

## ВЛИЯНИЕ МАРГАНЦА НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

**В. Л. МАЛИНОВ**, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Представлены результаты исследований структуры и износостойкости наплавленного порошковыми лентами металла, имеющего химический состав типа низкоуглеродистых сталей с различным содержанием марганца. Исследована возможность повышения износостойкости наплавленного металла за счет последующих термической и химико-термической обработок. Показано, что при достижении оптимального количества метастабильного аустенита в структуре повышается износостойкость наплавленного металла.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, порошковые ленты, наплавленный металл, структура, мартенсит, аустенит, бейнит, упрочнение, отпуск, цементация

Особенности применения в промышленности материалов, обеспечивающих получение в наплавленном металле метастабильного аустенита и характеризующегося динамическим деформационным мартенситным превращением (ДДМП), описаны в работе [1]. Там же отмечено, что их разработке в настоящее время уделяется недостаточно внимания. Известные аустенитные наплавочные материалы типа стали 110Г13Л, содержащие повышенное количество марганца и углерода, а также хромомарганцевые типа ПП-Нп-25Х10Г10Т, недостаточно технологичны, поскольку наплавленный ими металл трудно обрабатывается резанием [2]. В ряде случаев в таких материалах используются дорогие легирующие элементы. Поэтому по-прежнему актуальной является задача создания более экономнолегированных наплавочных материалов, что может быть достигнуто путем получения в наплавленном металле не аустенитной, а многофазной структуры, в которой аустенит присутствует наряду с другими составляющими (мартенситом, карбидами, карбонитридами и др.). При этом важно иметь метастабильную самоансамблирующуюся при нагружении структуру, в которой протекают различные структурные и фазовые превращения, вызывающие не только упрочнение, но и релаксацию микронапряжений. В частности, такой структурой может быть метастабильный аустенит, претерпевающий ДДМП [3, 4]. Наряду с ними могут реализоваться динамические процессы двойникования, старения, изменения плотности дислокаций, диспергирования структуры и др.

Применительно к деталям, подвергающимся механическому изнашиванию (различные направляющие, валы, ролики, втулки, крановые колеса

и др.), перспективны наплавочные материалы, обеспечивающие получение низкоуглеродистого наплавленного металла на Fe–Mn–C основе мартенситного, мартенситно-аустенитного и аустенитно-мартенситного классов, а также повышение свойств наплавленного металла в результате термической и химико-термической обработок.

Из шихты, в состав которой вводили различное количество марганца металлического и железного порошка, а также небольшое количество ферротитана для измельчения зерна в структуре наплавленного металла, изготавливали однозамковые порошковые ленты размером 10×3 мм с коэффициентом заполнения 48...50 %. В качестве стальной оболочки использовали холоднокатаную ленту из стали 08кп. Наплавку проводили в три слоя под флюсом АН-26 на пластину толщиной 30 мм из стали ВСтЗсп на следующем режиме: сила тока 450...500 А, напряжение 30...32 В, скорость наплавки 25 м/ч, без предварительного подогрева. Последующие наплавочные валики выполняли после остывания до температуры не выше 250 °С.

Отпуск образцов, вырезанных из наплавленного металла, проводили при температурах 450, 550, 650 и 750 °С с выдержкой 1 ч и последующим охлаждением на воздухе. Осуществляли также цементацию образцов в твердом карбюризаторе при температуре 950 °С в течение 10 ч. После этого часть образцов подвергали отпуску при 650 °С. Химический состав металла, наплавленного опытными порошковыми лентами, приведен в табл. 1 ( $S, P \leq 0,03 \%$ ).

Проводили дуromетрические и металлографические исследования. Фазовый состав изучали рентгеновским методом с использованием дифрактометра «ДРОН-4».

