



## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

И. А. КОНДРАТЬЕВ, И. А. РЯБЦЕВ, кандидаты техн. наук, Я. П. ЧЕРНЯК, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы структура и свойства мартенситностареющих сталей, наплавленных порошковыми проволоками различных систем легирования. Установлен оптимальный состав наплавленного металла, который непосредственно после наплавки имеет твердость  $HRC\ 30$ , что позволяет без затруднения производить обработку резанием. После отпуска при  $480\ ^\circ C$ ,  $3\ ч$  твердость наплавленного металла возрастает до  $HRC\ 50$  и он приобретает высокую теплостойкость, что позволяет рекомендовать его для упрочнения рабочих поверхностей штампового инструмента сложной формы.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, наплавленный металл, мартенситностареющие стали, порошковая проволока, теплостойкость

По своим технологическим, механическим и эксплуатационным свойствам мартенситностареющие стали являются весьма перспективным материалом широкого назначения. Благодаря специфическому механизму упрочнения технология изготовления самых разнообразных изделий из этих сталей отличается относительной простотой и надежностью [1, 2].

Применение мартенситностареющих сталей в качестве наплавленного металла имеет ряд преимуществ перед металлом мартенситного класса: возможность наплавки без предварительного и сопутствующего подогревов; сравнительно невысокую исходную твердость, что позволяет производить механическую обработку наплавленных изделий резанием; получение высоких эксплуатационных свойств в результате отпуска после механической обработки.

Информация в технической литературе о мартенситностареющих сталях в основном касается низкоуглеродистой высоконикелевой стали, легированной молибденом и кобальтом. Высокопрочные стали на основе системы легирования  $Fe-Ni-Co-Mo$ , как правило, классифицируются по пределу прочности [1]. Эти стали отличаются достаточно высокой твердостью и прочностью. Например, стали, содержащие около  $15\ мас.\ %\ Co$  и  $10\ мас.\ %\ Mo$ , после старения имеют твердость  $HRC\ 60$ . Область применения таких сталей — судостроение, ракетная, авиационная и криогенная техника.

Для наплавки подобных сталей ( $H8M11K10CT$ ,  $H12M8K8C2T$  и др.) под слоем флюса разработано несколько марок порошковых проволок [3, 4]. Однако очень высокая стоимость и дефицитность легирующих элементов ограничивает возможности широкого применения подобных материалов в целях упрочнения различных деталей и инструментов. Необходимо учитывать также, что высокая степень легирования высокопрочных мартенситно-

стареющих сталей (суммарное содержание легирующих элементов в них, как правило, должно составлять не менее  $30...35\ \%$ ) практически не позволяет изготовить порошковую проволоку, особенно самозащитную, обеспечивающую получение наплавленного металла такого класса.

В связи с изложенным, внимание заслуживают экономнолегированные конструкционные или инструментальные мартенситностареющие стали [4, 2]. Последние могут использоваться, в частности, для наплавки штампового инструмента, работающего в контакте с горячим металлом.

Высокая прочность мартенситностареющих сталей указанной группы является суммарным результатом реализации в основном двух процессов упрочнения — образования твердого раствора замещения и сдвигового (мартенситного) механизма  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения.

В случае применения сталей указанного типа в качестве наплавочных материалов для восстановления штампового инструмента они должны иметь высокую теплостойкость и термостойкость. Для обеспечения этих свойств в их состав должны входить никель, молибден, титан, алюминий и другие легирующие элементы, благодаря которым обеспечивается снижение температуры  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, а также образование мартенсита замещения и упрочняющих фаз. Кроме того, введение массовой доли молибдена ( $0,5...2,5\ \%$ ) в сталь существенно повышает ее пластичность и вязкость. При незначительной добавке кремния в никелевую сталь уменьшается растворимость молибдена и титана, что увеличивает эффект дисперсионного твердения [2].

Следует отметить, что для снижения температуры начала мартенситного превращения и упрочнения мартенсита после закалки целесообразно использовать углерод, содержание которого в таких сталях может составлять  $0,06...0,10\ мас.\ \%$ . Возможность повышения содержания углерода в стали до  $0,10\ мас.\ \%$  важна при создании порошковых наплавочных проволок, для производства которых используют холоднокатаную ленту из стали  $08кп$  и углеродсодержащие ферросплавы.



