



УДК 669.117.56

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ПЛАВКИ БЫВШЕГО В УПОТРЕБЛЕНИИ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

А. Г. Богаченко, В. И. Галинич, И. А. Нейло,
Д. Д. Мищенко, И. А. Гончаров, В. Я. Маркив,
Н. Н. Белявина, В. Г. Кудин, В. С. Судавцова

Исследовано поведение WC и Co при электрошлаковом кокильном литье б/у бурового инструмента. Показано, что при нагреве расходоуемого электрода до 1150...1200 °C окисляется незначительная часть WC и Co (до 10 %). Установлено, что меньший угар WC и Co происходит при «горячей плавке», соответствующей параметру 1,2...1,4 кВт/кг/мин. Оптимизированы технологические параметры плавки, обеспечивающие уменьшение окисления (угара) WC и Co при получении экономнолегированных сталей для литых корпусов бурового инструмента.

Behavior of WC and Co in electroslag chill casting of used drilling tool was investigated. It is shown that during heating of consumable electrode up to 1150...1200 °C a negligible part of WC and Co is oxidized (up to 10 %). It was found that lower fumes of WC and Co are occurred in «hot melting» corresponding to parameter 1.2...1.4 kW/kg/min. Technological parameters of melting providing the reduction of oxidation (fume) of WC and Co in producing scarcely alloyed steels for cast bodies of drilling tool are optimized.

Ключевые слова: экономнолегированная сталь; буровая коронка; твердосплавная вставка; карбид вольфрама; «тепловой удар»; электрошлаковое кокильное литье; окисление; шпинель; припой

Объемы работ, связанных с разрушением различных горных пород в Украине, очень большие. В последнее время годовая потребность отечественных предприятий только в буровых коронках составляет несколько сотен тысяч штук. Поставщики буровых коронок — предприятия Украины, а также России, Китая, Швеции и других стран [1].

Обязательными конструктивными элементами буровой коронки являются твердосплавные вставки, изготавливаемые путем спекания порошка карбида вольфрама на кобальтовой основе (система WC-Co), а также стальной корпус, выполненный из различных конструкционных или инструментальных сталей. Соединение этих элементов осуществляется способами пайки или прессования. Буровая коронка работает в очень жестких условиях. Следует отметить, что в процессе бурения коронка совершает до 1200 ударов в минуту по породе высокой твердости, совершая при этом 40...120 оборотов. Поэтому стальной корпус должен отличаться высоким

уровнем физико-механических свойств и их изотропностью, обуславливающих его достаточные циклическую и конструктивную прочность, износостойкость, низкую склонность к хрупкому разрушению и т. п.

Таким требованиям удовлетворяют корпуса из легированных конструкционных и инструментальных сталей типа 18X2H4B(M)A, 20...25XH3MA, 38XH3MFA и др. Важной особенностью этих сталей применительно к буровым коронкам и другому породоразрушающему инструменту является их способность к закалке при медленном охлаждении. Однако эти стали содержат дефицитные никель, вольфрам, молибден, ванадий и поэтому очень дорого стоят.

В Украине в последние годы для корпусов коронок широко используется сталь типа 35XГСА, которая в 2...3 раза дешевле указанных сталей. В то же время эта сталь при производстве паяного бурового инструмента отличается существенным недостатком — она приобретает оптимальные физико-механические свойства (в том числе твердость HRC 42...48) только при изотермической закалке в щелочи. При такой закалке с очень резким охлаждением в диапазоне 900...300 °C (сразу после

© А. Г. БОГАЧЕНКО, В. И. ГАЛИНИЧ, И. А. НЕЙЛО, Д. Д. МИЩЕНКО, И. А. ГОНЧАРОВ, В. Я. МАРКИВ, Н. Н. БЕЛЯВИНА, В. Г. КУДИН, В. С. СУДАВЦОВА, 2012