Микроструктура наплавленного металла, содержащего 5 и 8 % Mn (без термической обработки), является мартенситной (рис. 1, а). Присутствие феррита в структуре наплавленного ме-

**Таблица 1. Химический состав и свойства наплавленного металла**

Содержание легирующих элементов, мас. %				Твердость <i>HRC</i>	Наличие трещин
C	Mn	Si	Ti		
0,15	5,1	0,71	0,09	36	Нет
0,16	8,2	0,63	0,11	42	»
0,14	10,0	0,67	0,11	47	Да
0,15	12,2	0,61	0,08	45	»
0,16	14,1	0,68	0,12	34	Нет

талла не обнаружено, что согласуется с данными работы [5], где указано, что в Fe–Mn сталях, содержащих более 5 % Mn, бездиффузионное мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение наблюдается при обычных скоростях охлаждения на воздухе. При этом область  $\alpha$ -мартенсита распространяется до 8 % Mn, а увеличение содержания марганца приводит к снижению температурных интервалов  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращений. Наиболее высокая твердость наплавленного металла наблюдается при 10 и 12 % Mn, что обусловлено большим упрочнением  $\alpha$ -мартенсита по сравнению с содержанием 5 % Mn. При увеличении содержания марганца до 14 % в структуре наплавленного металла наряду с  $\alpha$ -мартенситом появляется  $\epsilon$ -мартенсит (около

20 %) и аустенит (около 50 %) (рис. 1, б), имеющие значительно меньшую твердость, что снижает твердость наплавленного металла.

При содержании марганца 5, 8 и 14 % трещины в наплавленном металле отсутствовали. Появление трещин в наплавленном металле, содержащем 10...12 % Mn, можно объяснить наиболее сильным упрочнением  $\alpha$ -мартенсита при очень низком уровне пластических свойств. Это обусловлено сильной локализацией связи между атомами кристаллической решетки железа из-за перераспределения внешних электронов от атомов железа к атомам марганца [6]. Отсутствие трещин при увеличении содержания марганца до 14 % объясняется снижением степени упрочнения наплавленного металла и повышением его пластичности вследствие образования в структуре повышенного количества аустенита. Для дальнейших исследований из-за низкой трещиностойкости наплавленный металл, содержащий 10...12 % Mn, не использовали.

Разрабатываемые порошковые ленты предназначены для восстановления и упрочнения деталей, подвергающихся изнашиванию при трении металла по металлу, вместо широко применяемых наплавочных материалов, обеспечивающих получение наплавленного металла типа низколегированных сталей, например, Нп-30ХГСА и ПП-Нп-18Х1Г1М, и в ряде случаев типа хромомарганцевых аустенитных сталей, например, ПП-Нп-14Х12Г12СТ.

Износостойкость деталей обычно оценивают по результатам испытаний, имитирующих взаимодействие в условиях трения–скольжения и трения–качения.

Испытания в условиях трения–скольжения осуществляли по схеме колодка–ролик при сухом трении (износостойкость  $\epsilon_1$ ). Скорость вращения ролика диаметром 70 мм из стали 55 с твердостью *HRC* 56 составляла 200 об/мин. Прижатие плоского образца осуществляли грузом 8 кг.

В ходе предварительного этапа исследований провели сравнительные испытания на износостойкость наплавленного металла различных структурных классов в условиях трения–качения по схеме ролик–ролик (давление 320 МПа, скорость вращения роликов 0,98 м/с, проскальзывание 0,09 м/с) и при динамическом воздействии потока дроби с различными углами атаки. Для второго вида испытаний изготовление образцов является существенно менее трудо- и материалоемким. При этом воздействие на поверхность плоского образца осуществляли дробью, транспортируемой потоком сжатого воздуха, при давлении в системе 5 атм. Диаметр сопла на выходе струи из смесителя составлял 16 мм. Длительность испытания образцов определяли расходом 20 кг дроби.