Таблица 1. Химический состав наплавленного металла

№ порошковой проволоки	Марка проволоки	Массовая доля элементов, %						HRC	
		C	Ni	Mn	Mo+Ti+W	Si+Al+Cu	Прочие	После наплавки	После отпуска
1	ПП-Нп-ОП1	0,10	11,0	—	3,4	2,8	4,8 Cr; 0,2 V	28...31	43...45
2	ПП-Нп-ОП2	0,05	8,9	2,3	2,3	1,1	5,0 Cr	29...31	40...41
3	ПП-Нп-ОП3	0,06	5,2	0,7	3,2	1,7	3,9 Cr; 0,8 Nb	38...39	46...48
4	ПП-Нп-ОП4	0,10	—	5,1	4,6	4,1	—	32...34	52...53
5	ПП-Нп-ОП5	0,07	—	5,1	3,7	2,0	—	20...22	34...35
6	ПП-Нп-ОП6	0,11	—	5,5	4,2	3,4	—	25...26	34...35
7	ПП-Нп-ОП7	0,07	2,3	5,2	4,0	4,6	—	39...40	44...45
8	ПП-Нп-ОП8	0,07	7,5	5,2	2,3	2,4	—	32...34	52...53
9	ПП-Нп-ОП9	0,08	8,0	5,5	2,4	1,5	—	29...30	49...50
10	ПП-Нп-ОП10	0,07	8,5	5,8	2,5	0,7	—	25...26	46...47
11	ПП-Нп-ОП11	0,08	3,9	4,1	4,2	4,5	—	34...35	48...49

Примечание. Температура старения 480... 500 °С, выдержка 3 ч.

Для выбора оптимального состава наплавленного металла изготовлено 11 опытных самозащитных порошковых проволок диаметром 2 мм, обеспечивающих получение металла типа мартенситностареющих сталей различных систем легирования. Наплавку без предварительного подогрева всеми порошковыми проволоками производили на режиме:  $I_n = 240... 260$  А;  $U_d = 22... 24$  В. Химический состав наплавленного металла (в четвертом слое) и его твердость после наплавки и отпуска представлены в табл. 1.

По составу опытные порошковые проволоки можно разделить на несколько групп (табл. 1). В шихте порошковых проволок первой группы (№ 1–3) в качестве основных легирующих элементов использовали никель, хром и молибден; в шихте второй группы (№ 4–6) хром отсутствовал, а никель был полностью заменен марганцем; в третьей группе (№ 7–11) хрома также не было, а никель частично заменялся марганцем.

В процессе наплавки установлено, что все исследуемые порошковые проволоки отличались необходимыми сварочно-технологическими свойствами: качественным формированием наплавленного металла и хорошей отделимостью шлаковой корки (газошлакообразующая система проволок —  $CaCO_3-TiO_2-CaF_2$ ). Однако при многослойной наплавке на жесткий массивный образец установлено, что в безникелевом наплавленном металле (порошковая проволока № 6) и наплавленном ме-

талле с 2 мас. % Ni (порошковая проволока № 7) образуются мелкие трещины. В металле, наплавленном с использованием порошковых проволок остальных групп, появление дефектов не обнаружено.

При выборе оптимального состава наплавленного металла исходили из следующего условия: твердость металла после наплавки не должна превышать HRC 30, а после старения должна быть на уровне HRC 50. Этим требованиям в наибольшей мере отвечает никельмарганцевый наплавленный металл (порошковые проволоки № 8, 9), дополнительно легированный кремнием, который несколько усиливает эффект дисперсионного твердения [2]. По степени легирования он более экономичен, чем известные мартенситностареющие стали, содержащие 12... 18 мас. % Ni и до 10 мас. % молибдена, кобальта, вольфрама и других легирующих элементов [1, 2].

Из этих двух составов наплавленного металла (порошковые проволоки № 8 и 9) предпочтение следует отдать второму, имеющему после наплавки твердость HRC 30, что позволяет без затруднений проводить обработку резанием. После отпуска твердость наплавленного металла возрастает до HRC 50. Исходя из этого указанный тип металла был принят за основу при разработке самозащитной порошковой проволоки и технологии наплавки слоя экономнолегированной мартенситностареющей стали.

Для выбора оптимальной термической обработки металла, наплавленного порошковой проволо-

Таблица 2. Зависимость твердости металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-ОП9, от температуры и времени отпуска

Отпуск		HRC	
Температура, °С	Время, ч	После наплавки	После отпуска
400	3	29...30	48...49
400	5	29...30	48...49
500	3	29...30	49...50
500	5	29...30	46...47
600	3	29...30	30...31
600	5	29...30	28...29

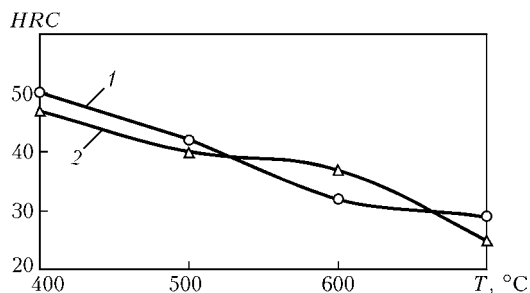


Рис. 1. Теплостойкость металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-ОП9 (1), и штамповой стали 5ХНМ (2)

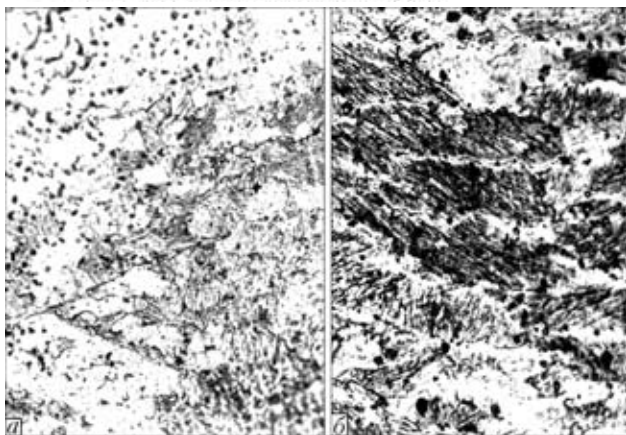


Рис. 2. Микроструктура металла, полученного с использованием проволоки ПП-Нп-ОП9, после наплавки (а, X320) и отпуска (б, X500) при 480 °С, 3 ч