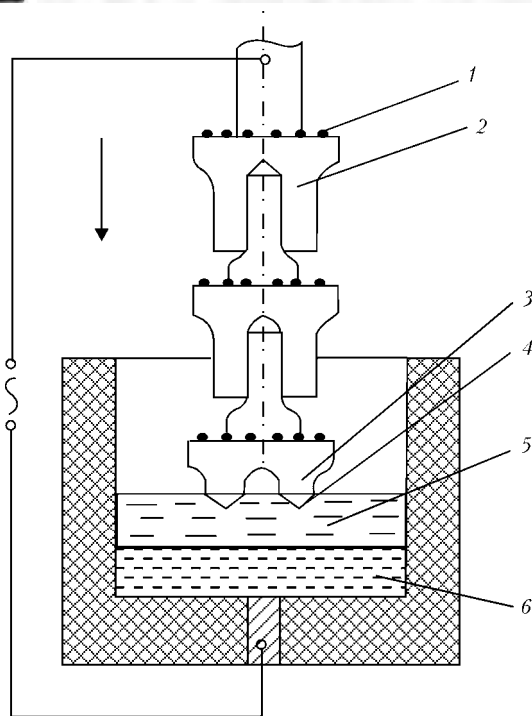


Рис. 1. Основные температурные зоны при ЭКЛ: 1, 2 – соответственно твердосплавные вставки и корпуса б/у инструмента из стали 35ХГСА, составляющие расходный электрод; 3 – нижняя часть электрода ($T = 1150...1200\text{ }^{\circ}\text{C}$); 4 – переходная зона электрод–шлак ($T = 2000...2100\text{ }^{\circ}\text{C}$); 5 – шлаковая ванна ($T = 1700...1800\text{ }^{\circ}\text{C}$); 6 – металлическая ванна ($T = 1550...1600\text{ }^{\circ}\text{C}$)

пайки) твердосплавные вставки получают «тепловой удар», вследствие чего их конструктивная прочность снижается в 2... 4 раза [2]. Поэтому каждый производитель, использующий сталь 35ХГСА или другие низколегированные стали типа 40Х, выбирает для себя компромиссные решения между стоимостью коронок и их эксплуатационными характеристиками.

Таким образом, задача создания и производства новых экономнолегированных (недорогих) сталей, имеющих свойства стандартных легированных сталей, весьма актуальна для украинских производителей бурового инструмента.

В ИЭС им. Е. О. Патона предложен и успешно опробован способ получения экономнолегированных сталей на основе электрошлакового кокильного литья (ЭКЛ) расходного электрода, набранного из бывшего в употреблении (б/у) бурового инструмента вместе с твердосплавными вставками и корпусами из стали 35ХГСА. При этом обеспечивается получение гаммы принципиально новых сталей уже инструментального класса, легированных вольфрамом и углеродом из твердосплавных вставок (системы легирования С–Si–Mn–Cr–W). Эти стали способны к закалке при медленном охлаждении, в том числе на воздухе [1]. Данной системе легирования близки по свойствам инструментальные штамповые стали типа 5ХГСА, 5ХГСВФ, 5ХГСФМ, 6ХВГ, 6ХГСФ, 5ХГМ, 4ХГСФМ и др. [3]. В их состав входят вольфрам, молибден, ванадий, хром, карбиды которых обеспечивают высокие прочностные показатели, твердость и требуемые эк-

Таблица 1. Среднее содержание основных компонентов в твердосплавных вставках В-20, мас. %

Co	WC	При WC, 90 %		Размер, мкм	Ti/TaNbC
		W	C		
10	90	84,6	5,4	4	< 0,20

сплуатационные характеристики соответствующих изделий.

В работе по созданию экономнолегированных сталей приняты следующие предпосылки и исходные данные.

Твердосплавные вставки изготавливают способом спекания порошков карбида вольфрама при температуре 1320... 1480 °С. Содержание кобальта в наиболее распространенных твердых сплавах составляет 6... 15 %. Ориентировочная температура плавления кобальтовой фазы с примесями – 1350 °С [4]. Следовательно, для расплавления кобальтовой фазы, распада твердосплавной вставки и последующего легирования стали вольфрамом и углеродом при ЭКЛ, необходима температура примерно 1400 °С.

Основные температурные зоны при ЭКЛ приведены на рис. 1. Из этого рисунка следует, что уже в нижней части электрода, вблизи поверхности шлаковой ванны, его температура близка к 1200 °С. На границе раздела электродной металлической пленки и шлака зафиксированы пик температуры, его скачкообразное повышение до 2000... 2100 °С. При этом температура шлаковой ванны составляет 1700... 1800 и металлической – 1550... 1600 °С [5, 6]. Приведенные данные свидетельствуют о гарантированном плавлении кобальтовой связки и высвобождении частиц карбида вольфрама при ЭКЛ. Важно отметить в качестве положительного фактора, характерного для электрошлаковой плавки с расходным электродом, постепенный, развитый во времени, процесс нагрева твердосплавных вставок и корпусов из стали 35ХГСА до температуры 1150... 1200 °С и затем их быстрое плавление в высокотемпературных шлаковой и металлической ваннах. Это коренным образом отличает ЭКЛ от индукционной и электродуговой плавки, которые, по нашему мнению, не могут быть успешно использованы для получения новых экономнолегированных сталей путем переplava б/у инструмента.

