



СТРУКТУРА ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

И. И. РЯБЦЕВ, И. А. КОНДРАТЬЕВ, В. А. КОСТИН, Д. П. НОВИКОВА, кандидаты техн. наук,
И. Л. БОГАЙЧУК, А. А. БАБИНЕЦ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы особенности структуры наплавленного металла типа инструментальных сталей 30X4B2M2ФС, 30X2M2HCGФ и 35B9X3ГСФ, легированных фосфором в пределах 0...1,5 мас. %. Определено, что в высоколегированном наплавленном металле образуются сложные фосфиды глобулярной формы, содержащие ванадий, молибден, хром, марганец, вольфрам, т. е. металлы, фосфиды которых термодинамически наиболее устойчивы. Доказано, что наличие таких фосфидов не ухудшает трещиностойкость наплавленного металла исследованных типов.

Ключевые слова: дуговая наплавка, высоколегированный наплавленный металл, легирование фосфором, микроструктура, микрорентгеноспектральный анализ, фосфиды, фосфидные эвтектики, трещиностойкость

В работах [1, 2] показана перспективность использования фосфора в качестве легирующего элемента в низколегированных наплавочных материалах, которые применяются для восстановления и упрочнения деталей, работающих в условиях трения металла по металлу при комнатной температуре. Наличие фосфора в этих материалах увеличивает их износостойкость и снижает коэффициент трения скольжения. Использованию фосфора в качестве легирующего элемента в наплавочных материалах препятствует недостаточная изученность вопроса о влиянии фосфора на их структуру и свойства, а также устоявшееся мнение о его отрицательном воздействии на трещиностойкость сварных швов, хотя речь идет о материалах с содержанием фосфора не выше 0,05 мас. % [3, 4]. Однако, как установлено в работе [5], в низколегированном наплавленном металле может растворяться до 1 мас. % фосфора, а свободные фосфиды в виде пограничных фосфидных эвтектик, которые и являются основной причиной образования трещин, в структуре наплавленного металла практически отсутствуют. При этом допустимо наличие в его структуре небольшого количества тугоплавких фосфидов глобулярной формы.

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния фосфора на структуру металла, наплавленного высоколегированными порошковыми проволоками ПП-Нп-30X4B2M2ФС, ПП-Нп-30X2M2HCGФ и ПП-Нп-35B9X3ГСФ, которые применяют для восстановления и упрочнения инструментов для горячего и холодного деформирования металлов и сплавов [6]. Исследовано также распределение фосфора между струк-

турными составляющими высоколегированного наплавленного металла. Целью настоящей работы является определение пределов легирования наплавленного металла выбранных систем легирования фосфором, при которых в структуре наплавленного металла отсутствуют легкоплавкие пограничные фосфидные эвтектики, а в самом наплавленном металле трещины не образуются.

Для проведения исследований изготовлено 12 порошковых проволок диаметром 2 мм (по четыре проволоки каждой марки). Содержание фосфора в наплавленном металле каждого типа изменяли в пределах 0...1,5 мас. %. Опытными проволоками под флюсом АН-26 были наплавлены образцы для замера твердости и химического состава наплавленного металла (табл. 1), а также для проведения исследований микроструктуры и микрорентгеноспектрального анализа. Режим наплавки был следующим: $I = 250...270$ А; $U_d = 24...26$ В; $v_n = 28$ м/ч. Приведенные в табл. 1 данные показывают, что в отличие от низкоуглеродистого низколегированного наплавленного металла [2] фосфор практически не влияет на твердость углеродистого высоколегированного наплавленного металла, основное воздействие на нее оказывает углерод.

Исследована микроструктура образцов наплавленного металла 12 составов. Известно, что структура высоколегированного наплавленного металла во многом зависит от термического цикла наплавки, поэтому при анализе структурного состояния наплавленного металла 30X4B2M2ФС, 30X2M2HCGФ и 35B9X3ГСФ использовали термокинетические диаграммы распада аустенита в этих материалах [7–9].

Как установлено в работе [7], в наплавленном металле 30X4B2M2ФС в широком диапазоне значений скорости охлаждения имеют место бейнитное и мартенситное превращения, которые при



Таблица 1. Химический состав (мас. %) и твердость *HRC* металла, наплавленного опытными порошковыми проволоками

| Тип наплавленного металла | № образца | C | Mn | Si | P | Cr | Mo | W | Ni | V | <i>HRC</i> |
|---------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| 30X4B2M2ФС | 1 | 0,30 | 0,98 | 0,83 | — | 4,31 | 2,14 | 2,32 | — | 0,37 | 53...56 |
| | 2 | 0,29 | 1,18 | 1,12 | 0,45 | 3,94 | 2,35 | 1,95 | — | 0,45 | 53...56 |
| | 3 | 0,33 | 1,05 | 0,97 | 0,93 | 4,17 | 2,43 | 2,14 | — | 0,29 | 55...57 |
| | 4 | 0,28 | 0,93 | 1,02 | 1,52 | 4,35 | 2,15 | 1,89 | — | 0,42 | 53...55 |
| 30X2M2HCGФ | 5 | 0,24 | 0,97 | 0,81 | — | 2,29 | 1,92 | — | 1,20 | 0,43 | 51...52 |
| | 6 | 0,28 | 0,89 | 0,62 | 0,57 | 1,98 | 2,11 | — | 0,96 | 0,37 | 53...55 |
| | 7 | 0,27 | 0,92 | 0,76 | 0,89 | 2,13 | 2,01 | — | 1,03 | 0,52 | 49...51 |
| | 8 | 0,31 | 0,78 | 0,83 | 1,42 | 2,32 | 1,99 | — | 0,93 | 0,47 | 57...59 |
| 35B9X3ГСФ | 9 | 0,33 | 1,08 | 0,63 | — | 2,56 | — | 9,17 | — | 0,36 | 53...54 |
| | 10 | 0,35 | 0,96 | 0,75 | 0,47 | 2,31 | — | 8,93 | — | 0,52 | 53...55 |
| | 11 | 0,30 | 0,98 | 0,73 | 1,02 | 2,85 | — | 8,97 | — | 0,47 | 51...53 |
| | 12 | 0,27 | 1,02 | 0,81 | 1,39 | 2,43 | — | 9,21 | — | 0,42 | 46...50 |

термических циклах наплавки до конца не происходят, вследствие чего в структуре наплавленного металла сохраняется остаточный аустенит.