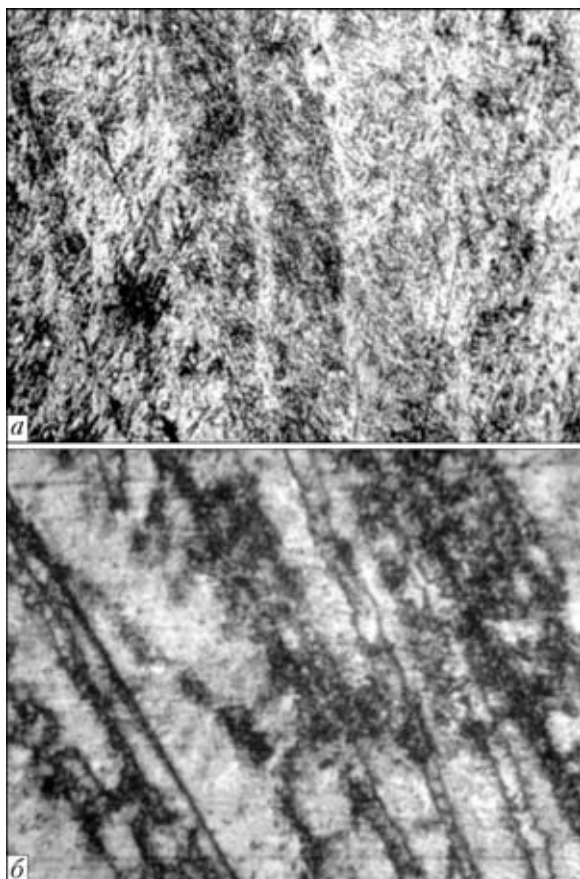


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 500$ ) наплавленного металла с содержанием марганца 5 (а) и 14 % (б)

При испытаниях в условиях трения-качения и при воздействии потока дробы происходит усталостное разрушение поверхностных объемов металла при повторяющемся силовом воздействии. Изменение угла атаки дробы позволяет варьировать условия разрушения. В ходе исследований близкие значения были получены при испытаниях по схеме ролик–ролик и при воздействии потока дробы с углом атаки 60°. Последнюю схему изнашивания использовали в дальнейших исследованиях ( $\epsilon_2$ ). Результаты при испытаниях по схемам ролик–ролик и в потоке дробы выборочно перепроверяли на отдельных образцах наплавленного металла. Значения износостойкости при испытаниях по указанным схемам во всех случаях близки.

В качестве эталона сравнения при определении относительной износостойкости использовали металл, наплавленный широко применяемой порошковой проволокой ПП-18Х1Г1М, отпущенный при 600 °С на твердость *HВ* 280.

Данные результатов исследования износостойкости наплавленного металла, содержащего 5, 8 и 14 % Mn, без термической обработки и после отпуска при различных температурах, представлены на рис. 2.

При сухом трении обнаруживается корреляция износостойкости наплавленного металла с его твердостью. Напротив, при испытаниях в потоке дробы наибольшую износостойкость имеет наплавленный металл с 14 % Mn с наименьшей твердостью, что обусловлено, согласно данным рентгеновского анализа, превращением остаточного аустенита в мартенсит при изнашивании. При сухом трении это превращение не получает заметного развития, по-видимому, из-за нагрева поверхности выше температуры мартенситного превращения [4].

По мере повышения температуры отпуска от 450 °С до  $A_{c1}$  износостойкость и твердость наплавленного металла, содержащего 5 и 8 % Mn, снижается из-за разупрочнения мартенсита. Наиболее высокая износостойкость такого наплавленного металла при различных видах изнашивания достигается нагревом в межкритическом интервале температур (МКИТ —  $A_{c1} < t < A_{c3}$ ).

Для наплавленного металла с 5% Mn эта температура соответствует 750, а с 8 % Mn — 650 °С. В МКИТ происходит перераспределение углерода и марганца между  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазами и обогащение ими последней. В результате в наплавленном металле наряду с мартенситом и небольшим количеством карбидов образуется аустенит — 9 и 18 % соответственно при 5 и 8 % Mn, который метастабилен и полностью превращается в мартенсит при нагружении. На рис. 3, а, б приведены данные