Опытные плавки при разработке технологии выплавки и разлива новых сталей выполняли на установке типа УШ-159, имеющей трансформатор мощностью 140 кВ·А и обеспечивающей накопление в тигле 40... 60 кг жидкой стали. Для переplava использовали б/у коронки с корпусами из стали 35ХГСА и твердосплавными вставками типа В-20 (ВК-10В). Основные параметры вставок приведены в табл. 1.

По данным табл. 1 и химическому составу стали 35ХГСА рассчитывали состав расходного электрода по количеству б/у коронок и твердосплавных



Таблица 2. Массовая доля легирующих элементов в новых сталях ЭКЛ, %

Вариант	W	Co	C	Si	Mn	Cr
1*	$\frac{3,5...0,33}{1,4}$	$\frac{0,26...0,042}{0,12}$	$\frac{0,65...0,37}{0,46}$	$\frac{1,36...0,90}{1,15}$	$\frac{1,1...0,85}{1,02}$	$\frac{1,3...1,09}{1,15}$
2**	$\frac{19,0...4,83}{9,7}$	$\frac{15,4...4,8}{10,1}$	$\frac{16,9...3,4}{9,4}$	—	—	—

*В числителе указаны максимальные и минимальные, в знаменателе — средние значения содержания элементов.
 ** В числителе приведены максимальные и минимальные, в знаменателе — средние значения угара элементов.

вставок с целью обеспечения требуемого содержания вольфрама и углерода в жидкой стали.

В ходе 19 плавов получены экспериментальные стали системы C–Si–Mn–Cr–W в виде литых заготовок корпусов буровых коронок с широким диапазоном содержания каждого легирующего элемента с целью последующих испытаний и исследований этих сталей. Однозначно установлено, что вольфрам, углерод и кобальт в объеме отливки распределяются равномерно. Предельные и средние значения каждого из этих элементов указаны в табл. 2.

В табл. 2 также приведены данные по угару вольфрама, углерода, кобальта, составляющих твердосплавных вставок. Обращает внимание большой разброс показателей угара для каждого из этих элементов. Поэтому мы попытались оценить термодинамические особенности их поведения в условиях электрошлаковой плавки, исходя из того, что термическая диссоциация, требующая достижения значения температуры примерно 2600 °С, в условиях электрошлаковой плавки невозможна [4, 7, 8].

$$WC = [W] + [C].$$

Поэтому в данном случае необходимы обменные реакции между карбидом вольфрама и составляющими шлаковой и металлической ванн. При этом указанные реакции должны протекать с образованием газообразных соединений или конденсированных фаз. В металлической ванне нет элементов, которые могут участвовать в обменных реакциях с карбидом вольфрама. Следовательно, вероятным может быть окисление карбида вольфрама в результате взаимодействия его с кислородом атмосферы и шлаковой ванны в процессе электрошлаковой плавки. Для исследования этого явления нами использован дериватограф Q-1500, в котором размеры тигля, используемого для загрузки материала, близки к размерам твердосплавной вставки, впаянной в корпус буровой коронки (рис. 2).

Существенное различие состоит в том, что площадь поверхности частиц WC–Co, контактирующих с атмосферой в тигле, значительно превышает аналогичную площадь (верхняя часть

Таблица 3. Химический состав флюса АН-295 по ТУ14-1-165-72

Массовая доля компонентов, %				
CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO
11...17	49...56	26...31	Не более 2,5	Не более 2,5

вставки) при том, что боковая и нижняя поверхности вставки достаточно плотно закрыты припоем и корпусом коронки.

Исследования проводили на дробленых образцах массой 3,0...3,5 г, которые нагревали с максимальной возможной скоростью (15 °С/мин) до 1450...1520 °С. Опыты выполняли по двум вариантам. Первый предусматривал нагрев образцов без флюса (образец № 1), второй (образец № 2) — под флюсом АН-295, представляющим собой фторидно-оксидную систему с основностью около единицы и температурой плавления ориентировочно 1350 °С. Химический состав флюса АН-295 по ТУ 14-1-165-72 приведен в табл. 3. Дериватограмма нагрева образца № 1 представлена на рис. 3.

