



## СТРУКТУРА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ

**И. А. КОНДРАТЬЕВ, И. А. РЯБЦЕВ**, кандидаты техн. наук, **И. Л. БОГАЙЧУК**, инж.,  
**Д. П. НОВИКОВА**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследована структура наплавленного металла типа заэвтектоидных графитизированных сталей и влияние на процесс графитизации различных технологических приемов наплавки. Установлено, что для графитизации наплавленного металла, содержащего не менее 1,5 мас. % С и 1,1 мас. % Si, непосредственно после наплавки необходимо применять отпуск при 400 °С с выдержкой 2 ч и замедленное охлаждение с печью. Модифицирование наплавленного металла алюминием и кальцием позволяет активизировать процесс графитизации.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, наплавочные материалы, порошковые проволоки, структура наплавленного металла, графитизированные стали

К графитизированным железоуглеродистым сплавам, т. е. сплавам, в структуре которых имеются свободные включения графита различной формы, относятся не только чугуны, но и заэвтектоидные стали, содержащие 1,3...2,0 % С [1]. Применение таких сталей является одним из способов значительного улучшения триботехнических характеристик деталей пар трения, при этом включения графита играют роль твердой смазки.

Графитизированную сталь традиционно получают аналогично ковкому чугуну, применяя высокотемпературный отжиг с целью формирования в структуре включений графита в результате распада цементита, образовавшегося при кристаллизации стали. Для повышения конкурентоспособности таких сталей перспективным является создание технологий, обеспечивающих без высокотемпературного отжига непосредственно в процессе кристаллизации формирование графитных включений и предотвращение образования структурно-свободного цементита. Одним из путей решения этой проблемы может стать применение модификаторов в сочетании с оптимизацией химического состава стали [2].

Целью данных исследований была разработка электродных материалов и технологии наплавки, позволяющих в условиях наплавочного термического цикла с использованием определенных технологических приемов (предварительного подогрева, отпуска и замедленного охлаждения после наплавки), а также модифицирующих добавок получать непосредственно в процессе наплавки металл типа графитизированной стали со свободными включениями графита.

На первом этапе исследовали наплавленный металл, по составу близкий к промышленным

маркам графитизированной стали. С этой целью были изготовлены порошковые проволоки различного состава, с использованием которых выполнена многослойная наплавка образцов под слоем флюса АН-26. Химический состав наплавленного металла и его твердость приведены в таблице.

Установлено, что непосредственно после наплавки мелкодисперсные включения графита наблюдались в металле, наплавленном опытной порошковой проволокой ПП-Оп-5, содержащем 1,6 мас. % С и 2,0 мас. % Si. Структура этого металла состоит из мартенсита (микротвердость HV 0,05 412...441), троостита (HV 0,05 362...383) и цементитных выделений, внутри которых образуется графит (рис. 1).

После отжига при 680 °С, выдержки 6 ч и охлаждения с печью (наиболее распространенный режим отжига графитизированных сталей) оказалось, что выделения графита появляются в металле еще двух типов, наплавленных порошковыми проволоками ПП-Оп-4 и ПП-Оп-6. Таким образом, эффект графитизации наплавленного металла наблюдается только при содержании в нем углерода и кремния соответственно не менее 1,50

**Химический состав и твердость наплавленного металла**

Опытная порошковая проволока	Химический состав, мас. %			HV	
	C	Si	Mn	после наплавки	после отжига*
ПП-Оп-1	0,94	1,00	1,27	45	25
ПП-Оп-2	0,95	1,40	0,50	40	26
ПП-Оп-3	1,40	0,86	1,19	47	30
ПП-Оп-4	1,50	1,15	0,60	43	26
ПП-Оп-5	1,60	2,00	0,55	43	20
ПП-Оп-6	1,80	1,46	0,58	49	20

\* Графитизирующий отжиг при 680 °С в течение 6 ч.