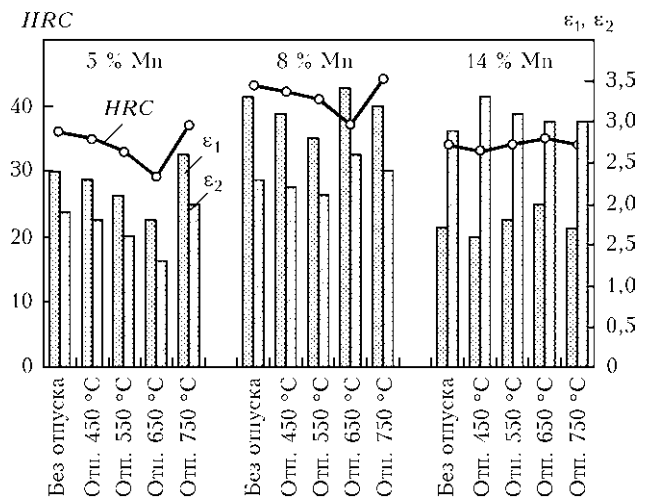


Рис. 2. Твердость, относительная износостойкость при сухом трении  $\epsilon_1$  и при испытаниях в потоке дробы  $\epsilon_2$  наплавленного металла без термической обработки и после отпуска

для наплавленного металла с 8 % Mn. Кроме того, после нагрева и выдержки в МКИТ при охлаждении до комнатной температуры часть аустенита повторно превращается в мартенсит, имеющий вследствие повышенного содержания в нем углерода и марганца более высокую твердость. Это, наряду с метастабильным аустенитом, и обуславливает повышение износостойкости.

Нагрев наплавленного металла, содержащего 14 % Mn, в температурном интервале 450...750 °С влияет на износостойкость неоднозначно. В том случае, когда происходит стабилизация аустенита по отношению к ДДМП (отпуск при 450 °С), наблюдается снижение износостойкости при сухом трении и ее увеличение при испытании в потоке дробы. При дестабилизации аустенита из-за выделения карбидов (отпуск при 550 и особенно при 650 °С), напротив, наблюдается повышение износостойкости при сухом трении и ее снижение при испытании в потоке дробы. Изменение фазового состава наплавленного металла подтверждается дифрактограммами, приведенными на рис. 3, в, г. До изнашивания в структуре преобладает аустенит, а после изнашивания — мартенсит,  $\epsilon$ -фаза отсутствует. После отпуска при 750 °С структура и износостойкость близки к исходному состоянию после наплавки.

Известно, что повышение содержания углерода в сталях увеличивает их износостойкость. Однако при получении высокоуглеродистого наплавленного металла его механическая обработка затруднительна и часто образуются трещины. Эффективным технологическим приемом является наплавка низкоуглеродистыми сталями с их последующей цементацией [7]. Данные о влиянии цементации и отпуска при 650 °С на структуру и свойства наплавленного металла с различным содержанием марганца представлены в табл. 2.