В соответствии с этим микроструктура наплавленного металла 30X4B2M2ФС без фосфора (рис. 1, а, образец № 1, табл. 1) представляет собой мартенситно-бейнитную смесь (микротвердость *HV* 0,5 3860 МПа) и остаточный аустенит (*HV* 0,5 2320 МПа).

При легировании наплавленного металла 30X4B2M2ФС с 0,45 мас. % Р (образец № 2, табл. 1), микротвердость мартенсита возрастает до *HV* 0,5 4120 МПа, а остаточного аустенита — до *HV* 0,5 257 МПа. Некоторое увеличение микротвердости, по-видимому, связано с растворением фосфора в структурных составляющих наплавленного металла (рис. 1, б).

В наплавленном металле 30X4B2M2ФС, содержащем 0,93 мас. % Р (образец № 3, табл. 1), микротвердость остаточного аустенита повышается до *HV* 0,5 3860 МПа, а мартенситных участков — до *HV* 0,5 4730...5090 МПа. В структуре наплавленного слоя образца № 3 появляются темно-травящиеся включения различных размеров (рис. 1, в).

При увеличении содержания фосфора до 1,52 мас. % (образец № 4, табл. 1) наплавленный металл 30X4B2M2ФС имеет ячеистую структуру (микротвердость *HV* 0,5 3030 МПа), по границам ячеек формируются оторочки (микротвердость *HV* 0,5 4120 МПа), в которых располагаются фосфидные включения (рис. 1, г).

Анализ термокинетической диаграммы распада аустенита наплавленного металла 30X2M2HCGФ [8] показывает, что в диапазоне значений скорости охлаждения, соответствующих термическому циклу наплавки, сначала происходит бейнитное, а затем мартенситное превращение. Для наплавленного металла 30X2M2HCGФ характерна высокая (390 °С) температура начала мартенситного превращения. Вследствие значительной скорости охлаждения при наплавке мартенситное превращение до конца не происходит и в структуре наплавленного металла сохраняется остаточный аустенит. В соответствии с этим мик-

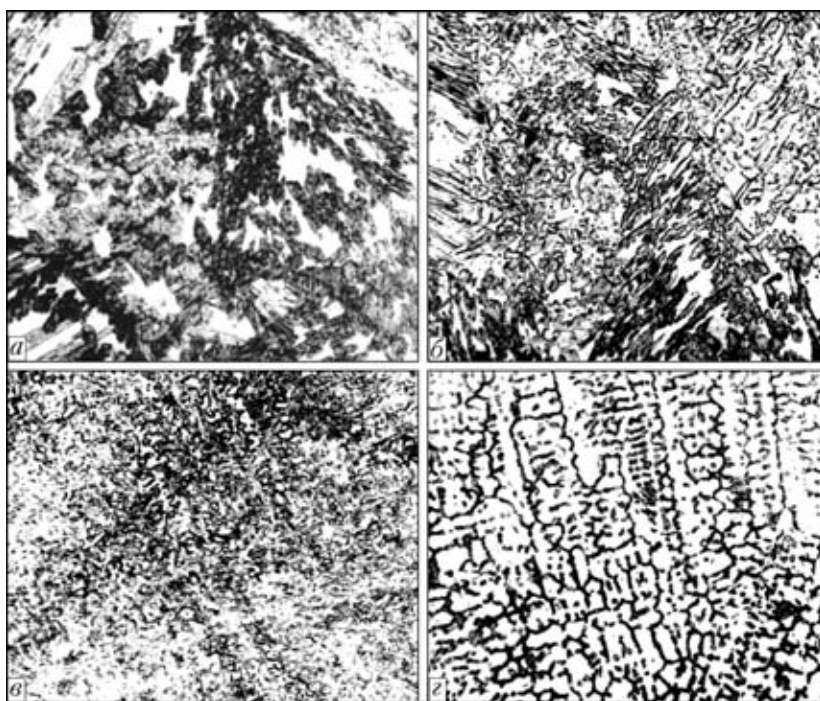


Рис. 1. Микроструктура (×200) образцов наплавленного металла 30X4B2M2ФС без фосфора (а) и с 0,45 (б), 0,93 (в), 1,52 мас. % (г) Р (здесь, а также на рис. 2 и 3 — травление электролитическое в хромовой кислоте)

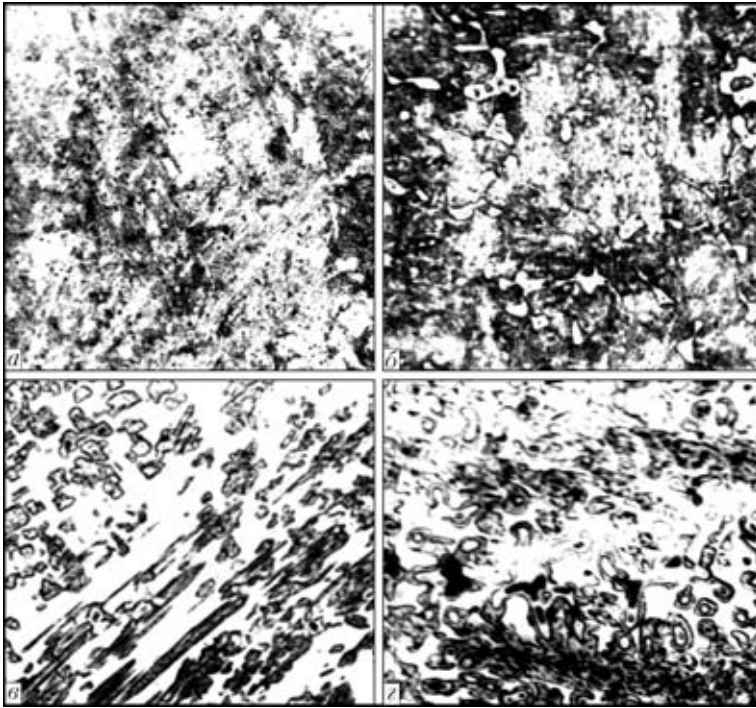


Рис. 2. Микроструктура (X200) образцов наплавленного металла 30X2M2HCGF без фосфора (а) и с 0,57 (б), 0, 89 (в), 1,42 мас. % (г) Р

