

IV МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 669.017:539:621.78.011

Канд. техн. наук Я. А. Чейлях¹, д-р техн. наук А. П. Чейлях²

¹ ПАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича»,

² ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»;
г. Мариуполь

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАСТАБИЛЬНОГО Fe-Cr-Mn МЕТАЛЛА

Предложено моделирование формирования химического, фазового составов и структуры наплавленного Fe-Cr-Mn износостойкого металла с оценкой его метастабильности в зависимости от наплавочно-технологических параметров наплавки. Установлен послойно-ступенчатый механизм формирования химического и фазового составов наплавленного металла, регулируемый степенью проплавления слоев, обеспечивая дифференцированную метастабильность аустенита.

Ключевые слова: наплавленный металл, степень проплавления, моделирование, аустенит, мартенсит, метастабильность.

Введение

Создание эффективных механизмов научно обоснованного проектирования составов порошковых наплавочных материалов и управления формированием наплавленного металла (НМ) и его эксплуатационными свойствами является актуальной научной и практической задачей [1, 2]. Ее решение применительно к метастабильно-аустенитному износостойкому металлу усложняется особенностями трансформации полученной при наплавке структуры в процессе изнашивания, что существенно влияет на эксплуатационные свойства [3–5].

При многослойной наплавке установлено [6], что химический состав формирующихся слоев существенно зависит от доли основного металла в наплавленном. Однако данные о послойном распределении химических элементов, фазового состава и структуры НМ в литературе отсутствуют, адекватной физико-математической модели его формирования пока нет. Следует особо подчеркнуть, что от этих химических и фазово-структурных факторов, в свою очередь, существенно зависит количество и степень метастабильности аустенита в аустенитно-метастабильном НМ, что оказывает влияние на его механические и эксплуатационные свойства [4, 5].

Целью настоящей работы является создание адекватной модели формирования химического и фазового состава НМ с учетом наплавочно-технологических

параметров для управления свойствами через регулирование метастабильности структуры.

Материал и методика исследования и разработки модели

Для построения модели использовались результаты исследований НМ марок 20Х10Г8СТАФ, 12Х12Г9СТАФ, 12Х13Г12СТАФ и др., разработанные для электродуговой наплавки деформационно-метастабильного Fe-Cr-Mn металла [7]. Наплавка производилась разработанной порошковой проволокой ПП-Нп-12Х13Г12СТАФ диаметром 4,0 мм на сварочном автомате А1401 с источником питания ВДУ 1200 под флюсом АН-348 на подложку из стали Ст. 3 и стали 45 при следующих режимах – сварочный ток 320...500 А, напряжение дуги 28...32 В, скорость наплавки составляла $V_{напл.} = 18...38$ м/ч, количество слоев от 3 до 6.

Послойный анализ химического состава производился на вакуумных квантометрах «Spectrovac 1000» и «SpectroMAXx» спектральным методом (с шагом 1 мм), а также на металлографических шлифах микрорентгеноспектральным методом на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе «Ultra 55» с шагом 0,2 мм. Фазовый анализ НМ производился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в железном K_{α} -излучении, в интервале углов 2θ 54...58 град. Макроскопический анализ проводился на поперечных и продольных макрошлифах наплавленного металла с глубоким трав-

лением смесью кислот (100 мл HCl, 10 мл HNO₃ и 100 мл H₂O). Изучение микроструктуры производили на поперечных и продольных шлифах с использованием микроскопов «Neophot-21» и «Nikon Eclips L150» снабженных цифровыми видеокамерами при увеличениях от 50 до 1000 крат. За основу построения модели взята методика оценки содержания химических элементов в наплавленном слое от величины доли основного металла в наплавленном, приведенная в работе [6] и модель влияния легирующих элементов (Cr, Mn, Si) и углерода на мартенситные критические точки M_n и M_k и фазовый состав Fe-Cr-Mn НМ [8].

Моделирование процесса послойного формирования НМ

Установлены следующие факторы, определяющие химический состав НМ:

- химический состав наплавочной порошковой проволоки, количество наплавленных слоев;
- степень проплавления металла основы и последующих слоев, определяемая долей участия основного металла и предыдущих слоев в наплавленном (N);
- степень перекрытия наплавляемых валиков;
- возможность дополнительного легирования металла из флюсующего материала, а также при последующих технологиях обработок.