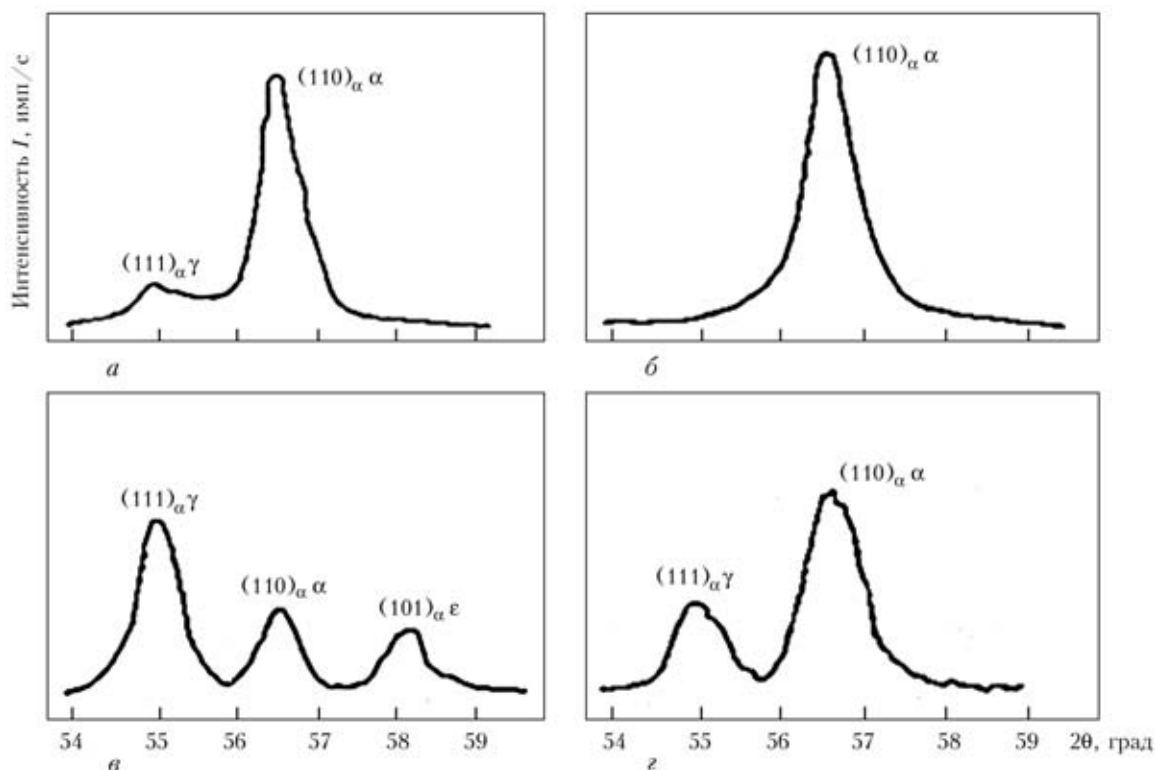


Рис. 3. Дифрактограммы наплавленного металла, содержащего 8 (а, б) и 14 % Mn (в, г) после отпуска при 650 °С до износа в потоке дробы (а, в) и после (б, г)

Наиболее высокую износостойкость после цементации в условиях сухого трения имеет наплавленный металл, содержащий 5 % Mn. При этом в структуре наряду с мартенситом и карбидами имеется 35...40 % метастабильного аустенита. При увеличении содержания марганца до 8 и 14 % износостойкость наплавленного металла при сухом трении снижается из-за увеличения количества аустенита в его структуре.

Отпуск при 650 °С наплавленного металла с 5 % Mn приводит к уменьшению износостойкости при сухом трении из-за разупрочнения мартенсита и распада остаточного аустенита. Напротив, износостойкость в условиях сухого трения наплавленного металла, содержащего 8 и 14 % Mn, после отпуска при 650 °С повышается вслед-

ствие активизации ДДМП в результате выделения карбидов из аустенита.

При испытании в потоке дробы наиболее высокая износостойкость получена после цементации наплавленного металла, содержащего 8 % Mn, имеющего в структуре 75...80 % остаточного аустенита.

Установлено, что отпуск по-разному влияет на износостойкость наплавленного металла в зависимости от содержания марганца при испытании в потоке дробы. При содержании 5 и 8 % Mn, после отпуска при 650 °С она снижается, а при содержании 14 % Mn повышается. Это объясняется следующим. Отпуск при 650 °С сопровождается разупрочнением мартенсита и чрезмерной активизацией ДДМП при содержании 5 и 8 % Mn, когда стабильность аустенита мала, а это в свою очередь приводит к сни-

Таблица 2. Свойства наплавленного металла после цементации и последующего отпуска

Содержание Mn, %	Обработка	Фазовый состав*	Твердость HRC	Износостойкость	
				$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
5	Цементация	35...40 % A + (M + K)	48	7,2	3,7
	То же + отпуск при 650 °С	20...25 % A + (M <sub>отп</sub> + M + K)	36	5,5	2,9
8	Цементация	75...80 % A + (M + K)	39	6,4	5,8
	То же + отпуск при 650 °С	50...55 % A + (M <sub>отп</sub> + M + K)	41	6,9	5,3
14	Цементация	95...97 % (A + K)	26	3,7	4,1
	То же + отпуск при 650 °С	85...90 % A + (M + K)	35	4,8	4,6

\* A — аустенит; K — карбиды; M — мартенсит; M<sub>отп</sub> — отпущенный мартенсит.