кой марки ПП-Нп-ОП9, исследована зависимость его твердости от температуры и продолжительности отпуска. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Оптимальным режимом отпуска металла, наплавленного проволокой ПП-Нп-ОП9, следует считать нагрев до 480...500 °С и выдержка 3 ч.

Была исследована теплостойкость (стойкость против отпуска) металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-ОП9, которую в основном предполагается использовать для восстановления и упрочнения инструментов для горячего деформирования металла. Обычно теплостойкость характеризуется температурой отпуска, при которой металл сохраняет твердость на уровне HRC 40. Результаты испытаний приведены на рис. 1. По этому показателю наплавленный металл предлагаемого состава не уступает известной штамповой стали 5ХНМ [5].

Были проведены опыты по определению влияния технологии наплавки на исходную твердость металла, наплавленного проволокой ПП-Нп-ОП9, а также на эффект старения. Установлено, что предварительный подогрев (200...400 °С) наплавляемой детали не сказывается на исходной твердости наплавленного слоя и его твердости после отпуска.

Не оказывают влияния также на твердость металла, наплавленного проволокой ПП-Нп-ОП9, способ наплавки (открытая дуга или под флюсом) и скорость охлаждения после наплавки — замедленное (термостат, печь) или на открытом воздухе. Отмечено незначительное (на 2...3 единицы по шкале Роквелла) повышение исходной твердости металла, полученного при наплавке с остыванием до 20 °С каждого предыдущего наплавленного слоя перед нанесением следующего. При этом твердость после отпуска остается на прежнем уровне — HRC 50.

Structure and properties of maraging steels deposited with flux-cored wires of different alloying systems have been studied. Optimal composition of deposited metal has been determined. In the as-deposited condition this metal has hardness of HRC 30, which makes it easy to cut, whereas after tempering at 480 °C for 3 h its hardness grows to HRC 50. The deposited metal after tempering has good high-temperature strength, which allows it to be recommended for hardening of working surfaces of intricate die tools.

Таблица 3. Химический состав структурных составляющих металла, наплавленного проволокой ПП-Нп-ОП9

Место анализа	Массовая доля элементов, %						
	Fe	Ni	Mn	Si	Al	Mo	Ti
Матрица	84,92	7,21	4,35	1,29	0,79	0,70	0,78
Включение	63,15	5,09	2,87	0,80	0,65	0,68	26,75

Металлографические исследования показали, что после наплавки структура металла, наплавленного проволокой ПП-Нп-ОП9, состоит из аустенита, феррита и незначительной объемной доли мартенсита (рис. 2, а). После отпуска при температуре 480 °С, 3 ч структура наплавленного металла этого типа представляет собой мелорельефный пластинчатый мартенсит с включениями мелкодисперсных карбидов (рис. 2, б).

На микрорентгеноспектральном анализаторе Camebax SX50 исследовали состав матрицы и дисперсных включений в металле, наплавленном проволокой ПП-Нп-ОП9 (табл. 3), а также распределение в нем основных легирующих элементов.

Включения представляют собой сложные карбиды, размер которых составляет от 2 до 5 мкм. Что касается распределения легирующих элементов в наплавленном металле, то в нем наиболее равномерно в матрице распределен алюминий, а титан в основном входит в состав карбидов.

Исследования эффекта старения в процессе отпуска наплавленного металла типа мартенситностареющих сталей различных систем легирования позволили определить оптимальный состав самозащитной порошковой проволоки ПП-Нп-ОП9. Причем, как было установлено, твердость металла, наплавленного этой проволокой, не зависит от способа и температурного цикла наплавки. Наплавленный металл этого типа обладает также достаточно высокой теплостойкостью, что позволяет рекомендовать его для упрочнения рабочих поверхностей штампового инструмента сложной формы.

1. Перкас М. Д., Кардомский В. М. Высокопрочные мартенситностареющие стали. — М.: Металлургия, 1971. — 224 с.
2. Бирман С. Р. Экономнолегированные мартенситностареющие стали. — М.: Металлургия, 1974. — 207 с.
3. Бармин Л. Н., Королев Н. В., Прякин А. В. Свойства мартенситностареющих сплавов для наплавки инструмента горячего и холодного деформирования металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 57–61.
4. Кальянов В. Н., Багров В. А. Мартенситностареющие стали для наплавки штампов // Свароч. пр-во. — 2003. — № 2. — С. 35–37.
5. Позняк Л. А. Инструментальные стали. — Киев: Наук. думка, 1996. — 488 с.

Поступила в редакцию 09.02.2004