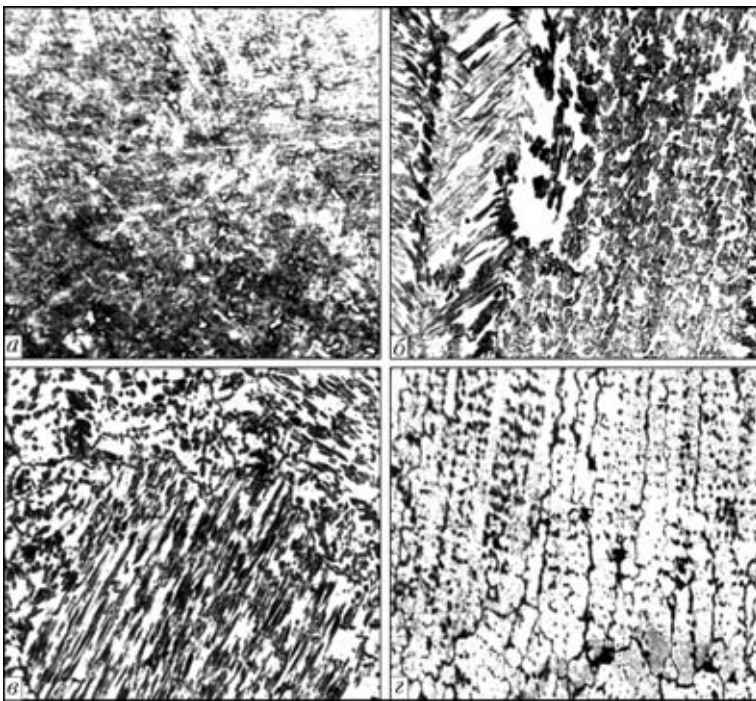


Рис. 3. Микроструктура (X200) образцов наплавленного металла 35B9X3GCF без фосфора (а) и с 0,47 (б), 1,02 (в), 1,39 мас. % (г) Р

роструктура наплавленного металла 30X2M2HCGF без фосфора (рис. 2, а, образец № 5, табл. 1) представляет собой мартенситно-бейнитную смесь (микротвердость $HV_{0,5}$ 3030 МПа), попадающую различными кристаллографическими осями на поверхность шлифа (светлые и темные иглы имеют одинаковую твердость). В структуре этого металла присутствует

также остаточный аустенит (микротвердость $HV_{0,5}$ 2290 МПа).

При содержании в наплавленном металле 30X2M2HCGF 0,57 мас. % Р (образец № 6, табл. 1) мартенситно-бейнитная структура в нем укрупняется, ее микротвердость возрастает до $HV_{0,5}$ 3860...4410 МПа. Объемная доля аустенита остается примерно на том же уровне. В структуре наплавленного металла встречаются также светлые компактные включения развитой формы, которые предварительно идентифицировали как δ -феррит (рис. 2, б).

Структура наплавленного металла 30X2M2HCGF с 0,89 мас. % Р (образец № 7, табл. 1) включает мартенсит, бейнит и остаточный аустенит (рис. 2, в). Микротвердость мартенситно-бейнитной составляющей — $HV_{0,5}$ 4120 МПа, остаточного аустенита — $HV_{0,5}$ 3210 МПа.

При дальнейшем увеличении содержания фосфора до 1,42 мас. % (образец № 8, табл. 1) микротвердость остаточного аустенита возрастает до $HV_{0,5}$ 3620 МПа. Мартенситно-бейнитная составляющая имеет микротвердость $HV_{0,5}$ 5490 МПа. В структуре наплавленного металла формируются цепочки фосфидов и возникают микротрещины, которые передаются от фосфида к фосфиду (рис. 2, г).

Как следует из термокинетической диаграммы распада аустенита, структура наплавленного металла 35B9X3GCF при скорости охлаждения, соответствующей термическому циклу наплавки, должна состоять из игольчатого троостита, мартенсита, остаточного аустенита и карбидов [9]. При медленном охлаждении, характерном для изотермического отжига, в структуре наплавленного металла 35B9X3GCF возможно появление феррита. Для этого типа наплавленного металла характерна также высокая (410 °С) температура начала мартенситного превращения.

Структура наплавленного металла 35B9X3GCF без фосфора (образец № 9, табл. 1) представляет собой мартенситно-трооститную смесь, имеющую микротвердость $HV_{0,5}$ 4730 МПа, ориентация игл в основном под углом 60° (рис. 3, а). Формируются участки остаточного аустенита ($HV_{0,5}$ 3620 МПа) и включения карбидов.

