащитных порошковых проволок, которые позволяют в значительной степени механизировать технологический процесс упрочнения и восстановления инструмента, затруднена недостаточной изученностью влияния отдельных легирующих элементов в комплексно легированном сплаве на износ- и разгаростойкость наплавленного металла, которые являются определяющими показателями свойств материалов для инструмента горячей обработки металлов.

Целью настоящей работы является разработка композиции сердечника порошковой проволоки для наплавки инструмента горячей обработки металлов, обеспечивающей получение высокой разгаростойкости и твердости наплавленного слоя.

Опыт разработки сварочных материалов для наплавки сплавов с высокой термической стойкостью, в частности, порошковых проволок, свидетельствует о целесообразности использования систем легирования типа С-Сг-В-Мо-В-Ті [6, 7]. При такой системе легирования отмечается положительное влияние вольфрама и молибдена на сопротивление термической усталости.

Ванадий, в свою очередь, благодаря благоприятному влиянию на горячую твердость и коэффициент теплового расширения, повышает разгаростойкость. Еще в исследованиях, проведенных автором работы [8] при изучении разгаростойкости комплексно легированной стали типа 4Х5В2ФС, было установлено, что наиболее низкую разгаростойкость имели стали с высоким (более 10 %) содержанием вольфрама (4Х4В12ФН).

Влияние хрома находится при этом в зависимости от содержания вольфрама. Если содержание хрома увеличивается (до 5 %) при относительно малом количестве вольфрама (до 2 %), разгаростойкость возрастает. Если же содержание хрома увеличивается при высоком содержании вольфрама, то улучшение разгаростойкости незначительное. Здесь же отмечено отрицательное влияние на сопротивление термической усталости углерода. Считается оптимальным содержание углерода 0,3...0,4 % [2].

Таким образом, можно утверждать, что работоспособность инструмента горячей обработки можно объяснить стойкостью карбидов вольфрама и хрома против коагуляции. Мелкодисперсная карбидная фаза, состоящая из специальных карбидов вольфрама или карбидов хрома, легированных вольфрамом, препятствует продвижению дислокаций, являясь барьером для их взаимодействия в процессе термоциклирования. Появление крупных карбидов типа $(Fe, Cr)_3C$, малостойких против коагуляции и легко обособливающих при нагреве, определяет склонность стали как к раннему трещинообразованию, так и к быстрому после начала испытаний снижению твердости.

По данным [2, 4, 8] изменения твердости в процессе циклирования показали, что стали, легированные Si, Mn и небольшим количеством Cr, обладают пониженным сопротивлением разупрочнению при нагреве. Резкое падение твердости происходит в начальный момент изнашивания. В то же время у сталей, легированных Cr и Si (более 2 %), уровень твердости остается значительно выше, чем у сталей, легированных Mn.

Результаты проведенных экспериментальных исследований твердости в процессе термоциклирования известных штамповых сталей и наплавов представлены на рис. 1.

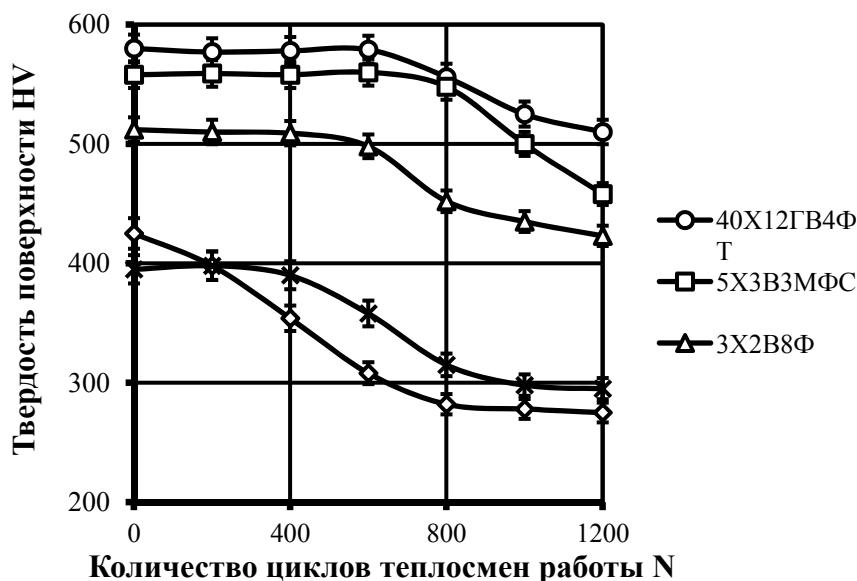


Рис. 1. Влияние количества циклов теплосмен работы на твердость инструментальных сталей