В свою очередь химический состав получаемого метастабильного НМ через влияние легирующих элементов определяет положение критических точек (прежде всего т. M_n и т. M_k), формирование фазового состава (количество мартенсита закалки и метастабильного аустенита) и микроструктуры [8], поскольку при охлаждении НМ для выбранных диапазонов легирования реализуется мартенситное превращение. Полученный фазовый состав существенно влияет на степень деформационной метастабильности аустенитной составляющей структуры НМ, что в совокупности и определяет формирование эксплуатационных характеристик [4]. Это обусловлено тем, что в поверхностном слое НМ развивается деформационное мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение непосредственно в процессе изнашивания (ДМПИ), вызывающее сильное самоупрочнение, релаксацию микронапряжений, перераспределение и поглощение значительной части подводимой механической энергии [4, 5].

Степень проплавления количественно определяется долей участия основного металла и последующих слоев в наплавленном:

$$N = \frac{P_o}{P}, \quad (1)$$

где P_o – площадь проплавления, определяемая на поперечных макрошлифах; P – общая площадь наплавки, определяемая на поперечных макрошлифах.

N эффективно регулируется наплавочно-технологическими параметрами процесса наплавки: сила тока (I); напряжение дуги (U); скорости наплавки ($V_{напл.}$) и пода-

чи наплавочного материала при наплавке одинакового валика ($V_{пров.}$); диаметр проволоки (d), перекрытие валиков. С учетом содержания углерода, технологических легирующих элементов и заданного химического состава можно рассчитать примерное содержание элементов в каждом наплавленном слое с учетом степени проплавления и доли участия основного металла в наплавленном [6]:

$$C_9^{nm1} = C_9^o \cdot N + C_9^z \cdot (1 - N), \quad (2)$$

где C_9^o – содержание элемента в металле основы; C_9^z – заданное содержание элемента.

При многослойной наплавке химический состав определяется разбавлением предыдущего слоя и долей его участия в формировании каждого последующего слоя ($N_1, N_2, N_3, \dots, N_i$). Причем установлено, что любые сочетания долей участия основного металла в наплавленном, одинаковые по сумме ($N_1 + N_2 + N_3, \dots, N_i$) дают одинаковый химический состав итогового (верхнего) наплавленного слоя. Чем меньше степень проплавления каждого из слоев, тем быстрее достигается заданный химический состав НМ. На основании анализа формирования состава каждого из наплавленных слоев выведено уравнение расчета содержания элементов, в i -том наплавленном слое:

$$C_9^{nmi} = C_9^o \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot \dots \cdot N_i + C_9^z (1 - N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot \dots \cdot N_i). \quad (3)$$

Зависимость (3) может использоваться для расчета химического состава НМ при различающихся степенях проплавления каждого слоя, что часто и бывает на практике. При соблюдении одинаковых режимов и параметров наплавки каждого слоя, а, следовательно, и равной доли основного металла в наплавленном, зависимость (3) примет следующий вид:

$$C_9^{nmi} = C_9^o \cdot N^i + C_9^z (1 - N^i). \quad (4)$$

С учетом возможного окисления (угара) легирующих элементов (что может иметь место при наплавке открытой дугой), либо поступления легирующих элементов из флюса, выражения (3) и (4) должны быть дополнены слагаемыми $\pm \Delta C_9^\phi$, характеризующим вклад в химический состав НМ, аналогично данным работы [6]:

$$C_9^{nmi} = C_9^o \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot \dots \cdot N_i + C_9^z (1 - N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot \dots \cdot N_i) \pm \Delta C_9^\phi. \quad (5)$$

$$C_9^{nmi} = C_9^o \cdot N^i + C_9^z (1 - N^i) \pm \Delta C_9^\phi. \quad (6)$$

Из анализа полученных уравнений (3), (4), (5), (6) следует вывод: чем меньше степень проплавления и, соответственно доля участия основного металла в наплавленном (N), тем быстрее и при меньшем количе-

стве слоев, достигается заданный химический состав НМ. При различной доле участия основного металла в каждом из наплавленных слоев многослойной наплавки, результат вычисления содержания элементов определяется с учетом их произведения ($N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \dots N_i$).

По полученным расчетным результатам послойного химического состава построена модель формирования химического и фазового состава, на примере использования проволоки ПП-Нп-12Х13Г12СТАФ, которая в конечном итоге при многослойной наплавке дает аустенитно-метастабильный НМ.

Установлены следующие граничные условия разработки модели:

- в пределах каждого наплавленного слоя химический состав примерно одинаков в связи с хорошим перемешиванием расплава сварочной ванны;

- при переходе межслойной границы содержание легирующих элементов и углерода должно изменяться скачкообразно (в пределах узкой границы);

- толщина и состав каждого из наплавленных слоев регулируется технологическими параметрами, указанными выше ($I, V_{напл.}, V_{пров.}, d$).

