



ИЗНОСО- И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

И. А. РЯБЦЕВ, д-р техн. наук, **И. А. КОНДРАТЬЕВ**, канд. техн. наук, **В. В. ОСИН**, инж.,
Г. Н. ГОРДАНЬ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследована износостойкость наплавленного металла типа графитизированной стали при трении металла по металлу без смазки при комнатной и повышенной температуре, а также проведена оценка его термостойкости. Установлено, что металл, легированный 1,4...1,6 мас. % С и 1,5...2,0 мас. % Si, непосредственно после наплавки содержит оптимальное количество графитных включений, отличается высокой износостойкостью и имеет пониженный коэффициент трения при трении скольжения металла по металлу при комнатной температуре.

Ключевые слова: дуговая наплавка, наплавочные материалы, порошковые проволоки, графитизированные стали, износ- и термостойкость

К графитизированным железоуглеродистым сплавам относят стали и чугуны, в структуре которых имеются свободные включения графита различной формы [1]. Применение таких материалов является одним из путей улучшения триботехнических характеристик деталей пар трения и некоторых типов штампового инструмента, в частности, штампов глубокой вытяжки. В данном случае включения графита играют роль твердой смазки.

Ранее было показано [2], что наплавленный металл типа графитизированной стали можно получить при содержании углерода свыше 1,6 мас. % и кремния свыше 2,0 мас. %. Для графитизации наплавленного металла с содержанием не менее 1,5 мас. % С и 1,1 мас. % Si взамен высокотемпературного отжига рекомендовано применять термообработку: непосредственно после наплавки деталь помещают в печь при температуре 400 °С, а после выдержки в течение 2 ч медленно охлаждают. Модифицирование наплавленного металла алюминием и кальцием позволяет активизировать процесс графитизации.

Целью настоящей работы является исследование износостойкости наплавленного металла типа графитизированной стали при трении металла по металлу без смазки при комнатной и повышенной температуре, а также оценка его термической стойкости. Была выполнена многослойная наплавка образцов под слоем флюса АН-26 с использованием трех опытных порошковых проволок. Химический состав наплавленного металла и его твердость после наплавки и отжига приведены в табл. 1.

Исследования износостойкости и термической стойкости осуществляли на

блочной-модульной установке, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона [3].

Исследования износостойкости наплавленного металла при трении металла по металлу при комнатной температуре проводили на модуле трения испытательной установки, который дополнительно оснащен системой позиционирования образцов относительно вращающегося вала-контртела. Испытания проводили по методу вытирания лунок по схеме вал–плоскость без дополнительной подачи смазки в зону трения.

Вал-контртело диаметром 40 мм и высотой 12 мм изготовлено из стали 45 с твердостью HRC 42. Исследуемые образцы размером 3×15×25 мм вырезали из наплавленного металла таким образом, чтобы испытываемая плоскость образца попала в верхние слои наплавленного металла (рис. 1). В качестве эталона использовали образцы наплавленного металла (сталь типа 20ХГС), полученного с использованием порошковой проволоки ПП-АН194.

В процессе испытаний образец прижимали с определенным усилием к контртелу плоскостью, имеющей в плане размер 3×25 мм. Выбран следующий режим испытаний: скорость скольжения

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

Марка порошковой проволоки	Массовая доля элементов					HRC	
	C	Si	Mn	Al	Ca	после наплавки	после отжига
ПП-Нп-Оп-1	1,5	1,15	0,60	—	—	43	26
ПП-Нп-Оп-2	1,8	1,46	0,58	—	—	49	20
ПП-Нп-Оп-3	1,5	1,45	0,49	0,09	0,02	43	38

Примечание. Металл, наплавленный проволокой ПП-Нп-Оп-3, подвергали отжигу при температуре 400 °С в течение 2 ч, остальной металл — отжигу при температуре 680 °С в течение 6 ч.