Из анализа графика (рис. 1) следует, что все исследуемые стали (за исключением стали 5ХНМ) до 400 циклов стабильно сохраняют первоначальную твердость, затем наступает небольшой спад и снова результаты стабилизируются. Вместе с тем и при этих испытаниях установлено, что в сталях марок 5Х3В3МФС и 40X12ГВ4ФТ первоначальная твердость сохраняется более длительное время, т. е. до 600 циклов.

Сопоставление значений разгаростойкости с результатами замера твердости в процессе циклирования показывают на сопоставимость этих результатов. Интенсивность разупрочнения сталей совпадает с началом трещинообразования.

Замеры твердости при термоциклировании сталей закаленных с различных температур показывают, что лучшие и стабильные результаты получаются на сталях, закаленных при оптимальных температурах для данного состава (рис. 1). Такой оптимальной температурой для стали 40X12ГВ4ФТ является 1323 К, а для стали 5ХЗВЗМФС – 1373 К.

Приведенные выше, зачастую противоречивые, сведения о влиянии легирующих элементов на разгаростойкость и твердость можно объяснить различием в уровнях легирования, а, следовательно, и свойствах испытываемых материалов, теплосиловых условий испытаний, а так же сложностью взаимодействия всех факторов в условиях работы инструмента для горячего деформирования металлов.

Поэтому для более полного освещения вопроса влияния легирующих элементов на параметры оптимизации состава наплавленного металла были проведены испытания наплавов, выполненных самозащитными порошковыми проволоками с различным содержанием хрома, вольфрама и углерода. При этом применялся следующий состав газослакообразующей части наполнителя, в вес. %: мрамор – 25, плавиковый шпат – 50, перовскитовый концентрат – 25. Производилось волочение порошковой проволоки обычной трубчатой конструкции диаметром 3,0 мм ($K_3 = 0,31$) на однобарабанном волочильном стане.

Выбор системы легирования и основные уровни введения химических элементов в наплавленный металл выполнялся на уровне сравнительной оценки ряда составов наплавленного металла, а так же данных предварительных испытаний сталей и наплавленных металлов. В результате этого было установлено, что система и основной уровень легирования соответствуют составу наплавленного металла типа 40X10В4Ф.

В качестве аналогов, приняты стали, наплавленные порошковыми проволоками ПП-20Х4В10Н4ФТО и ПП-0Х6Н8М7С, которые в настоящее время обеспечивают наиболее высокую работоспособность инструмента при горячем прессовании металлов [4, 6, 7].

Разработку оптимального состава наплавленного металла производили с использованием метода многофакторного планирования эксперимента с использованием программного продукта Statistica (StatSoft) [9, 10]. Выполняли построение ортогонального плана второго порядка 2^3 , в котором интервалы варьирования концентрации легирующих элементов (С, Cr, W) выбирали на основе предварительных экспериментов по влиянию отдельных легирующих элементов на параметры оптимизации [9]. Все остальные элементы наплавленного металла были взяты в следующих пределах в %: Si = 0,27...0,34; Mn = 0,65...0,75; V = 0,17...0,25; Ti = 0,17...0,25. Наплавку осуществляли на постоянном токе обратной полярности на следующем режиме: сварочный ток – 270...280 А, напряжение на дуге – 25...27 В, скорость наплавки – 20 м/ч. Наплавка производилась с предварительным подогревом образцов до температуры 873 К и последующим после наплавки выравниванием температуры в печи и охлаждением образцов вместе с печью. Испытания на разгаростойкость наплавленного металла производилась на специально разработанной установке, имитирующей напряженное состояние наплавленного прессового инструмента в условиях периодических нагревов и охлаждений. В качестве критерия оценки разгаростойкости наплавленного металла применялось количество термоциклов до появления первых трещин на поверхности образца. Наличие трещин определялось через каждые 50 циклов визуально или с применением лупы с 5-кратным увеличением.