Графическая интерпретация модели формирования химического и фазового состава НМ по слоям в общем виде приведена на рис. 1. После наплавки первого слоя на нелегированную сталь-основу (Ст. 3) содержание легирующих элементов в 1-м слое НМ резко увеличивается при переходе границы сплавления и на протяжении этого слоя средняя концентрация остается приблизительно одинаковой, что соответствует горизонтальному участку кривой распределения концентраций. Однако заданное содержание легирующих элементов обычно не достигается. После наплавки 2-го слоя вследствие проплавления 1-го слоя с определенной N в наплавленном (2-м слое) концентрация легирующих элементов резко увеличивается на границе сплавления, и приблизительно сохраняется постоянной по толщине этого (2-го) слоя (рис. 1, кривые 1, 2). Аналогично формируется химический состав 3-го слоя и последующих слоев.

Содержание углерода также ступенчато (каскадно) изменяется по слоям в сторону увеличения, или напротив, уменьшения (как это показано на рис. 1, кривые 5 и 6) в зависимости от его содержания в металле-основе по отношению к содержанию в порошковой проволоке. В 4...6 слоях концентрация элементов будет соответствовать заданному составу порошковой проволоки (даже при большой степени проплавления и доли основного металла в наплавленном), что и бывает обычно на практике.

Чем больше скорость наплавки и меньше сила сварочного тока в изученных пределах ($V_{напл.} = 18...38$ м/час, $I = 320...500$ А), тем меньше доля участия металла каждого предыдущего слоя в формировании последующего, тем уже зона межслойного сплавления и больше разница в концентрациях элементов между каскадами (горизонталями на концентрационных кривых послой-

ного анализа). Соответственно тогда в поверхностных третьем и четвертом слоях содержание элементов примерно будет соответствовать заданному составом порошковой проволоки.

Чем больше N , тем меньше высота ступенек увеличения (уменьшения, например для углерода) концентрации элементов в слоях, тем больше требуется наплавливать слоев для достижения заданного химического состава. И наоборот, чем меньше N , тем больше высота первой ступеньки и меньше высота остальных, тем меньше требуется наплавленных слоев для получения заданного химического состава.

Расчетные результаты формирующихся послойно марок Fe-Cr-Mn сталей и их качественный фазовый состав при трехслойной наплавке, например, проволокой ПП-Нп-12Х13Г12СТАФ приведены в таблице 1. Анализ построенной модели изменения химического и фазового состава НМ по слоям с различными N_1, N_2, N_3 и т. д. показывает следующее. При малой степени проплавления при формировании каждого слоя ($N_1, N_2, N_3 \leq 0,3$) заданный химический состав НМ проволокой ПП-Нп-12Х13Г12СТАФ достигается уже в третьем слое, который отвечает марке стали 12Х13Г12СТАФ аустенитного класса (с метастабильным аустенитом). При средних значениях степени проплавления ($N_1, N_2, N_3 \approx 0,5$) заданный химический состав НМ может быть получен только в 4-м или даже 5-м слоях. В третьем же слое он будет соответствовать марки 14Х12Г11СТАФ аустенитного класса с недолегированием по хрому ($\sim 1,5\%$), марганцу ($\sim 1,5\%$).

В случаях большой степени проплавления ($N_1, N_2, N_3 \approx 0,7$) состав третьего слоя будет соответствовать марке НМ 15Х9Г8СТАФ (с недостатком легирования по хрому и марганцу на $\approx 4\%$, по кремнию $\approx 0,6\%$, содержание ванадия и титана может быть на нижних пределах). В результате эта наплавленная сталь относится к мартенситно-аустенитному классу. Вероятно, при наплавке с одинаковой степенью проплавления ($N \approx 0,7$) получение заданного химического состава будет возможно лишь в 6...7 слоях.

При использовании других наплавочно-технологических параметров, обеспечивающих промежуточные степени проплавления ($0,3 < N_i < 0,7$) в различных вариациях по слоям дадут аналогичную послойно-ступенчатую картину изменения химического и фазового состава НМ с расположением ступенек в промежуточных областях рассмотренным выше (см. рис. 1).