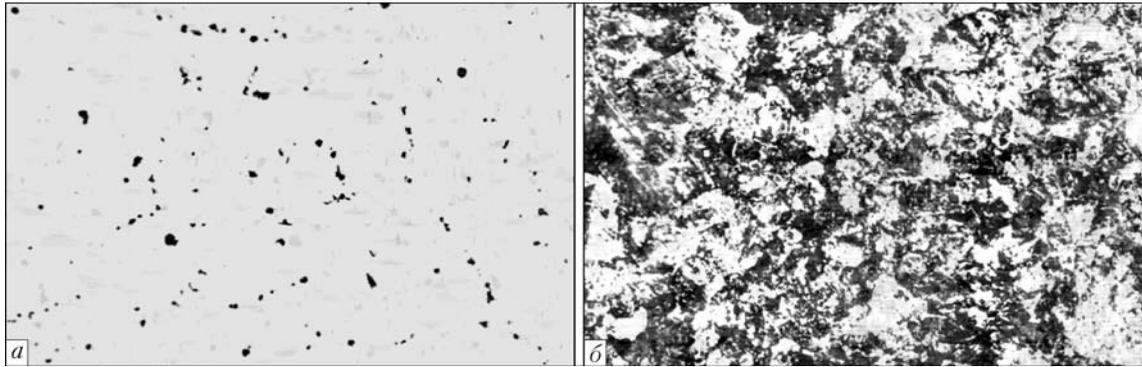


Рис. 1. Микроструктура (X400) металла с 1,6 мас. % С и 2,0 мас. % Si непосредственно после наплавки без травления (а) и с травлением в азотной кислоте (б)

и 1,15 мас. % соответственно и еще в большей степени — при увеличении массовой доли этих элементов. Структура металла, наплавленного проволоками ПП-Оп-4 и ПП-Оп-6, в исходном состоянии представляет собой бейнитно-мартенситную смесь и троостит (рис. 2, а, в), а структура металла указанных составов после отжига — сорбит отпуска, твердость которого возрастает с увеличением содержания углерода (твердость соответственно  $HV\ 0,05\ 185$  и  $303$ ), и включения графита (рис. 2, б, г).

Ввиду того, что у металла, наплавленного порошковыми проволоками ПП-Оп-5 и ПП-Оп-6, наблюдается повышенная склонность к образованию кристаллизационных трещин, что обусловлено высоким содержанием углерода и кремния, для дальнейших исследований выбран металл 150СГ, наплавленный порошковой проволокой

ПП-Оп-4. Эта проволока оказалась наиболее технологичной, она обеспечивала хорошие формирование наплавленного металла и отделимость шлаковой корки.

Проведены эксперименты по определению влияния режимов наплавки, а также вспомогательных технологических операций наплавки (предварительного подогрева, отпуска и замедленное охлаждение после наплавки) на процессы графитизации наплавленного металла 150СГ.

Исследовано влияние режимов наплавки порошковой проволокой ПП-Оп-4 под флюсом на структуру наплавленного металла как в исходном состоянии, так и после отжига. Наплавку выполняли на режимах, обеспечивающих плотность тока 55 и 100 А/мм<sup>2</sup>. При этом установлено, что режимы наплавки существенного влияния на процессы графитизации не оказывают, но увеличение