План-матрица эксперимента и ее реализация, полученная с помощью системы Statistica (StatSoft), представлены в табл. 1.

Коэффициенты модели и статистические характеристики, полученные в результате расчетов, представлены в табл. 2.

Таблица 1

План-матрица эксперимента и ее реализация

№ опыта	Факторы (содержание элементов, %)			Отклик (число термоциклов)
	X_1 ([% C])	X_2 ([% Cr])	X_3 ([% W])	$Y_{разгар}$
1	0,450000	10,50000	4,000000	950
2	0,450000	10,50000	4,000000	950
3	0,450000	12,50000	4,600000	1000
4	0,450000	8,50000	3,400000	1450
5	0,300000	12,50000	4,000000	1050
6	0,300000	8,50000	4,000000	1250
7	0,300000	10,50000	4,600000	950
8	0,450000	10,50000	4,000000	1080
9	0,450000	8,50000	4,600000	1120
10	0,600000	12,50000	4,000000	800
11	0,600000	10,50000	4,600000	1020
12	0,600000	8,50000	4,000000	1140
13	0,600000	10,50000	3,400000	1200
14	0,300000	10,50000	3,400000	1480
15	0,450000	12,50000	3,400000	1200

Таблица 2

Коэффициенты модели и статистические характеристики

Фактор	Regr. Coefficients; Var.: Y_T ; R-sqr=,95535; Adj: ,87497 (Разгаростойкость) 3 3-level factors, 1 Блоки; MS Residual=4348,333 DV: Y_T						
	Regressn Коэффиц	Std.Err.	t(5)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
Mean/Interc.	13374,75	2370,639	5,64183	0,002427	7280,82	19468,67	
(1)C (L)	-3872,22	2321,085	-1,66828	0,156133	-9838,76	2094,32	
C (Q)	814,81	1525,211	0,53423	0,616072	-3105,87	4735,49	
(2)Cr (L)	-366,46	217,072	-1,68819	0,152176	-924,46	191,54	
Cr (Q)	12,08	8,579	1,40843	0,218044	-9,97	34,14	
(3)W (L)	-4332,06	832,757	-5,20207	0,003461	-6472,73	-2191,39	
W (Q)	418,98	95,326	4,39526	0,007053	173,94	664,02	
1L by 2L	-116,67	109,903	-1,06154	0,337005	-399,18	165,85	
1L by 3L	972,22	366,344	2,65385	0,045217	30,51	1913,94	
2L by 3L	27,08	27,476	0,98572	0,369538	-43,55	97,71	

Качество регрессионной модели оценивают с помощью коэффициента детерминации $R-Sqr$ (R -квадрат). Для нашей модели он составляет $R-Sqr = 0,95535 \approx 1,0$ поэтому качество модели достаточно хорошее. В табл. 2 первый столбик это коэффициенты регрессионного уравнения, $t(5)$ – наблюдаемые значения критерия Стьюдента, p – значимость коэффициентов по критерию Стьюдента. Коэффициенты можно считать значимыми, если $p < 0,05$. Для того чтобы проиллюстрировать полученные результаты были построены контурные графики полученной модели (рис. 2).

Математическое описание поверхностей отклика, построенной модели имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y_{разгар} = & 13374,75 - 3872,2[\% C] + 814,81[\% C]^2 - 366,46[\% Cr] + \\
 & + 12,08[\% Cr]^2 - 4332,06[\% W] + 418,98[\% W]^2 - 116,67[\% C][\% Cr] + \\
 & + 972,22[\% C][\% W] + 27,08[\% Cr][\% W].
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Из анализа этого уравнения вытекает, что лучшими из исследуемых наплавленных металлов являются те составы, которые характеризуются минимальным содержанием вольфрама и хрома. В то время, как с повышением содержания углерода и карбидообразующих элементов, таких как хрома и вольфрама, происходит снижение разгаростойкости наплавленного металла.