Конечно, с большой долей уверенности можно утверждать, что в пределах любого наплавленного слоя состав по содержанию каждого из компонентов не может быть абсолютно одинаков по глубине зоны, как это представлено на модели (см. рис. 1). В силу некоторого возможного разброса концентраций элементов в порошковой проволоке и достаточно большой скорости наплавки ($V_n = 18...38$ м/час), не позволяющей абсолютно выровнять концентрации элементов, нужно допустить некоторые колебания значений концентраций ком-

Таблиця 1 – Расчетные результаты формирующихся послойно марок сталей и фазовый состав при трехслойной наплавке проволокой ПП-Нп-12Х13Г12САФ в зависимости от доли основного металла в наплавленном (N)

№ слоя	N для НМ номеров			Марка НМ	Фазовый состав
	№ 1	№ 2	№ 3		
1	0,3	-	-	14Х9Г8СТАФ	М+А
2	0,3	0,3	-	12Х11Г9СТАФ	А+М
3	0,3	0,3	0,3	12Х13Г12СТАФ	А
1	0,5	-	-	17Х7Г6СТАФ	М+А
2	0,5	0,5	-	14Х10Г9СТАФ	А+М
3	0,5	0,5	0,5	14Х12Г11СТАФ	А
1	0,7	-	-	19Х5Г4СТАФ	М
2	0,7	0,7	-	16Х7Г6СТАФ	М+А
3	0,7	0,7	0,7	15Х9Г8СТАФ	А+М

Примечание: М – мартенсит закалки; А – аустенит.

понентов в пределах каждого наплавленного слоя. Не исключено, что даже в пределах каждого слоя возможны ликвационные колебания и изменения концентраций компонентов в некоторых, очевидно, небольших пределах.

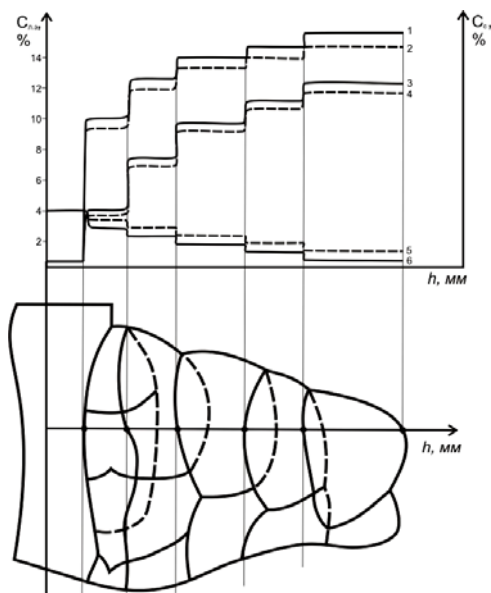


Рис. 1. Графическое представление модели распределения содержания легирующих элементов по слоям в наплавленном металле:

1, 2 – хром; 3, 4 – марганец; 5, 6 – углерод;
сплошные – $N \approx 0,3$; пунктирные – $N \approx 0,5$

Экспериментальное подтверждение адекватности разработанной модели реальным процессам формирования Fe-Cr-Mn наплавленного металла

Для подтверждения адекватности построенной модели реальным процессам формирования слоев НМ, проведена наплавка проволокой ПП-Нп-12Х13Г12СТАФ на подложку из Ст. 3 с разной степенью проплавления ($N = 0,3$ и $N \approx 0,6 \dots 0,7$). Таким образом, формирование валиков в этих двух вариантах было ориентировочно «в высоту» (при $N = 0,3$) и «в ширину»

(при $N = 0,7$). По аналогии с построенной моделью (см. рис. 1) на рисунке 2 приведены изменения содержания компонентов по вертикальному поперечному сечению (вертикально, снизу-вверх) по данным спектрального квантометрического анализа. Сравнение экспериментальных результатов с теоретической моделью показывает большую степень сходства. Также как и в модели, содержание элементов по толщине НМ изменяется послойно-ступенчато в соответствии с толщиной наплавленных слоев. В пределах каждого слоя наблюдается колебание концентрацией элементов в небольших пределах в силу некоторой ликвации, свойственной при использовании порошкового наплавочного материала [1, 2]. На полученных концентрационных зависимостях четко наблюдается протяженность каждого из наплавленных слоев. Сравнение состава НМ с разной долей участия основного металла в наплавленном ($N_{cp} \approx 0,29 \dots 0,31$ и $N_{cp} \approx 0,7 \dots 0,76$) обнаруживает отличия в содержании основных элементов (Cr, Mn, Si) по слоям. В наплавке, выполненной с небольшой степенью проплавления ($N_{cp} \approx 0,3$) конечный состав (третьего слоя) соответствует марке 20Х12Г9СТАФ с аустенитной метастабильной структурой. В наплавке, выполненной с достаточно большой $N_{cp} = 0,7 \dots 0,76$, состав третьего слоя соответствует марке 20Х10Г8СТАФ с меньшим содержанием легирующих элементов (~ 8 % Cr, ~ 6 % Mn, 0,6...0,8 % Si), и как результат – мартенситно-аустенитного класса. Для получения заданного химического состава (с ~13 % Cr, ~12 % Mn) в этом случае необходимо наплавлять не менее 4...5 слоев с теми же параметрами режимов наплавки.