По кривой TG на рис. 3 видно, что окисление образца (увеличение его массы) происходит в диапазоне температур примерно 200...1350 °С.

Для определения типа и свойств продуктов окисления образец после эксперимента исследовали на

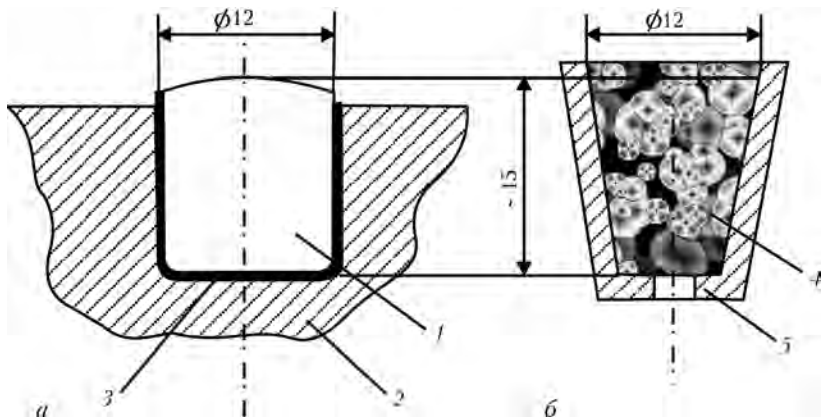


Рис. 2. Геометрические параметры отработавших монолитной (а) и дробленой (б) твердосплавных вставок типа В-20 в тигле дериватографа: 1 — твердосплавная вставка; 2 — корпус буровой коронки; 3 — припой Л-63; 4 — дробленая твердосплавная вставка; 5 — корпус тигля дериватографа Q-1500

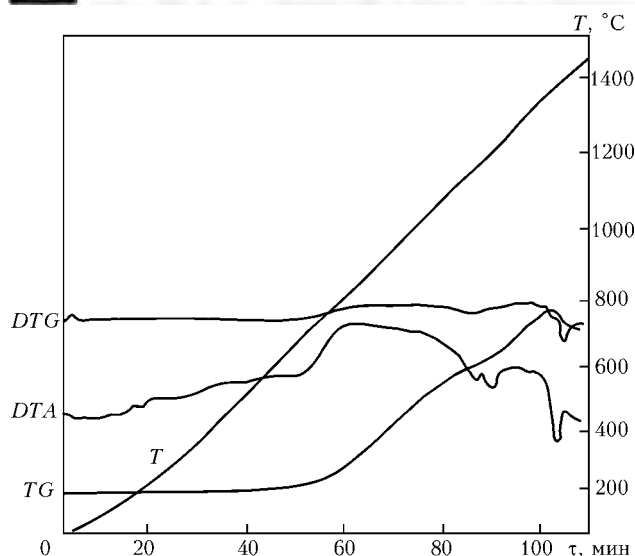
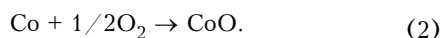
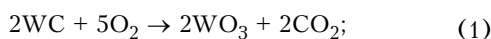


Рис. 3. Дериватограмма, полученная при нагреве образца № 1: T – изменение температуры при нагреве; TG – изменение массы; DTA – тепловой эффект (энтальпия); DTG – скорость изменения массы; τ – время нагрева

дифрактометре ДРОН-3 с использованием монокромического $Cu-K_{\alpha}$ излучения.

Установлено, что на поверхности частиц образуется 73 % шпинели $CoWO_4$ в и 27 % WO_3 . Вероятно, в процессе нагрева твердосплавной вставки происходит окисление WC и Co по следующим реакциям:



В твердосплавной вставке количество вольфрама значительно больше, чем кобальта (табл. 1). Поэтому весь CoO уйдет на взаимодействие с WO_3 с образованием шпинели $CoWO_4$. При этом 27 % WO_3 остается в свободном виде. Важно отметить, что кобальт не окисляется до Co_2O_3 , поскольку образующиеся CoO и WO_3 , находясь в активном состоянии, реагируют с образованием шпинели $CoWO_4$. Это подтверждается тем, что ни CoO , ни Co_2O_3 в шлаке после переплава не обнаружены.