Структура наплавленного металла 35B9X3GCF, содержащая 0,47 мас. % Р (образец

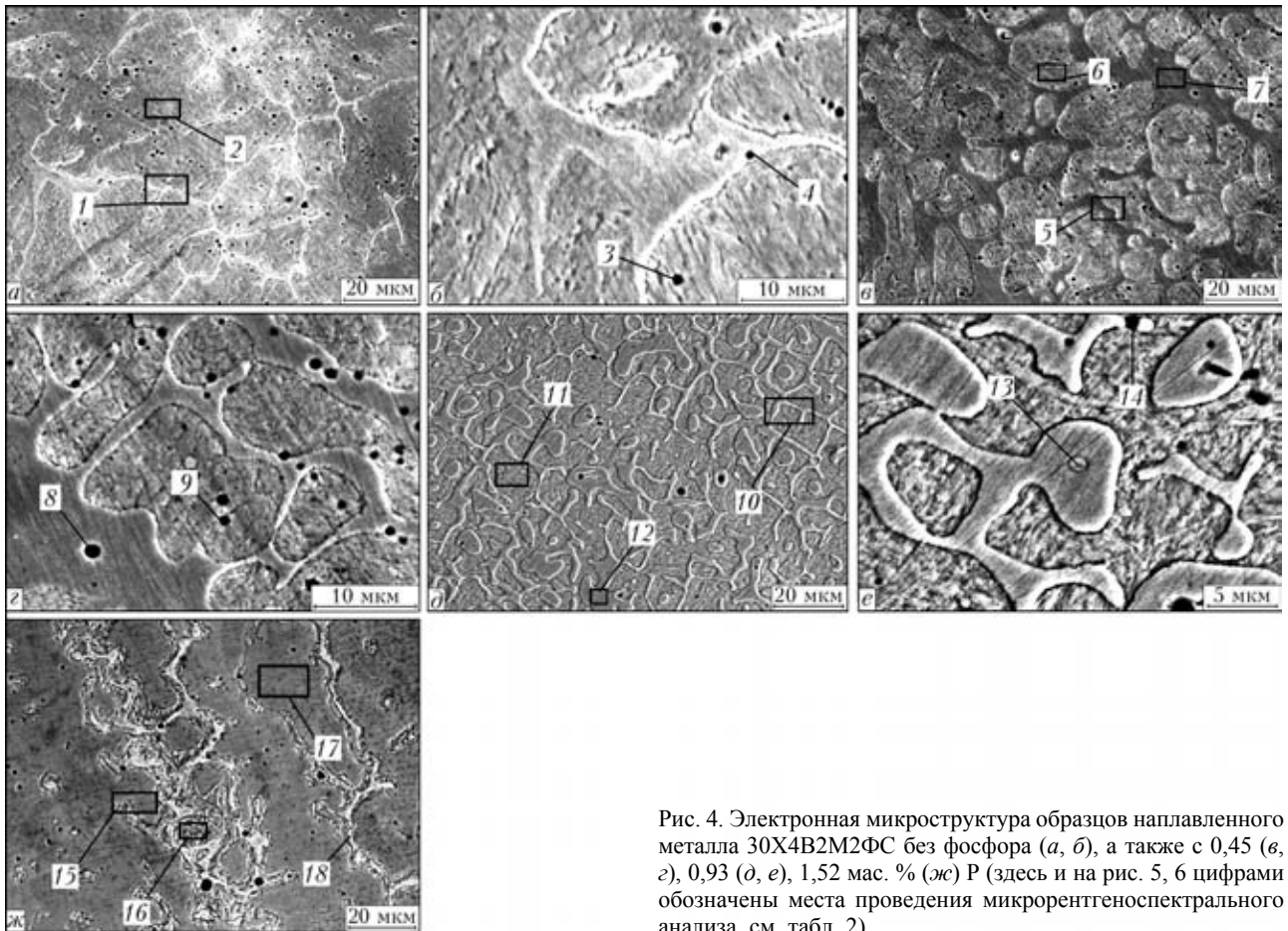


Рис. 4. Электронная микроструктура образцов наплавленного металла 30X4B2M2FC без фосфора (а, б), а также с 0,45 (в, з), 0,93 (д, е), 1,52 мас. % (ж) Р (здесь и на рис. 5, 6 цифрами обозначены места проведения микрорентгеноспектрального анализа, см. табл. 2)

№ 10, табл. 1), аналогична структуре образца № 9 (рис. 3, б). Микротвердость мартенситно-трооститной матрицы составляет $HV_{0,5} 4730$ МПа, остаточного аустенита — $HV_{0,5} 3860$ МПа.

При увеличении содержания фосфора до 1,02 мас. % в наплавленном металле 35B9X3ГСФ (образец № 11, табл. 1) сохраняется структура, состоящая из мартенсита, игольчатого троостита и остаточного аустенита. Микротвердость мартенсита и аустенита сохраняется на одном и том же уровне. В отдельных участках структуры наплавленного металла выявлены округлые включения, возможно, фосфиды (рис. 3, в).

Наплавленный металл 35B9X3ГСФ с содержанием фосфора 1,39 мас. % имеет ячеистую структуру (рис. 3, з, образец № 12, табл. 1), в которой есть включения карбидов, а возможно, и фосфидов. Зафиксировано также появление микротрещин.

С помощью микрорентгеноспектрального анализа исследовано распределение основных легирующих элементов, и в первую очередь фосфора, в структуре наплавленного металла всех образцов (рис. 4–6, табл. 2–5). Интегральный анализ охватывал участок в несколько десятков микрометров, что позволило определить состав матрицы наплавленного металла и ее структурных состав-

ляющих; точечный анализ был выполнен на участке диаметром 1 мкм в основном для определения наличия различных включений.

Результаты микрорентгеноспектральных исследований показали, что наплавленный металл всех систем легирования по некоторым элементам имеет достаточно высокую химическую микро-неоднородность. Так, в наплавленном металле 30X4B2M2FC без фосфора выявлена неоднородность по кремнию и вольфраму (рис. 4, а, б; № 1–4, табл. 2); в 30X2M2HCGФ — по кремнию и никелю (рис. 5, а; № 1–3, табл. 3); в 35B9X3ГСФ — по вольфраму и ванадию (рис. 6, а; № 1, 2, табл. 4).