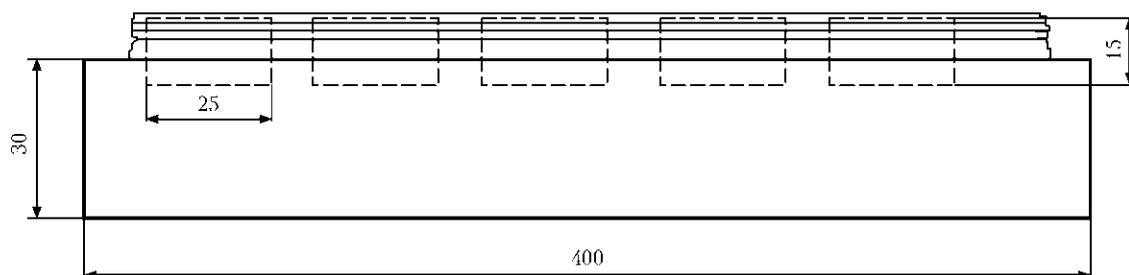


Рис. 1. Схема вырезки образцов для триботехнических исследований наплавленного металла

1 м/с; нагрузка 30 Н; частота вращения вала-контртела 30 об/мин; путь трения 113 м. Такой режим обеспечивает стабилизацию триботехнических характеристик всех исследуемых образцов. Использование системы позиционирования позволило провести испытание каждого наплавленного образца не менее трех раз на новом участке поверхности трения образца и дорожке трения контртела.

При испытаниях наплавленного образца определяли силу трения, износ наплавленного образца по объему вытертой лунки и контртела по разнице его массы до и после испытания. Коэффициент трения рассчитывали как частное от деления значения силы трения на нагрузку с погрешностью не более 5 %.

Износ *m* контртела определяли по потере его массы в результате испытаний с погрешностью не более 0,0005 г. Погрешность определения износа образца и контртела не превышала 1 %.

Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 2. Наилучшую износостойкость имели образцы металла, наплавленного опытными порошковыми проволоками ПП-Нп-Оп-1 и ПП-Нп-Оп-2, у которых отмечено оптимальное сочетание твердости и свободных включений графита [2]. Термическая обработка способствовала увеличению содержания свободных включений графита в структуре наплавленного металла [2], однако одновременно она понижала его твердость, а соответственно и износостойкость наплавленного металла обоих исследуемых типов.

Металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-Нп-Оп-3 с модифицирующими добавками

алюминия и кальция, также характеризовался достаточно высокой износостойкостью. Отжиг при 400 °С в течение 2 ч привел к понижению твердости и износостойкости наплавленного металла этого типа.

Графитизированные стали по сравнению с низколегированной сталью 20ХГС имеют более низкий коэффициент трения и чем больше включений графита образуется в структуре стали в результате отжига, тем ниже значение коэффициента трения. Добавка кальция и алюминия позволяет понизить температуру графитизирующего отжига и коэффициент трения металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-Оп-3, значение которого после отжига при 400 °С находится на одном уровне со значением коэффициента трения обычных графитизированных сталей после отжига при более высоких температурах.

Испытания износостойкости наплавленного металла типа графитизированная сталь при трении металла по металлу при высокой температуре проводили по схеме вал–плоскость без дополнительной подачи смазки в зону трения. Для сравнения в качестве эталона испытывали образцы, наплавленные порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМГС.

Из наплавленных темплетов изготавливали образцы размером 40×10×17 мм, при этом площадь плоскости трения составлял 10×40 мм, а толщина наплавленного слоя — 8...10 мм.

Истирающее кольцо нагревали газокислородным пламенем. Благодаря строго определенному расходу природного газа и кислорода температуру истирающего кольца поддерживали постоянной

Таблица 2. Износостойкость наплавленного металла типа графитизированной стали при комнатной температуре

Марка порошковой проволоки	Термическая обработка	Износ образца, мм ³ /км	Износ контртела, г/км	Коэффициент трения
ПП-Нп-Оп-1	Непосредственно после наплавки	0,00203	0,00205	0,62
	То же после отпуска при 680 °С, 6 ч	0,06020	0,00210	0,57
ПП-Нп-Оп-2	Непосредственно после наплавки	0,00204	0,00207	0,60
	То же после отпуска при 680 °С, 6 ч	0,07230	0,00101	0,51
ПП-Нп-Оп-3	Непосредственно после наплавки	0,00302	0,00310	0,59
	То же после отпуска при 400 °С, 2 ч	0,00801	0,00204	0,52
ПП-АН194 (эталон)	Непосредственно после наплавки	0,08900	0,00450	0,65



Таблица 3. Износостойкость наплавленного металла типа графитизированной стали при повышенной температуре