Согласно значениям кривой TG рассчитано изменение относительной массы образца ($\alpha = \Delta m / m$) при разных температурах нагрева. Установлено, что максимальное значение α составляет около 9,5%. Следует отметить также, что нагрев образца в диапазоне 20...200 °C сопровождается уменьшением его массы, что, по-видимому, связано с удалением свободной влаги. На кривой DTA (рис. 3) зафиксированы два пика, свидетельствующие о протекании процесса с выделением теплоты. Площадь пика S связана с тепловым эффектом ΔH соотношением

$$n_i \Delta H = kS, \quad (4)$$

где n_i – количество молей исходного вещества; k – коэффициент пересчета.

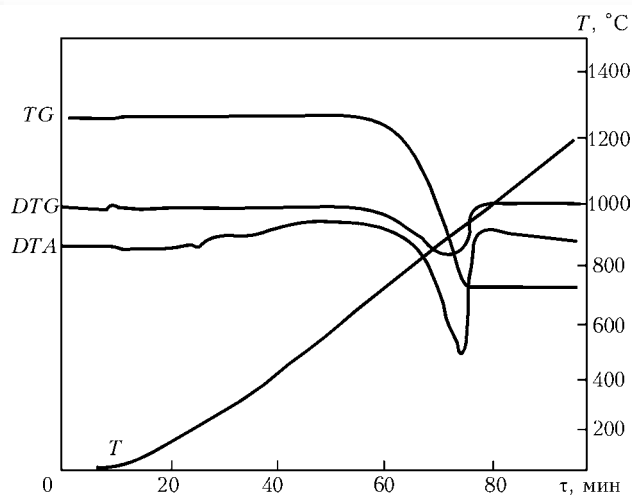
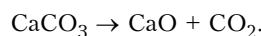


Рис. 4. Дериватограмма, полученная при нагреве образца $CaCO_3$ (обозначение см. на рис. 3)

Значение k необходимо определять, исследуя в качестве эталона процесс с известным ΔH . В качестве такого мы выбрали разложение карбоната кальция ($CaCO_3$):



Значение ΔH этого процесса и составляет 0,178 кДж/моль [9]. Экспериментальная дериватограмма для $CaCO_3$ приведена на рис. 4. На основе атомного веса $CaCO_3$ определили, что $n_i = 4,74 \cdot 10^{-3}$. По пику на кривой DTA установили, что коэффициент пересчета $k = 86,8$ Дж/см². Затем по дериватограмме рассчитали тепловой эффект окисления исследуемого образца $WC-Co$. Он равен 1,3 кДж/г. Такой большой тепловой эффект обусловлен в основном протеканием реакций (1) и (2). Его можно также рассчитать по закону Гесса, используя справочные данные по энтальпиям образования всех веществ, принимающих участие в указанных реакциях. Вычисленное значение ΔH немного превышает полученное в эксперименте на дериватографе.

Это можно объяснить тем, что дериватограф не является калориметром. Результаты испытаний образцов $WC-Co$ под флюсом АН-295 (образец № 2) представлены на рис. 5. Из приведенных данных видно, что окисление $WC-Co$ начинается при значительно более высокой температуре (примерно 400 °C), чем образца № 1, и тепловой эффект составляет всего 0,4 кДж/г. Это обусловлено тем, что флюс в твердом состоянии достаточно эффективно защищает $WC-Co$ от окисления.

Аналогичные данные получены при нагреве такого же образца до 1520 °C в течение 120 мин и выдержке при этой температуре в течение 20 мин.

Таким образом, в процессе электрошлаковой плавки б/у инструмента WC и Co окисляются в процессе нагрева электрода до 1150...1200 °C, при этом только в верхней, открытой, т. е. незначительной (до 10 %) части вставок. Основная же часть WC и Co окисляется уже в шлаковой и частично в металлической ванне. Линейная скорость перемещения расходуемого электрода в ходе плавки сос-