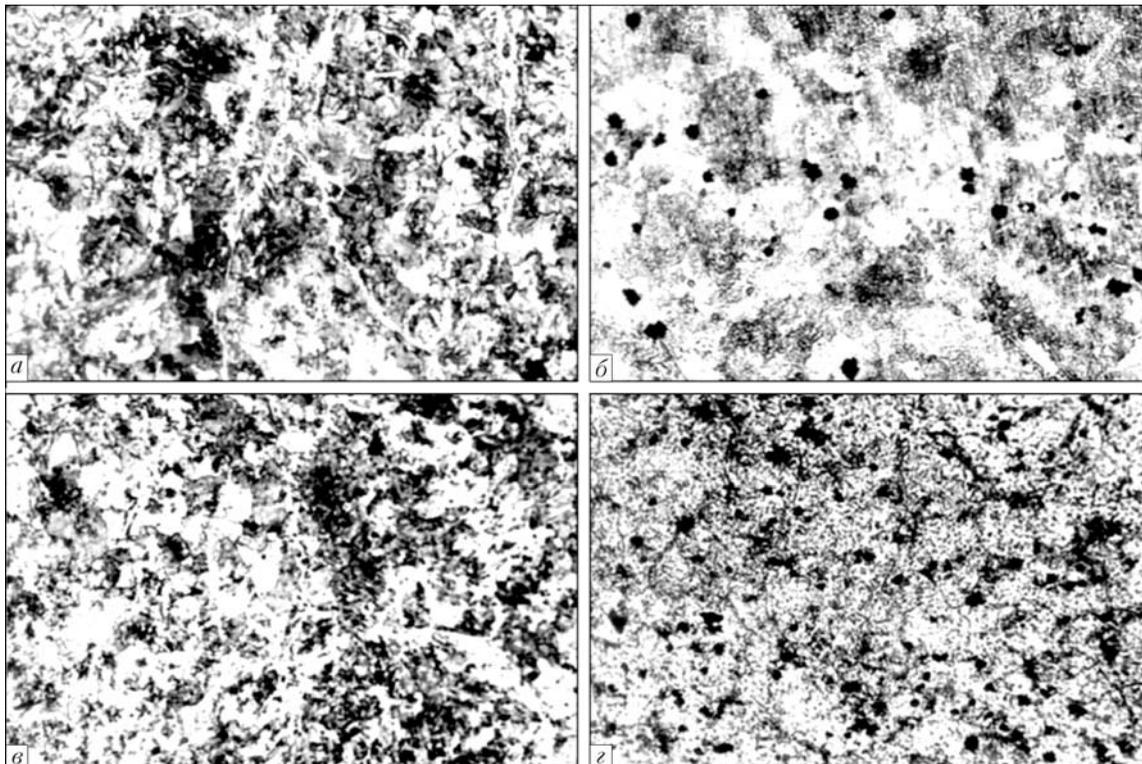


Рис. 2. Микроструктура (X400) металла с 1,50 мас. % С, 1,15 мас. % Si (а, б) и 1,80 мас. % С, 1,46 мас. % Si (в, г) после наплавки (а, в) и отжига при 680 °С в течение 2 ч (б, г) при травлении в азотной кислоте

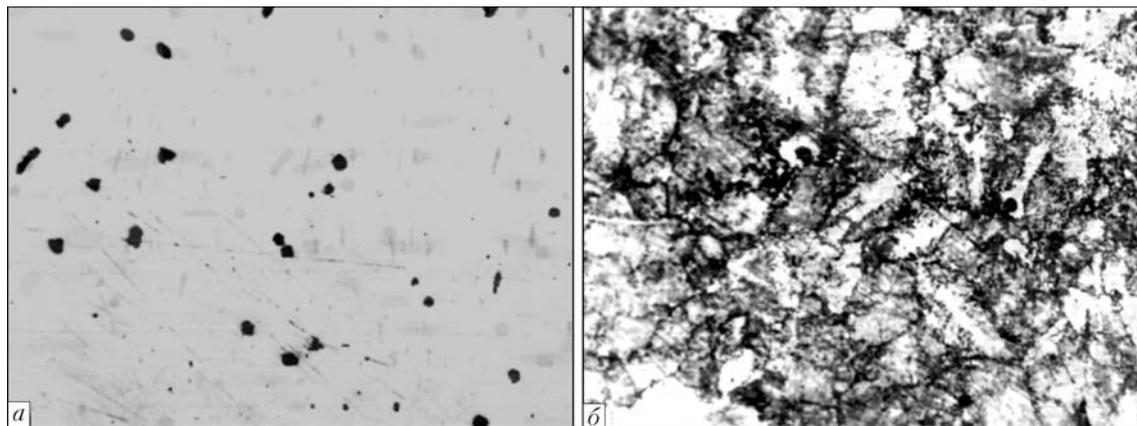


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 400$ ) металла с 1,50 мас. % С и 1,15 мас. % Si после отпуска при 400 °С в течение 2 ч без травления (а) и с травлением в азотной кислоте (б)

плотности тока приводит к укрупнению структуры наплавленного металла.

В технической литературе имеются данные о том, что в литых графитизированных сталях выделения графита могут появляться не только в результате специального графитизирующего отжига, но и частичной графитизации при медленном охлаждении отливок [3].

Известно, что наплавку большинства деталей осуществляют с предварительным подогревом и отпуском или замедленным охлаждением после наплавки в печах или термостатах. В печах наплавленная деталь выдерживается некоторое время при определенной температуре, а затем медленно охлаждается; в термостатах обеспечивается замедленное охлаждение без выдержки при определенной температуре [4]. Таким образом, процесс графитизации может быть совмещен со вспомогательными операциями наплавки.

При исследованиях были выбраны две температуры отпуска — 400 и 500 °С, при которых образцы выдерживали 2, 4 или 6 ч, а затем охлаждали с печью. Включения графита в наплавленном металле появляются уже при выдержке 2 ч с увеличением времени выдержки и температуры их объемная доля и размеры изменяются незначительно. Структуру наплавленного металла составляет сорбит (твердость  $HV 0,05 341...362$ ), по границам зерен образуется цементит ( $HV 0,05 700...705$ ), внутри которого формируются включения графита (рис. 3).