Марка порошковой проволоки	Термическая обработка	Износ $m \cdot 10^4$, кг/км	
		образца	контртела
ПП-Нп-Оп-1	Непосредственно после наплавки	16,579	+17,452
	То же после отжига при 680 °С, 6 ч	29,602	59,488
	То же после отжига при 400 °С, 2 ч	23,352	36,879
ПП-Нп-Оп-2	Непосредственно после наплавки	12,723	89,562
	То же после отжига при 680 °С, 6 ч	25,945	132,765
	То же после отжига при 400 °С, 2 ч	15,132	93,453
ПП-Нп-Оп-3	Непосредственно после наплавки	7,984	168,656
	То же после отжига при 400 °С, 2 ч	7,277	147,761
ПП-Нп-25X5ФМГС (эталон)	Непосредственно после наплавки	4,287	142,102

Примечание. + означает увеличение массы контртела в результате налипания металла.

(950...980 °С) и периодически контролировали с помощью оптического пирометра.

Испытания на износ при трении металла по металлу при повышенной температуре проводили в течение 1 ч при нагрузке 175 Н; скорость вращения кольца-контртела составляла 30 об/мин. В качестве контртела использовали кольца диаметром 120 мм из закаленной стали 45. Температура поверхности испытуемого образца в зоне истирания была равна приблизительно 600 °С. Во время испытаний образец совершал возвратно-поступательные движения в вертикальной плоскости с амплитудой колебаний 20 мм и частотой колебаний 62 мин⁻¹. Результаты испытаний (среднее значение по трем образцам) приведены в табл. 3.

Испытания показали, что износостойкость металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-Оп-1, не подвергнувшегося термообработке, выше, чем у металла, прошедшего отжиг, что можно объяснить существенным снижением твердости в результате отжига. Следует отметить, что наличие большого количества свободного графита в структуре наплавленного металла этого типа препятствует переносу и налипанию металла на контртело. Снижение температуры термообработки понижает износ наплавленных образцов и контртел, однако этот показатель остается более высоким, чем у образцов непосредственно после наплавки.

Несколько лучшие показатели износостойкости имел металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-Нп-Оп-2. Металл, модифицированный алюминием и кальцием, после наплавки или низкотемпературного отжига характеризуется высокой износостойкостью, которая находится на уровне износостойкости известной хромомолибденовой штамповой стали 25X5ФМГС.

Термостойкость является одним из важнейших показателей материалов, предназначенных для

восстановления и упрочнения инструментов для горячего деформирования металлов. Методика испытаний должна предусматривать оптимальные размеры и форму наплавленного образца, температуру и скорости его нагрева и охлаждения, близкие к эксплуатационным показателям, состояние окружающей среды и т. п. В первую очередь образец должен иметь достаточную массу, чтобы в процессе его нагрева был обеспечен градиент температур, имитирующий натурные условия.

Испытания термостойкости наплавленных образцов производили по следующей методике: размер образца 30×40×40 мм, нагрев наплавленной поверхности образца газовым резаком до 800 °С (пятно нагрева 15 мм, нагреваемая поверхность образца размером 40×40 мм), охлаждение нагретой поверхности струей воды до 60 °С. Циклы нагрев–охлаждение повторяли до появления видимой невооруженным глазом сетки трещин разгара. Оценку термостойкости выполняли исходя из количества циклов нагрев–охлаждение до появления первых трещин и достижения определенной степени растрескивания — появления сетки трещин разгара. Результаты испытаний (средние по 3–5 образцам каждого типа наплавленного металла и вида термической обработки) приведены в табл. 4.

Лучшие показатели термической стойкости у металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-Оп-1, несколько ниже у наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-Оп-2, и хуже всего у наплавленного ПП-Нп-Оп-3. При этом сетка трещин разгара у образцов, наплавленных порошковыми проволоками ПП-Нп-Оп-1 и ПП-Нп-Оп-2, значительно менее развита, чем у наплавленных порошковой проволокой ПП-Нп-Оп-3.