Легирование наплавленного металла фосфором (0,5 мас. %) несколько снижает химическую микро-неоднородность по этим элементам. В таком случае в наплавленном металле 30X4B2M2FC наблюдается неоднородность только по вольфраму (рис. 4, в, з; № 5–9, табл. 2); в 30X2M2HCGФ — только по никелю (рис. 5, б; № 4–6, табл. 3); в 35B9X3ГСФ — только по кремнию (рис. 6, б, в; № 4–7, табл. 4). Во всех трех типах наплавленного металла фосфор находится в твердом растворе практически во всех структурных составляющих, появления свободных фосфидов не зафиксировано. Одновременно имеет место значительная неоднород-



Т а б л и ц а 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-30Х4В2М2ФС

| Содержание P, мас. % | Место анализа | № исследуемого участка по рис. 4 | Содержание элементов, мас. % | | | | | | | |
|----------------------|------------------|----------------------------------|------------------------------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| | | | Fe | Mn | Si | P | Cr | Mo | W | V |
| Без фосфора | Матрица | 1 | 90,38 | 1,33 | 1,23 | 0 | 4,31 | 1,33 | 0,68 | 0,23 |
| | » | 2 | 89,74 | 1,28 | 0,70 | 0 | 3,37 | 1,77 | 2,41 | 0,37 |
| | Включение | 3 | 70,92 | 11,84 | 2,00 | 0,30 | 3,37 | 8,19 | 3,18 | 0,16 |
| | » | 4 | 81,52 | 5,52 | 2,53 | 0,29 | 3,66 | 3,24 | 3,03 | 0,20 |
| 0,45 | Матрица | 5 | 87,83 | 1,95 | 0,50 | 0,42 | 3,49 | 2,51 | 2,92 | 0,37 |
| | » | 6 | 88,27 | 1,58 | 0,81 | 0,66 | 3,86 | 2,24 | 1,71 | 0,31 |
| | » | 7 | 91,48 | 1,32 | 1,12 | 0 | 3,59 | 1,44 | 0,86 | 0,20 |
| | Включение | 8 | 60,41 | 18,54 | 4,43 | 0,47 | 3,37 | 9,10 | 3,01 | 0,63 |
| | » | 9 | 79,52 | 7,20 | 4,55 | 0,37 | 3,46 | 2,06 | 2,55 | 0,31 |
| 0,93 | Матрица | 10 | 90,60 | 1,41 | 0,83 | 0,69 | 2,29 | 2,43 | 0,46 | 0,31 |
| | » | 11 | 92,93 | 1,02 | 0,89 | 0,32 | 2,68 | 1,00 | 0 | 0,18 |
| | » | 12 | 88,20 | 1,26 | 0,39 | 1,31 | 2,16 | 3,73 | 0,80 | 0,72 |
| | Включение | 13 | 35,16 | 39,24 | 7,71 | 0,88 | 1,06 | 5,77 | 9,04 | 0,78 |
| | » | 14 | 68,63 | 2,39 | 0,25 | 8,14 | 5,15 | 11,56 | 1,46 | 1,67 |
| 1,52 | Матрица | 15 | 85,53 | 1,13 | 0,01 | 1,64 | 3,71 | 2,51 | 4,87 | 0,34 |
| | » | 16 | 89,06 | 1,14 | 0,79 | 0,81 | 4,37 | 1,47 | 1,69 | 0,68 |
| | » | 17 | 87,15 | 1,66 | 0,37 | 0,95 | 4,02 | 1,97 | 3,74 | 0,17 |
| | Пленка фосфидная | 18 | 67,81 | 2,63 | 0,53 | 6,63 | 8,22 | 7,94 | 4,82 | 1,42 |

Т а б л и ц а 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-30Х2М2НСГФ

| Содержание P, мас. % | Место анализа | № исследуемого участка по рис. 5 | Содержание элементов, мас. % | | | | | | | |
|----------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | | | Fe | Mn | Si | P | Cr | Mo | Ni | V |
| Без фосфора | Матрица | 1 | 91,95 | 1,25 | 0,66 | 0 | 2,21 | 2,43 | 1,21 | 0,29 |
| | » | 2 | 90,64 | 1,27 | 0,13 | 0 | 2,28 | 2,80 | 1,33 | 0,47 |
| | » | 3 | 90,21 | 0,98 | 0,12 | 0,18 | 2,21 | 3,43 | 0,40 | 0,34 |
| 0,57 | » | 4 | 91,24 | 1,12 | 0,75 | 0,61 | 2,47 | 1,99 | 1,27 | 0,17 |
| | » | 5 | 91,68 | 1,36 | 0,45 | 0,12 | 1,84 | 2,32 | 1,18 | 0,17 |
| | » | 6 | 93,81 | 0,94 | 0,49 | 0,04 | 2,25 | 1,49 | 0,60 | 0,24 |
| 0,89 | » | 7 | 87,88 | 1,67 | 0,92 | 0,76 | 4,30 | 2,20 | 0 | 0,31 |
| | » | 8 | 86,87 | 1,99 | 1,18 | 0,87 | 3,65 | 1,32 | 0,30 | 0,27 |
| | » | 9 | 86,97 | 1,24 | 0,75 | 0,69 | 4,40 | 2,11 | 0,40 | 0,23 |
| | Включение | 10 | 83,82 | 1,62 | 1,44 | 2,57 | 5,22 | 3,10 | 0 | 0,76 |
| 1,42 | » | 11 | 69,14 | 11,43 | 6,57 | 0,94 | 3,82 | 4,27 | 0 | 0,36 |
| | Матрица | 12 | 90,21 | 2,08 | 0,56 | 0,95 | 2,19 | 2,22 | 1,15 | 0 |
| | » | 13 | 91,70 | 1,04 | 0,77 | 0,89 | 2,33 | 2,33 | 0,75 | 0,20 |
| | » | 14 | 88,77 | 1,54 | 0,39 | 1,24 | 1,82 | 2,41 | 1,50 | 0,35 |
| | Включение | 15 | 69,21 | 3,19 | 0,39 | 8,95 | 5,07 | 9,63 | 1,64 | 1,39 |
| | » | 16 | 72,19 | 2,60 | 0,59 | 8,17 | 4,86 | 8,71 | 1,67 | 1,21 |
| | » | 17 | 71,29 | 2,76 | 0,60 | 8,72 | 4,69 | 9,42 | 1,13 | 1,23 |