Таким образом, установлено, что отпуск после наплавки при 400 °С, 2 ч и последующее замедленное охлаждение обеспечивают графитизацию наплавленного металла типа заэвтектоидной стали 150СГ.

Как отмечено выше, обеспечить формирование включений графита в структуре заэвтектоидных сталей в процессе кристаллизации можно также за счет модифицирования. С этой целью широко применяют алюминий и кальций [3, 5–8]. Связывая азот и серу в устойчивые химические со-

единения, эти модифицирующие элементы не только облегчают формирование зародышей графита, но и создают благоприятные условия для ускорения диффузии углерода. Влияние модифицирующих добавок на процесс графитизации стали и чугуна объясняется также понижением устойчивости цементита, образованием дисперсных неметаллических включений и увеличением содержания углерода в аустените или в феррите вследствие понижения его растворимости в твердом растворе [3]. Влияние алюминия на процесс графитизации заэвтектоидной стали проявляется уже при содержании его 0,1 мас. %, при этом с повышением содержания алюминия объемная доля включений графита и их размер увеличиваются. Содержание кальция в графитизированной стали может достигать 0,05 мас. % [9].

В шихту опытных порошковых проволок вводили модификаторы в виде порошков алюминия и силикокальция марки СК30, доля которых не превышала 4 % массы порошковой проволоки. Химический состав полученного наплавленного металла следующий, мас. %: 1,5 С; 1,4 Si; 0,5 Mn. Суммарное содержание алюминия и кальция составляет 0,21 мас. %. Твердость наплавленного металла в исходном состоянии —  $HRC 42...43$ ; после отпуска при 400 °С в течение 2 ч —  $HRC 38...39$ .

При модифицировании наплавленного металла алюминием и кальцием в исходном состоянии на поверхности шлифа обнаружены выделения графита преимущественно шаровидной формы (рис. 4, а). Объемная доля включений графита достигает 0,7 %. После отпуска при 400 °С в течение 2 ч в наплавленном металле этого типа наряду с шаровидными появляются включения графита хлопьевидной формы (рис. 4, б), их объемная доля возрастает до 1,28 %. Структура металла состоит из троостита ( $HV 0,05 349...386$ ) с тонкими цементитными выделениями по границам зерен и небольшими участками перлита ( $HV 0,05 286...290$ ) (рис. 4, в). После отпуска