Исследовали структуру металла образца, наплавленного проволокой ПП-Нп-Оп-3 после испытаний термостойкости (80 циклов) (рис. 2). На



Таблица 4. Результаты испытаний на термостойкость наплавленного металла типа графитизированной стали

Марка порошковой проволоки	Термическая обработка	Количество циклов и нагрев-охлаждение	
		до появления первых трещин	до появления сетки трещин разгара
ПП-Нп-Оп-1	Непосредственно после наплавки	5	240
	То же после отжига при 680 °С, 6 ч	3	190
	То же после отжига при 400 °С, 2 ч	5	210
ПП-Нп-Оп-2	Непосредственно после наплавки	8	180
	То же после отжига при 680 °С, 6 ч	4	140
	То же после отжига при 400 °С, 2 ч	7	160
ПП-Нп-Оп-3	Непосредственно после наплавки	4	110
	То же после отжига при 400 °С, 2 ч	5	80

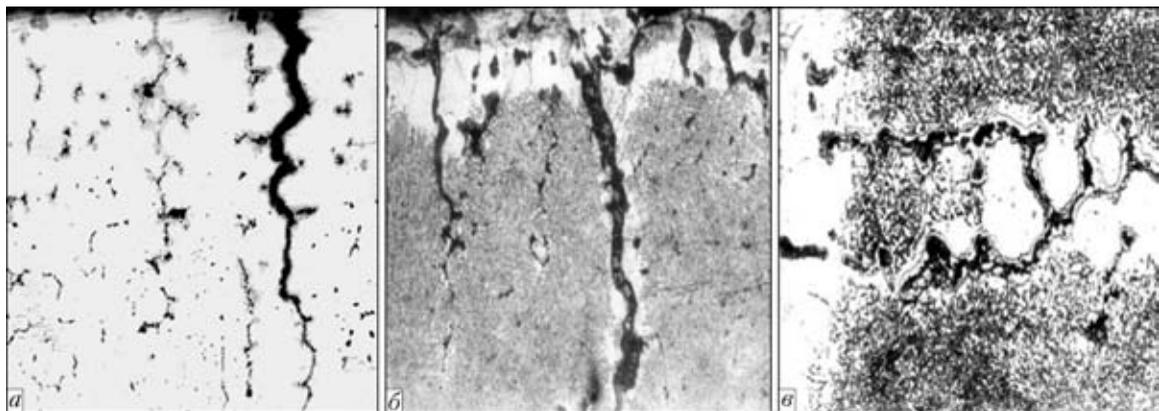


Рис. 2. Микроструктуры наплавленного металла, полученного с использованием порошковой проволоки ПП-Нп-Оп-3: а — шлиф без травления (поверхностный слой), $\times 250$; б — то же с травлением в азотной кислоте, $\times 200$; в — центральная зона шлифа образца с травлением в азотной кислоте, $\times 500$

нетравленном шлифе имеют место многочисленные трещины, максимальная глубина которых достигает 1500 мкм (рис. 2, а). После травления в азотной кислоте обнаружено поверхностное обезуглероживание последнего слоя наплавленного металла (рис. 2, б) на глубину до 250 мкм. Обезуглероживанный слой имеет микротвердость $HV_{0,5}$ 1680 МПа, в то время как твердость близлежащих необезуглероживанных участков составляет $HV_{0,5}$ 3030...3680 МПа. В металле исследуемого образца образовались скопления включений темносерого цвета (предположительно это графит), которые располагаются по границам ферритных зерен и имеют твердость $HV_{0,5}$ 1480 МПа (рис. 2, в).

С целью определения причин более раннего появления сетки трещин разгара проведено микрорентгеноспектральный анализ образца, наплавленного проволокой ПП-Нп-Оп-3, после испытаний на термостойкость. Исследования проводили на глубине примерно 1,5 мкм от поверхности наплавки параллельно ей в автоматическом режиме с интервалом 1,02 мкм вдоль фронта трещины разгара (рис. 3).

Установлено, что вблизи трещин разгара содержание углерода, алюминия и кальция резко

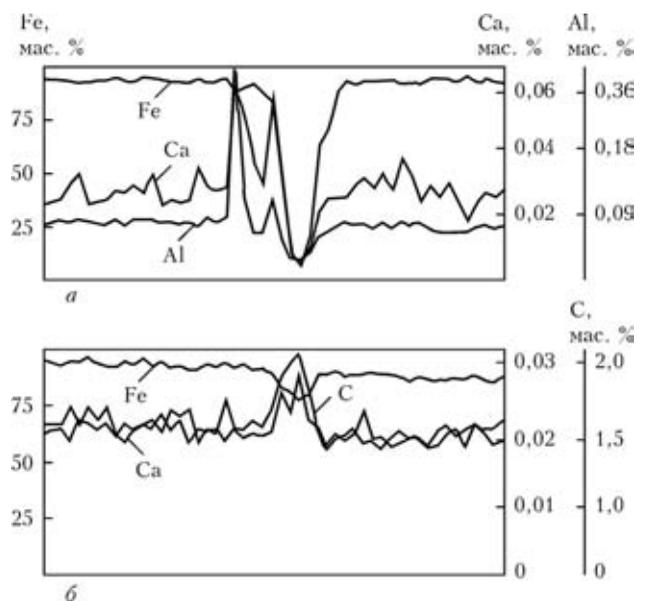


Рис. 3. Распределение основных легирующих элементов Ca, Al (а) и Ca, С (б) в наплавленном металле, полученном с использованием порошковой проволоки ПП-Нп-Оп-3