Микрорентгеноспектральный анализ НМ, выполненный с использованием автоэмиссионного электронного микроскопа «Ultra-55», в целом подтверждает правильность и адекватность построенной модели распределения легирующих элементов по вертикальному сечению наплавки. Полученные зависимости распределения элементов в многослойных наплавках приведены на рис. 3, который в верхнем слое соответствует марке НМ 20Х12Г9СТАФ. Характер полученных зависимостей так же, как и в квантометрическом спектраль-

ном анализе – послойно-ступенчатый (если усреднить точки). Очевидно, каскады или горизонтальные полки ступеней по своей протяженности соответствуют толщине наплавленных слоев.

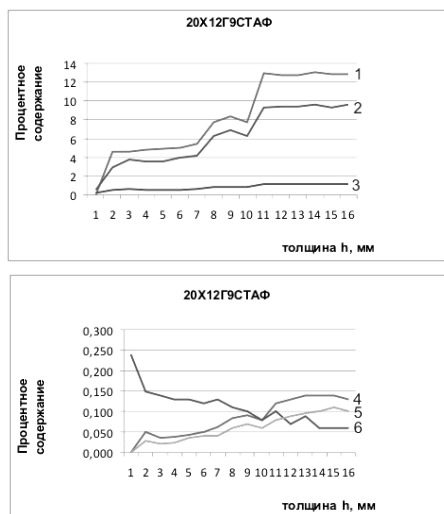


Рис. 2. Изменение содержания легирующих элементов по толщине металла 20X12Г9СТАФ, трехслойно наплавленно-го порошковой проволокой ПП-Нп-12X13Г12СТАФ (квантометр «СпектроМАХх»): 1 – Cr; 2 – Mn; 3 – Si; 4 – V; 5 – Ti; 6 – C

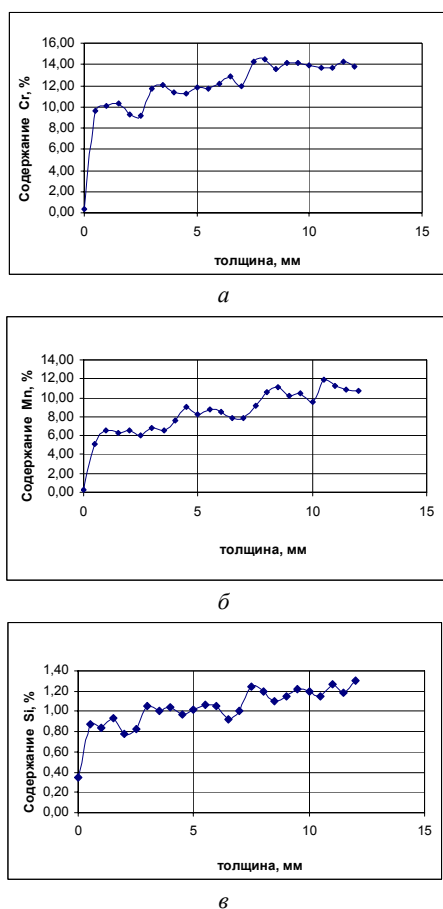


Рис. 3. Распределение легирующих элементов по толщине трехслойной наплавки стали 20X12Г9СТАФ: а – хром; б – марганец; в – кремний

Из анализа полученных экспериментальных зависимостей содержания элементов по толщине наплавленных слоев (см. рис. 2, 3) следует, как это уже отмечалось выше, что по химическому составу полученные слои соответствуют разным маркам Fe-Cr-Mn сталей. Эти различия в содержании основных элементов: Cr, Mn, Si, C определяют положение т. M_H , т. M_K и формирующийся при охлаждении фазовый состав НМ, в частности количество мартенсита закалки и остаточного аустенита. Дифференцированный, но закономерно изменяющийся химический состав каждого из слоев (в пределах: 0,1...0,2 %C, 8...13 % Cr; 6...13 %Mn; 0,8...1,4 %Si) обуславливает различные соотношения между аустенитом и мартенситом в достаточно широких пределах (от 0 до 100 % каждой из этих фаз). В первом слое обычно преобладает мартенсит закалки, в последнем – аустенит. От этого соотношения зависит степень метастабильности аустенита, кинетика развития ДМПИ [4] и, соответственно, формирование свойств.