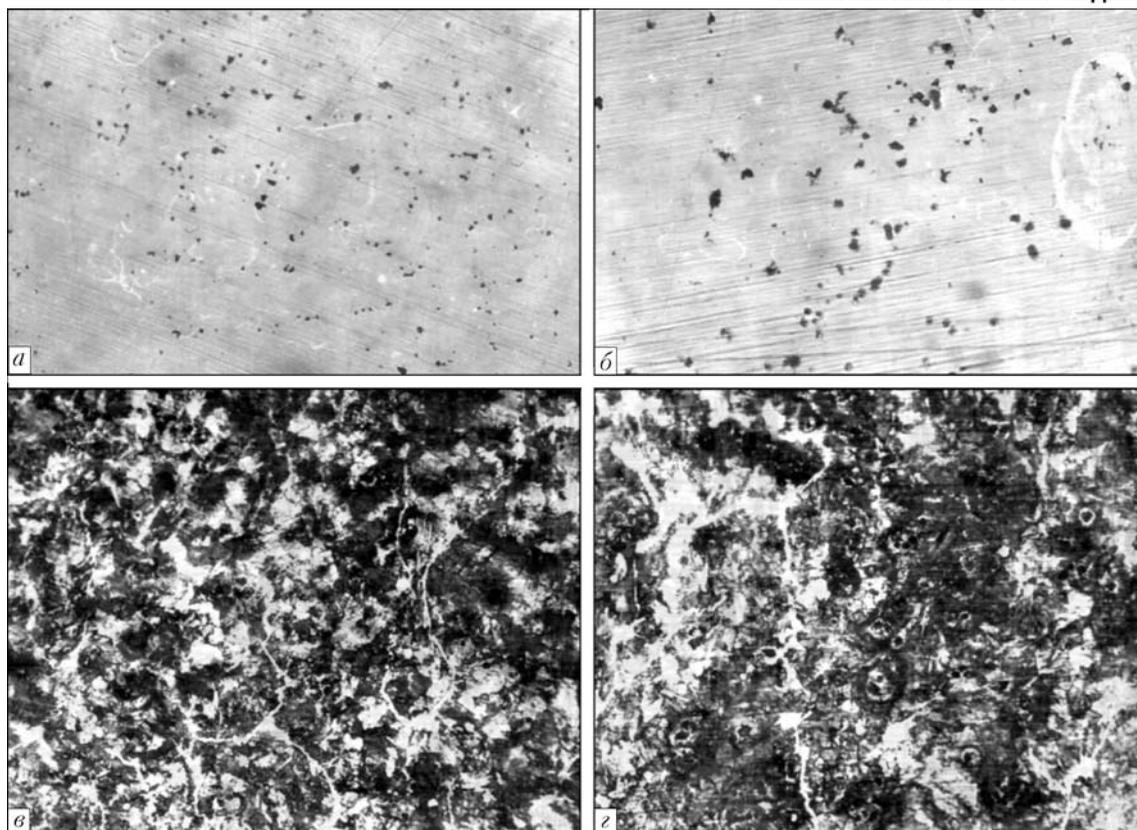


Рис. 4. Микроструктура (×400) металла с 1,50 мас. % С и 1,15 мас. % Si, модифицированного алюминием и кальцием непосредственно после наплавки (а, в) и отпуска 400 °С, 2 ч (б, г); а, б — без травления; в, г — травление в азотной кислоте

структура наплавленного металла состоит из троостита ( $HV 0,05\ 321...325$ ), перлита ( $HV 0,05\ 281...286$ ) и небольших цементитных выделений (рис. 4, г). Включения графита присутствуют во всех структурных составляющих.

### Выводы

1. После электродуговой наплавки под флюсом порошковыми проволоками в металле типа заэвтектоидной стали, содержащем не менее 1,6 % С и 2,0 % Si, образуются включения графита.

2. Для графитизации наплавленного металла, содержащего не менее 1,5 мас. % С и 1,1 мас. % Si, взамен высокотемпературного отжига рекомендуется применять следующую термообработку: непосредственно после наплавки деталь необходимо помещать в печь при 400 °С и после выдержки в течение 2 ч медленно охлаждать. Модифицирование наплавленного металла алюминием и кальцием позволяет активизировать процесс графитизации.

Studied is the structure of the deposited metal of the type of hypereutectoid graphitized steels and influence of various surfacing techniques on the graphitization process. It is established that for graphitization of the deposited metal containing not less that 1.5 wt. % C and 1.1 wt. % S, tempering at 400 C with soaking for 2 h and delayed cooling with the furnace should be applied directly after surfacing. Modifying the deposited metal by aluminium and calcium allows activation of the graphitization process.

1. Тодоров Р. П., Николов М. П. Структура и свойства отливок из графитизированной стали. — М.: Metallurgy, 1976. — 168 с.
2. Бубликов В. П. Модифицированная заэвтектоидная сталь с шаровидным графитом // Процессы литья. — 2002. — № 2. — С. 22–27.
3. Бунин К. П., Баранов А. А., Погребной Э. Н. Графитизация стали. — Киев: Изд-во АН УССР, 1961. — 86 с.
4. Рябцев И. А., Кондратьев И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. — Киев: Экотехнология, 1999. — 62 с.
5. Влияние модифицирования ферросилицием, силикобарием и силикокальцием на структурообразование литой графитизированной стали / В. Б. Бубликов, Д. С. Козак, Л. А. Зеленая, В. В. Ширяев // Процессы литья. — 2003. — № 4. — С. 29–35.
6. Тодоров Р. П. Графитизированные железоуглеродистые сплавы. — М.: Metallurgy, 1981. — 320 с.
7. Чернопол А. В., Геращенко Н. Я. О графитизирующем модифицировании магниевого чугуна // Металлы и литье Украины. — 1998. — № 3/4. — С. 24–28.
8. Кимстач Г. М. О модифицировании низкокремнистых графитизируемых Fe–C-сплавов // Литейное пр-во. — 1992. — № 8. — С. 5.
9. Получение чугуна с шаровидным графитом в наплавленном металле / Н. М. Ситник, П. М. Несвит, Ю. Ф. Гарцунов, Н. И. Каперсак // Там же. — 1973. — № 7. — С. 20–21.

Поступила в редакцию 16.01.2008