возрастает. Это позволяет предположить, что трещины разгара проходят по включениям свободного графита, появлению которых способствовало



модифицирование наплавленного металла алюминием и кальцием. В наплавленном металле в зоне трещин массовая доля элементов изменяется в следующих пределах, %: 0,2...9,6 C; 0,23...2,44 Al; 0,01...0,319 Ca; 1,48...1,99 Si; 0,137...0,66 Mn.

Установлено, что металл, легированный 1,4...1,6 мас. % C и 1,5...2,0 мас. % Si, непосредственно после наплавки имеет оптимальное содержание включений графита и отличается высокой износостойкостью при трении скольжения металла по металлу при комнатной температуре. Проведение дополнительной термической обработки с целью увеличения содержания включений графита для повышения износостойкости, по-видимому, нецелесообразно. По сравнению с низколегированной сталью 20ХГС графитизированные стали имеют более низкий коэффициент тре-

ния. Чем больше включений графита в структуре стали, тем ниже коэффициент трения. Исследования термостойкости наплавленного металла типа графитизированной стали показали, что такой металл следует применять для упрочнения деталей и инструментов, которые подвергаются умеренным циклическим, термическим и силовым воздействиями.

1. *Тодоров Р. П., Николов М. П.* Структура и свойства отливок из графитизированной стали. — М.: Металлургия, 1976. — 168 с.
2. *Структура наплавленного металла типа графитизированных заэвтектоидных сталей / И. А. Кондратьев, И. А. Рябцев, И. Л. Богайчук, Д. П. Новикова // Автомат. сварка. — 2008. — № 7. — С. 20–24.*
3. *Рябцев И. И., Черняк Я. П., Осин В. В.* Блочная установка для испытаний наплавленного металла // Сварщик. — 2004. — № 1. — С. 18–20.

Wear resistance of deposited metal of the graphitised steel type in metal on metal friction without lubrication at room and elevated temperatures was investigated, and its heat resistance was evaluated. It was established that the as-deposited metal alloyed with 1.4-1.6 wt. % C and 1.5...2.0 wt. % Si contains the optimal amount of graphite inclusions, is characterised by high wear resistance, and has a decreased friction coefficient in metal on metal sliding friction at room temperature.

Поступила в редакцию 31.03.2011

**Вышел в свет очередной выпуск журнала
Weld+Vision № 26 (апрель 2011) на русском языке
(издатель — «Фрониус Украина»)**

Содержание

Титульная статья

От большого взрыва до свободной энергии

Коллектив НИОКР

Режим экономии энергии в сочетании с предельной мощностью Система Robacta TX самостоятельно производит смену корпуса горелки

Шланг для подачи проволоки на роликах

Коротко о главном

Новости компании Fronius

Примеры применения

Система СМТ Advanced принимает вызов — сварка алюминия

10-кратный ресурс подрядчика Contec

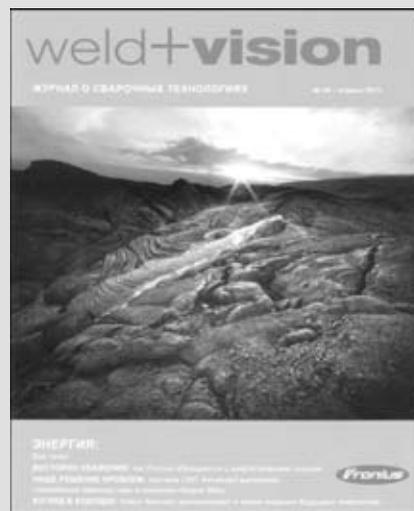
Сталь для «прыжка»

Компания

В фокусе — смена энергии

Путешествия

«Город ангелов» в Мексике



**Бесплатную подписку можно оформить в редакции
«Автоматическая сварка»**