Правильность полученных с помощью построенной модели формирования фазового состава и микроструктуры по слоям НМ подтверждает зависимость твердости по толщине многослойной наплавки, соответствующей марки 20X12Г9СТАФ в верхнем слое (рис. 4). В результате 3...4-й (поверхностные) слои имеют твердость HRA 64...65, соответствуют аустенитной метастабильной структуре, отвечающей этой марке. На глубине 7...8 мм от поверхности твердость возрастает до HRA 70...75, что объясняется меньшим содержанием хрома и соответствует аустенитно-мартенситной, а затем мартенситно-аустенитной структуре со значительной долей более твердой составляющей – мартенсита закалки. Это фазово-структурное состояние соответствует маркам стали 12X11Г9СТАФ и 14X9Г8СТАФ (см. табл. 1). Другой причиной более высокой твердости является образование мартенсита закалки в зоне термического влияния (ЗТВ), приходящейся на предыдущий наплавленный слой при наплавке последующего. Затем на большей глубине твердость резко снижается до HRA49...52, что соответствует переходу к основному металлу (Ст. 3) в ЗТВ.

Характер изменения твердости и фазового состава подтверждают результаты микроскопического анализа с помощью оптической и сканирующей электронной

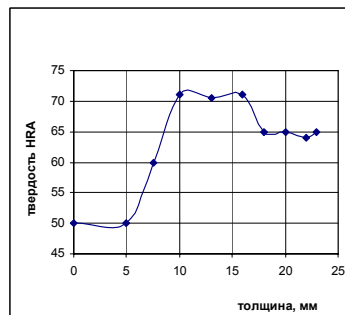


Рис. 4. Изменение твердости по толщине наплавленной стали 20X12Г9СТАФ

микроскопії. Так, для сталі 20X12Г9СТАФ, наплавленної с невисокою ступенню проплавлення ($N \approx 0,28 \dots 0,3$) в 3...4 шари поверхневий шар на більшу глибину має аустенитну метастабільну структуру, після котрої слідує аустенитно-мартенситна, далі мартенситно-аустенитна, за тем – переважно мартенситна с невеликим кількістю $A_{ост}$. При значительній ступені проплавлення ($N \approx 0,7 \dots 0,76$), поверхневий шар відповідає сталі 20X10Г8СТАФ с аустенитно-мартенситною структурою. Поступово по глибини наплавлених шарів структура переходить в мартенситно-аустенитну, а за тем в переважно мартенситну с невеликим кількістю $A_{ост}$ (рис. 5).

Таким образом, вперше отримані закономірності послідовно-ступінчастого характеру зміни хімічного складу по товщині наплавленого $Fe-(0,1 \dots 0,2\%)C-(8 \dots 13\%)Cr-(6 \dots 12\%)Mn-(0,8 \dots 1,4\%)Si$ металу, котрі визначають градієнтне чередування структури от мартенситно-аустенитної у зони сплавлення до аустенитно-мартенситної (в середніх шарах) і аустенитної – в поверхневому шарі, що дозволяє регулювати метастабільність структури, забезпечити підвищену здатність к самоадаптації при изнашиванні для підвищення експлуатаційних властивостей.

Електронно-микроскопічні дослідження с локальним микрорентгеноспектральним аналізом показали, що легуючі елементи, особливо хром і марганец диференційовано розподілені між фазами (таблиця 2). Так, в наплавленій сталі 20X10Г8СТАФ на значительній глибині аустенит в більшій ступені збагачен хромом – 10,22% Cr (рис. 5, табл. 2: д) – спектр 2), чім мартенсит (~ 6,10% Cr). Останній, однак, більше містить марганца ~14,48% і кремнія ~ 3,18% (см. рис. 5, табл. 2: д) – спектр 1).

Это можно объяснить некоторой динамической избирательностью в локальном распределении химических элементов, а также некоторыми колебаниями состава порошковой проволоки по ее длине. Таким образом, правильность и адекватность построенной физико-математической модели изменения химического и фазового состава, микроструктуры по слоям НМ, полностью подтверждается результатами экспериментальных исследований, в том числе с использованием современных методов.

Для более наглядного представления особенностей послойного формирования НМ заданного легирования в работе сделана попытка объединения разработанной модели и модели, отражающей зависимость фазового состава от химического через положение мартенситных точек [8]. На рисунке 6 представлена интеграционная схема двух разработанных моделей формирования химического, фазового составов НМ через влияние легующих элементов на t_{M_n} (а т. M_n на количество мартенсита закалки (при охлаждении НМ до комнатной температуры) и аустенита, и послойно-ступінчастого характеру их распределения. В зависимости от содержания легующего элемента (Cr, Mn, Si) (по вертикаль-