Таблица 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-35В9Х3ГСФ

| Содержание P, мас. % | Место анализа | № исследуемого участка по рис. 6 | Содержание элементов, мас. % | | | | | | |
|----------------------|------------------|----------------------------------|------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | | | Fe | Mn | Si | P | Cr | W | V |
| Без фосфора | Матрица | 1 | 88,87 | 1,38 | 0,30 | 0 | 2,45 | 6,20 | 0 |
| | » | 2 | 90,84 | 1,25 | 0,18 | 0 | 1,74 | 5,39 | 0,60 |
| 0,47 | » | 3 | 88,44 | 1,35 | 0 | 0,23 | 1,72 | 7,38 | 0,38 |
| | » | 4 | 90,36 | 1,36 | 0 | 0 | 1,49 | 5,93 | 0,53 |
| | » | 5 | 88,16 | 1,75 | 0,33 | 0,45 | 2,09 | 5,71 | 0,37 |
| | Включение | 6 | 88,82 | 1,33 | 0,25 | 0,33 | 2,31 | 6,45 | 0,51 |
| | » | 7 | 88,10 | 2,39 | 0,32 | 0,27 | 1,76 | 6,16 | 0,25 |
| 1,02 | Матрица | 8 | 89,51 | 1,63 | 1,22 | 0,70 | 1,96 | 3,67 | 0,45 |
| | » | 9 | 87,84 | 1,82 | 0,54 | 0,80 | 2,11 | 5,37 | 0,46 |
| | » | 10 | 87,40 | 1,42 | 0,44 | 0,70 | 1,96 | 3,67 | 0,45 |
| | Включение | 11 | 72,53 | 11,22 | 3,09 | 0,73 | 1,31 | 7,35 | 1,50 |
| | » | 12 | 79,23 | 3,22 | 0,13 | 6,07 | 4,72 | 5,49 | 0,75 |
| 1,39 | Матрица | 13 | 85,10 | 1,12 | 0 | 1,56 | 2,07 | 9,17 | 0,37 |
| | » | 14 | 90,05 | 1,35 | 0,40 | 0,48 | 2,06 | 5,42 | 0,21 |
| | » | 15 | 87,78 | 0,64 | 0 | 0,89 | 2,04 | 8,26 | 0,36 |
| | Включение | 16 | 70,98 | 2,39 | 0 | 7,59 | 5,86 | 11,53 | 1,41 |
| | » | 17 | 73,75 | 4,52 | 0,23 | 9,73 | 6,28 | 3,63 | 1,57 |
| | Пленка фосfidная | 18 | 72,28 | 3,68 | 0,61 | 12,24 | 7,70 | 2,06 | 1,34 |

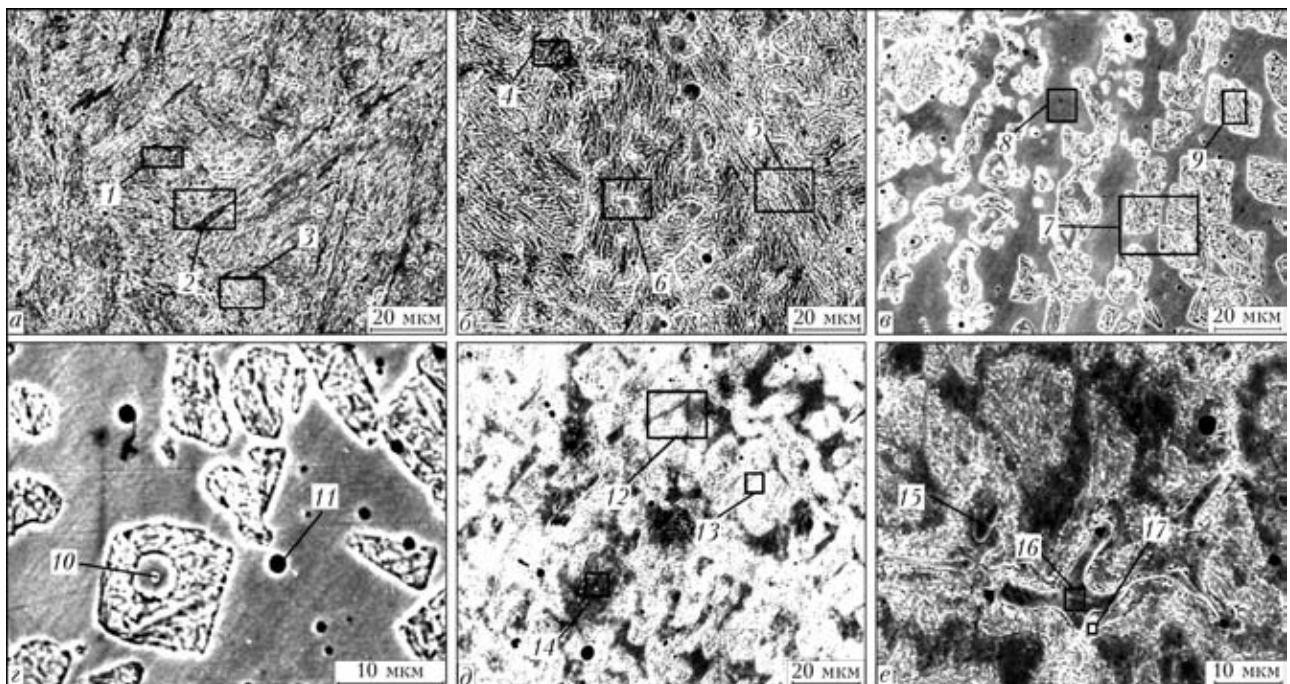


Рис. 5. Микроструктура образцов наплавленного металла 30Х2М2НСГФ без фосфора (а) и с 0,57 (б), 0,89 (в, д), 1,42 мас. % (е, е) P (см. табл. 3)

ность по фосфору: в наплавленном металле 30Х4В2М2ФС содержание фосфора колеблется в пределах 0,37...0,66 мас. %; в 30Х2М2НСГФ оно составляет 0,12...0,61 мас. %; в 35В9Х3ГСФ — 0,23...0,45 мас. %. Это объясняется, по-видимо-

му, различной степенью растворимости фосфора в α- и γ-железе [10].