Это объясняется преимущественным влиянием на нее количества карбидной фазы по сравнению с формой, типом и другими ее параметрами, которые для исследованных узких пределов изменения содержания элементов в наплавленном металле являются близкими по величине.

Подтверждением данного положения является то, что с повышением количества карбидной фазы в наплавленном металле интенсивно снижается его разгаростойкость. Карбиды, располагаясь по границам зерен, ухудшают межкристаллитные связи, что, в свою очередь, снижает прочность и пластичность металла, которые оказывают определяющее влияние на разгаростойкость.

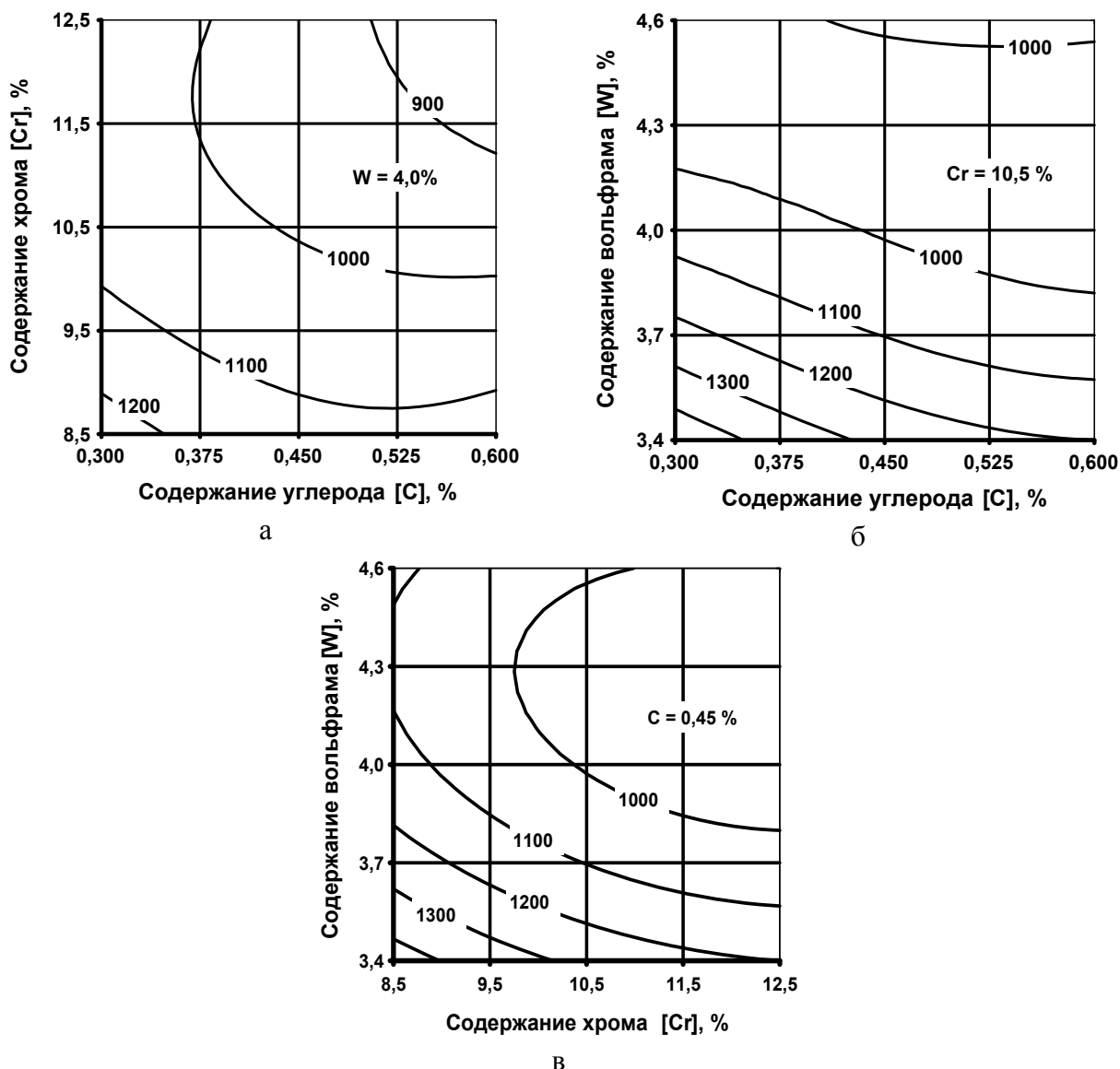


Рис. 2. Контурные графики зависимости разгаростойкости наплавленного металла от его химического состава:

а – при постоянном содержании вольфрама $[W] = 4,0 \%$; б – при постоянном содержании хрома $[Cr] = 10,5 \%$; в – при постоянном содержании углерода $[C] = 0,45 \%$

На основании полученных экспериментально-теоретических данных, а так же после выполнения оптимизационных расчетов по полученной модели можно рекомендовать следующий состав наплавленного металла, удовлетворяющий поставленным требованиям по разгаростойкости и твердости наплавленного слоя: C = 0,35...0,40 %; Cr = 11,5...12,5 %; W = 3,5...4,0 %; Si = 0,27...0,34 %; Mn = 0,65...0,75 %; V = 0,17...0,25 %; Ti = 0,17...0,25 %.

Разработанный состав наплавленного металла отвечает типу 40X12ГВ4ФТ и может быть принят за основу для дальнейшей отработки состава самозащитной порошковой проволоки для наплавки прессового инструмента горячей обработки металлов.

ВЫВОДЫ

Теоретически доказана и экспериментально подтверждена зависимость между химическим составом, фазовым и структурным состоянием и такими основными эксплуатационными свойствами, как твердость и разгаростойкость сплавов, работающих в условиях горячей обработки металлов давлением.

Разработана математическая модель и построено уравнение регрессии, описывающее ее, что позволило установить характер влияния основных легирующих элементов, таких как углерод, вольфрам и хром на разгаростойкость наплавленного металла.