жению износостойкости. При содержании марганца 14%, когда она повышена, активизация ДДМП напротив увеличивает износостойкость.

Предложенный способ повышения износостойкости путем цементации низкоуглеродистого наплавленного металла, легированного марганцем, во всех случаях предусматривает получение в структуре остаточного метастабильного аустенита наряду с мартенситом и карбидами. Это является отличительным признаком, поскольку традиционно после цементации и последующей термообработки стремятся получить мартенситно-карбидную структуру, а остаточный аустенит рассматривается как нежелательная структурная составляющая, снижающая твердость и износостойкость. При этом важно учитывать, что наиболее высокая износостойкость достигается при оптимальной стабильности аустенита по отношению ДДМП для конкретного вида нагружения или испытания.

Высокая устойчивость переохлажденного аустенита наплавленного металла, содержащего не более 5 % Mn, по отношению к образованию ферритно-цементитной смеси позволяет отказаться от использования специальных закалочных сред, поскольку в процессе охлаждения на воздухе происходит самозакалка. Ценным при этом является отсутствие трещин, повышение износостойкости, упрощение технологии, экономичность и экологичность технологического процесса.

## Выводы

1. Показана перспективность создания экономнолегированных низкоуглеродистых марганецсодержащих наплавочных материалов, обеспечивающих получение в наплавленном металле мартенситной или мартенситно-аустенитной структуры.

The paper gives the results of investigation of structure and wear resistance of metal deposited with flux-cored strips, ensuring production of low-carbon steels with different manganese content in the deposited layer. Possibility of improvement of deposited metal wear resistance at the expense of postweld heat and chemico-thermal treatment is studied. It is shown that achievement of optimum quantity of metastable austenite in the structure leads to an increase of deposited metal wear resistance.

2. Высокий отпуск, проводимый для снятия напряжений в наплавленном металле с мартенситной структурой, должен обеспечить получение определенного количества метастабильного аустенита, превращающегося при изнашивании в мартенсит. Для этого температура нагрева и выдержки наплавленных деталей должна обеспечивать попадание в МКИТ.

В случае преимущественно аустенитной структуры наплавленного металла отпуск должен регулировать стабильность аустенита по отношению к деформационному мартенситному превращению с учетом условий нагружения.

3. Для повышения износостойкости наплавленного металла типа низкоуглеродистой стали, содержащей не более 5 % Mn, предложено производить его цементацию.

1. *Малинов В. Л.* Экономнолегированные электродные материалы, обеспечивающие в наплавленном металле деформационное упрочнение при эксплуатации // Автомат. сварка. — 2006. — № 8. — С. 29–32.
2. *Опыт совместных работ ОАО «Запорожсталь» и ОП «Реммаш» в разработке и внедрении новых наплавочных материалов / В. В. Тарасенко, Г. В. Хоменко, В. И. Титаренко, А. В. Титаренко // Сб. тр. 2-й Науч.-практ. конф. «Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей».* — Днепропетровск, 2006. — С. 39–43.
3. *Богачев И. Н., Миц Р. И.* Кавитационные разрушения и кавитационностойкие сплавы. — М.: Металлургия, 1972. — 179 с.
4. *Малинов Л. С., Малинов В. Л.* Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии. — Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2007. — 352 с.
5. *Богачев И. Н., Еголаев В. Ф.* Структура и свойства железомарганцевых сплавов. — М.: Металлургия, 1973. — 295 с.
6. *Литвинов В. С.* Структура и стабильность фаз высокой контактной стойкости: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1979. — 40 с.
7. *Пат. 63462 Україна, МКІ С21 Д1/2.* Спосіб зміцнення / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов. — Заявл. 22.04.2003; Опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1.

Поступила в редакцию 13.06.2011