При увеличении содержания фосфора до 1,00 мас. % в наплавленном металле 30Х4В2М2ФС наблюдается неоднородность по вольфраму и мо-

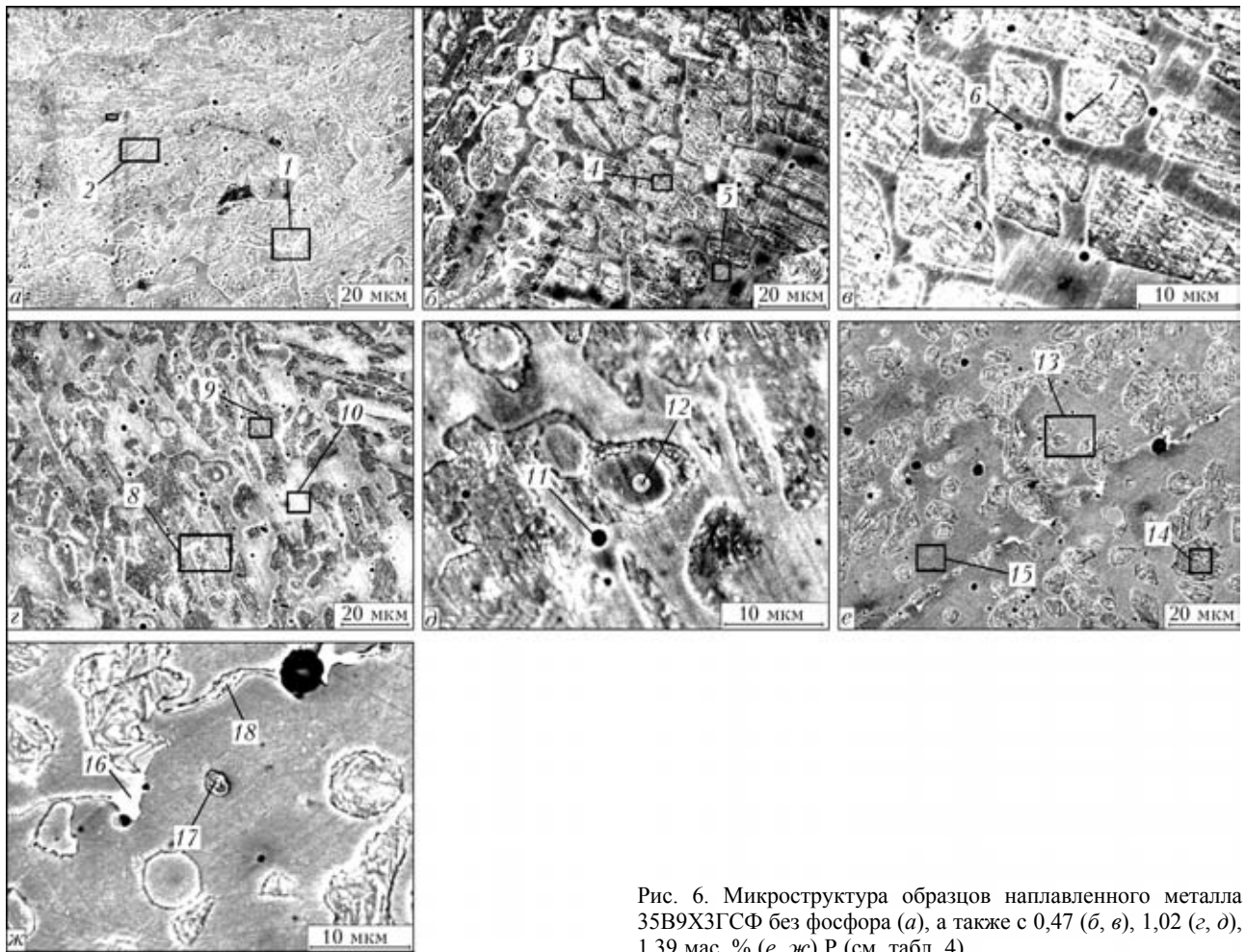


Рис. 6. Микроструктура образцов наплавленного металла 35В9Х3ГСФ без фосфора (а), а также с 0,47 (б, в), 1,02 (з, д), 1,39 мас. % (е, ж) Р (см. табл. 4)

либдену (рис. 4, д, е; № 10–14, табл. 2); в 30Х2М2НСГФ — по никелю (рис. 5, в, з; № 7–11, табл. 3); в 35В9Х3ГСФ — по кремнию и вольфраму (рис. 6, з, д; № 8–12, табл. 4). В наплавленном металле 30Х4В2М2ФС с 8,14 мас. % Р (см. рис. 4, е; № 14, табл. 2) и в 35В9Х3ГСФ с 6,07 мас. % Р (рис. 6, д; № 12, табл. 4) происходит формирование включений фосфидов глобулярной формы. Фосфиды содержат повышенную массовую долю марганца, хрома, молибдена и ванадия. В наплавленном металле 30Х2М2НСГФ с массовой долей фосфора около 1,00 % свободных фосфидов обнаружено не было. В наплавленном металле 30Х4В2М2ФС содержание фосфора в различных структурных составляющих матрицы колеблется в пределах 0,32...1,31 мас. %; в 30Х2М2НСГФ — 0,69...0,88 мас. % Р; в 35В9Х3ГСФ оно составляет 0,70...0,80 мас. %.