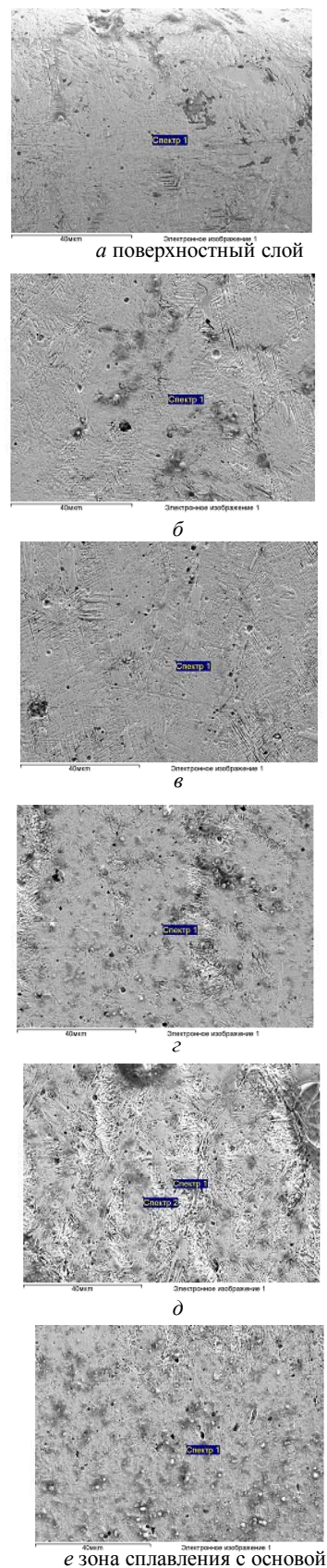


Рис. 5. Изменение микроструктуры наплавленного металла 20X10Г8СТАФ от поверхности (а) к основному металлу (е) соответственно послойно-ступінчастому изменению химического состава (см. табл. 2)

Таблица 2 – Изменение химического состава НМ марки 20Х10Г8СТАФ от поверхности (а) к зоне сплавления с основным металлом согласно чередованию микроструктуры по рис. 5

Обозначение	Расстояние от поверхности, мм	Cr, %	Mn, %	Si, %	Структура
а)	0	10,94	7,38	1,04	М + А
б)	3,0	10,74	7,70	0,97	А + М
в)	5,5	9,5	7,59	0,82	М + А
г)	8,0	8,77	5,89	0,78	М + А
д) спектр 1	10,0	6,10	14,48	3,18	М
д) спектр 2	10,0	10,22	5,91	0,74	А
е) зона сплавления с основной - Ст.3	11,5	7,57	3,37	0,5	М + А → осн. Ме

Выводы

ной оси) изменяется температура t_{M_n} , а ее положение относительно комнатной температуры (+20 °С) определяет количество образующихся мартенсита закалки и аустенита (см. рис. 4), от чего зависит метастабильность [8]. От фазового состава, структуры и метастабильности аустенита (которая оценивается по кинетике развития $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПИ и количеству образующегося мартенсита деформации в поверхностном слое), как было показано выше, существенно зависят механические и эксплуатационные свойства исследованного НМ. Это позволяет прогнозировать и проектировать составы и метастабильность структуры НМ, что необходимо использовать для управления механическими и эксплуатационными свойствами.

В результате использования созданных моделей, подтвержденных экспериментально, предложен механизм управления фазовым составом и степенью метастабильности аустенита в Fe-Cr-Mn НМ за счет регулирования доли участия предыдущих наплавленных слоев и основного металла в наплавленном (в пределах $N = 0,244 \dots 0,767$), а также количества слоев, что обеспечивает управление развитием $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПИ и эксплуатационными свойствами.

1. Разработана физико-математическая модель и впервые экспериментально установлены закономерности послойно-ступенчатого характера формирования химического, фазового составов и микроструктуры по толщине наплавленного Fe-Cr-Mn металла от степени проплавления, позволяющие в достаточно широких пределах регулировать соотношение между аустенитом и мартенситом закалки (от 0 до 100 %), степень метастабильности γ - фазы, обеспечить повышенную адаптационную способность при эксплуатации и управление свойствами.

2. Правильность и адекватность модели подтверждены результатами экспериментальных исследований с использованием современных методов электронной микроскопии, квантометрического и микрорентгеноспектрального анализов.

3. Предложен механизм управления формированием химического, фазового составов (от аустенитного до мартенситно-аустенитного) с метастабильной структурой наплавленного Fe-Cr-Mn металла с помощью наплавочно-технологических параметров ($I, U, V_{напл.}$), влияющих на степень проплавления и долю участия основного металла ($N = 0,244 \dots 0,76$), количества наплавляемых слоев, что обеспечивает регулирование $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПИ и управление эксплуатационными свойствами.