На основании анализа полученной модели выбран следующий состав наплавленного металла, удовлетворяющий поставленным требованиям по разгаростойкости и твердости наплавленного слоя: C = 0,35...0,40 %; Cr = 11,5...12,5 %; W = 3,5...4,0 %; Si = 0,27...0,34 %; Mn = 0,65...0,75 %; V = 0,17...0,25 %; Ti = 0,17...0,25 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябцев И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования / И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев. – Киев : Экотехнологія, 1999. – 62 с.
2. Кошевой А. Д. Повышение износостойкости рабочих поверхностей прессового инструмента / А. Д. Кошевой, В. А. Пресняков // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 473–476.
3. Гулаков С. В. Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский. – Мариуполь : Издательство ПГТУ, 2005. – 170 с.
4. Влияние высокотемпературного термоциклирования на наплавленный металл типа штамповых теплостойких сталей / [И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев, А. А. Бабинцев и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – № 2. – С. 26–28.
5. Причины выхода из строя рабочих втулок при прессовании трубных заготовок на гидравлических прессах [Электронный ресурс] / А. Г. Гринь, В. А. Пресняков, И. А. Бойко, С. М. Волков // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (7Е). – С. 27–32. – Режим доступа: http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/1_7e_2011/article/11GAGBHP.pdf.
6. Производство на ЗАО «НКМЗ» наплавленных изделий с применением порошковых проволок [Электронный ресурс] / С. Г. Красильников, К. П. Шаповалов, Ю. В. Окунев, В. А. Пантелеймонов, Л. Н. Орлов, А. А. Голякевич // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (4Е). – С. 111–116. – Режим доступа: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VDDMA/2009_1/article/09KSGUSW.pdf.
7. Порошковые проволоки для наплавки валков горячей прокатки. Повышенная стойкость к разгару и шипообразованию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://veldtec.ua/ru/vhodnaja_stranica.html.
8. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1983. – 527 с.
9. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 167 с.
10. Боровиков В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с. : ил.