В наплавленном металле 30Х4В2М2ФС с содержанием фосфора около 1,5 мас. % выявлена неоднородность по кремнию и вольфраму (рис. 4, ж; № 15–18, табл. 2); в 30Х2М2НСГФ — по ванадию (рис. 5, д; № 12–14, табл. 3); в 35В9Х3ГСФ — по кремнию, марганцу и вольфраму (рис. 6, е; № 13–15, табл. 4). В наплавленном металле всех трех типов отмечено появление отдельных

включений фосфидов компактной формы, а также фосфидных пленок (рис. 4, ж; № 18, табл. 2; рис. 5, е; № 15–17, табл. 3, рис. 6, ж; № 16–18, табл. 4). Содержание фосфора в них колеблется от 5,93 (30Х4В2М2ФС) до 12,24 мас. % (35В9Х3ГСФ). Фосфиды и фосфидные пленки содержат повышенную массовую долю марганца, хрома, молибдена и ванадия. Фосфор в различных структурных составляющих матрицы распределяется следующим образом: в наплавленном металле 30Х4В2М2ФС — 0,81...1,64 мас. %; в 30Х2М2НСГФ — 0,95...1,64 мас. %; в 35В9Х3ГСФ — 0,48...1,57 мас. %.

Микрорентгеноспектральный анализ подтвердил ранее выполненные термодинамические расчеты равновесия химических реакций образования фосфидов основных легирующих элементов [11]. С помощью расчетов установлено, что в первую очередь следует ожидать формирования фосфидов ванадия, молибдена, хрома, марганца, вольфрама (по убывающей), т. е. тех элементов, повышенное содержание которых выявлено в фосфидах наплавленного металла исследованных типов.

Таким образом, микрорентгеноспектральный анализ показал, что с увеличением содержания фосфора



до 1,5 мас. % возрастает массовая доля растворенного фосфора в матрице наплавленного металла исследованных систем легирования. Включения фосфидов глобулярной формы формируются в наплавленном металле исследованных типов при содержании фосфора около 1 мас. %. При содержании фосфора около 1,5 мас. % происходит значительное увеличение включений фосфидов компактной формы, а также фосфидных пленок, что приводит к появлению трещин в наплавленном металле.

Исследованиями установлено, что в высоколегированном наплавленном металле образуются сложные фосфиды, содержащие в зависимости от системы легирования ванадий, молибден, хром, марганец, вольфрам, т. е. металлы, фосфиды которых наиболее термодинамически устойчивы и имеют достаточно высокую температуру плавления. Наличие таких фосфидов глобулярной формы трещиностойкость наплавленного металла исследованных типов не ухудшает.

1. *Рябцев И. И., Кусков Ю. М.* Перспективы использования фосфора в наплавочных материалах на основе железа // Автомат. сварка. — 2003. — № 1. — С. 12–16.
2. *Триботехнические* характеристики наплавленного металла системы легирования Fe–Cr–Si–Mn–P / И. И. Рябцев, Ю. М. Кусков, В. Ф. Грабин и др. // Там же. — 2003. — № 6. — С. 20–24.

Peculiarities of structure of the deposited metal of the type of tool steels 30Kh4V2M2FS, 30Kh2M2NSGF and 35V9Kh3GSF, alloyed with 0...1.5 wt. % phosphorus, were investigated. Complex phosphides of the globular shape, containing vanadium, molybdenum, chromium, manganese and tungsten, i.e. metals the phosphides of which exhibit the highest thermodynamic stability, were found to form in the high-alloy deposited metal. The presence of such phosphides does not deteriorate crack resistance of the investigated types of the deposited metal.

3. *Влияние* фосфора на структуру и свойства металла швов при сварке низколегированных сталей / А. А. Алексеев, И. Р. Явдошин, В. Г. Войткевич, Ю. Д. Морозов // Там же. — 1989. — № 4. — С. 7–10.
4. *Влияние* фосфора на ударную вязкость и химическую микронеоднородность металла сварных швов / И. К. Походня, В. Г. Войткевич, А. А. Алексеев и др. // Там же. — 1992. — № 2. — С. 3–7.
5. *Рябцев И. И., Кусков Ю. М., Новикова Д. П.* Влияние фосфора на трещиностойкость низкоуглеродистого наплавленного металла системы легирования Fe–Mn–Si–Cr // Там же. — 2006. — № 5. — С. 15–19.
6. *Рябцев И. А., Кондратьев И. А.* Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. — Киев: Экотехнология, 1999. — 62 с.
7. *Кондратьев И. А., Васильев В. Г., Довженко В. А.* Структура и свойства металла, наплавленного порошковыми проволоками марок ПП-Нп-25Х5ФМС и ПП-Нп-30Х4В2М2ФС // Оборудование и материалы для наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. — С. 56–60.
8. *Кондратьев И. А., Гладкий П. В.* Порошковая проволока ПП-Нп-30Х2М2НФ для наплавки валков горячей прокатки // Пути развития машиностроительного комплекса Магнитогорского металлургического комбината. — Магнитогорск: ЗАО «Марс», 1996. — С. 156–163.
9. *Фрумун И. И.* Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
10. *Лунев В. В., Аверин В. В.* Сера и фосфор в стали. — М.: Металлургия, 1988. — 256 с.
11. *Рябцев И. И.* Расчетно-экспериментальная оценка эффективности легирования фосфором высоколегированного наплавленного металла // Автомат. сварка. — 2008. — № 5. — С. 18–22.

Поступила в редакцию 31.10.2008

ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ЗАМКОВ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Разработана технология наплавки замков бурильных труб с номинальным диаметром 104...177 мм. Технология предусматривает восстановление замков в два этапа. Вначале производится наплавка самозащитной порошковой проволокой ПП-АН198 для восстановления номинального диаметра труб. Металл, наплавленный этой проволокой, имеет твердость НВ 220...310 и механические свойства на уровне значений основного металла замка — стали 40ХМФА по ГОСТ 4543–71. Затем по номинальному диаметру самозащитной порошковой проволокой ПП-АН199 наплавляют три износостойких пояска, имеющие твердость HRC 42...52.

Для наплавки используется установка У653 с дополнительными роликоопорами, укомплектованная источником питания ВДУ-506. Возможно использование других установок с аналогичными параметрами и технологическими возможностями.

Назначение и области применения. Наплавка замков бурильных труб для нефтегазовой промышленности.

Контакты: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Отд. № 2 Рябцев Игорь Александрович
Тел./факс: (38044) 287 63 57
E-mail: ryabtsev@paton.kiev.ua