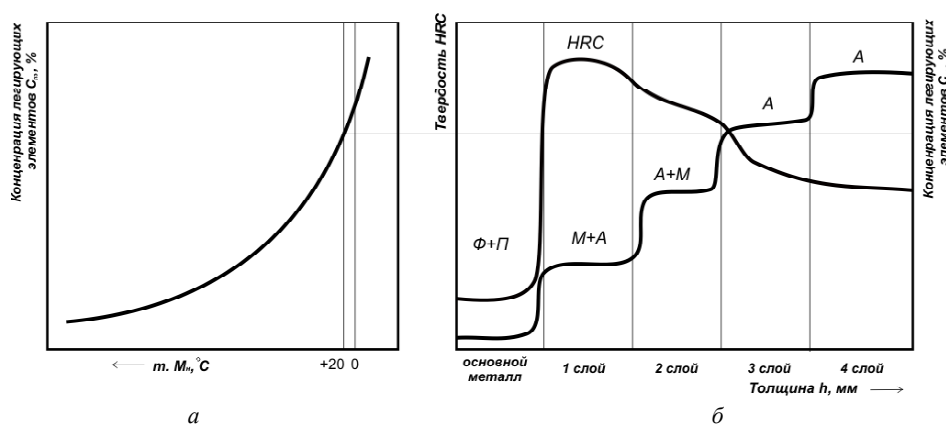


Рис. 6. Интеграция двух моделей зависимости t_{M_n} и фазового состава от содержания легирующих элементов (а) и послойно-ступенчатого их распределения в наплавленном Fe-Cr-Mn металле (б), обуславливающего формирование дифференцированного фазового состава: М – А, А – М и А (М – мартенсит; А – аустенит)

Список літератури

1. Шехтер С. Я. Наплавка металлов / С. Я. Шехтер, А. М. Резникий. – М. : Машиностроение, 1982. – 71 с.
2. Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. – К. : Екотехнологія, 2004. – 160 с.
3. Разиков М. И. О выборе наплавочного материала, стойкого при кавитационном нагружении / М. И. Разиков, Б. А. Кулишенко // Сварочное производство. – 1967. – № 7. – С. 10–12.
4. Чейлях А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А. П. Чейлях. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2003. – 212 с.
5. Малинов Л. С. Ресурсосберегающие экономнолегируемые сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов. – Мариуполь : изд-во «Рената», 2009. – 568 с.
6. Думов С. И. Технология электрической сварки плавлением / С. И. Думов. – Л. : Машиностроение, 1970. – 456 с.
7. Cheiliakh Ya. A. Structure and properties of deposited wear-resistant Fe-Cr-Mn steel with controllable content of metastable austenite / Cheiliakh Ya. A., Chigarev V. V. // The Paton welding Journal / August 2011# 8. – P. 17–21.
8. Чейлях Я. А. Моделирование влияния легирующих элементов на t_{M_n} и фазовый состав наплавленных Fe-Cr-Mn метастабильных сталей / Чейлях Я. А., Кривенко О. В., Шейченко Г. В. // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. : Технічні науки : зб. наук. праць. – Мариуполь : ДВНЗ «Призов. держ. тех. ун-т», 2013. – Вип. 27. – 2013. – С. 82–89.

Одержано 02.12.2015

Чейлях Я.О., Чейлях О.П. Фізико-математичне моделювання процесу формування наплавленого метастабільного Fe-Cr-Mn металу

Запропоновано моделювання формування хімічного, фазового складів і структури наплавленого Fe-Cr-Mn зносостійкого металу з оцінкою його метастабільності залежно від наплавлювально-технологічних параметрів наплавлення. Встановлений пошарово-ступінчастий механізм формування хімічного і фазового складів наплавленого металу, регульований мірою проплавлення шарів, забезпечуючи диференційовану метастабільність аустеніту.

Ключові слова: наплавлений метал, ступінь проплавлення, моделювання, аустеніт, мартенсіт, метастабільність.

Cheylyakh Y., Cheiliakh A. Physical and mathematical simulation of the process of formation of deposited metastable Fe-Cr-Mn metal

Represents the simulation of formation of chemical and phase composition as well as the structure of deposited Fe-Cr-Mn wear-resistant metal with evaluation of its metastability, depending upon surface deposition and technological parameters of hardfacing. By means to discover a layer-after-layer mechanism of formation of chemical and phase composition of the deposited metal that it could be modified quite efficiently by the degree of melting layers, thus ensuring different meta-stability of austenite.

Key words: deposited metal, degree of melting, simulation, austenite, martensite, meta-stability.