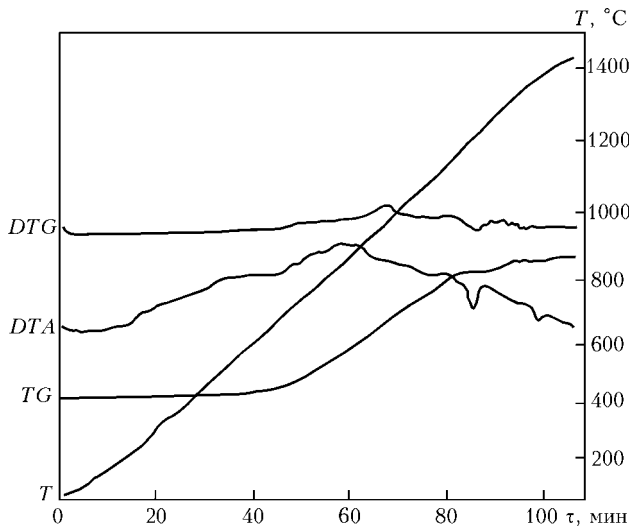


Рис. 5. Дериватограмма, полученная при нагреве образца WC-Co в течение 110 мин под флюсом АН-295 до температуры 1450 °С

тавляет 15... 20 мм/мин. Следовательно, время взаимодействия предварительно нагретой вставки и высокотемпературного шлака составляет 1,0... 1,5 мин, что вполне достаточно для расплавления кобальтовой связи, легирования металла WC и Co, а также их окисления до среднего статистического показателя (приблизительно 7... 8 %). В этих условиях плавки применение защитных покрытий электрода малоэффективно и на практике не используется.

Исследование активности кислорода во флюсе АН-295 показало, что он имеет довольно низкий окислительный потенциал (0,00012 моль. %) и по этому показателю занимает промежуточное положение между флюсами АНФ-28 и АНФ-29, широко используемыми в промышленности для ЭШП (рис. 6).

При анализе влияния мощности $P_{шл}$, вводимой в шлак, а значит, температуры и скорости плавки, на поведение WC и Co мы разделили все опытные плавки на три группы, соответствующие низкой, средней и высокой мощности. Установлено, что меньший угар зафиксирован при плавке на высокой мощности, соответствующей комплексному параметру 1,2... 1,4 кВт/кг/мин. В связи с этим разработан дифференцированный режим плавки, суть которого состоит в том, что осуществляется быстрый нагрев электрода и к моменту входа в шлак твердосплавных вставок $P_{шл}$ увеличивается на 5... 50 % относительно номинальной, а также поддерживается на этом уровне до полного входа вставки в шлак. Такое циклическое изменение мощности совершается столько раз, сколько уровней со вставками имеется в расходуемом электроде [10].

Определен еще один фактор, оказывающий определенное влияние на потери вольфрама, углерода и кобальта. Вначале при сборке расходуемого электрода не придавали значения положению б/у коронки. Если коронка располагалась вставками вниз (в сторону шлаковой ванны), то при достижении электродом значения температуры 950... 1000 °С, когда расплавляется припой Л-63, вставка, не зажатая деформированным корпусом, падала в ти-

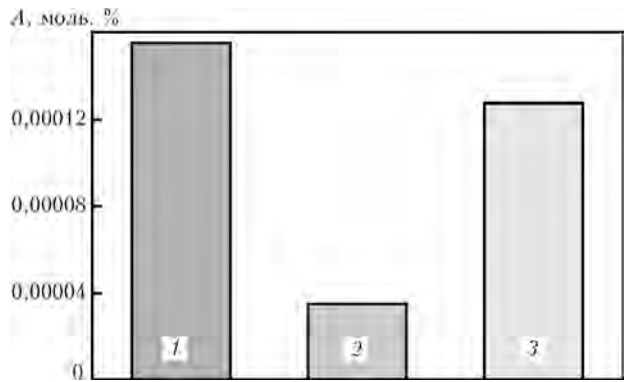


Рис. 6. Активность кислорода А во флюсах АНФ-28 (1), АНФ-29 (2) и АН-295 (3)

гель. При этом она в течение долей секунды проходила шлак и попадала в металлическую ванну, где лишь частично оплавлялась. При разливке металла такая вставка, как правило, попадала в отливку корпуса и по этой причине корпус уходил в брак.

В дальнейшем сборку электродов проводили только вставками вверх, в нескольких горизонтальных плоскостях, чтобы, во-первых, исключить падение вставок в шлак, во-вторых, реализовать дифференцированный режим плавки [11].

Использование результатов исследований и совершенствование технологии плавки б/у бурового инструмента позволили уменьшить угар и сузить пределы содержания вольфрама, углерода и кобальта в отливках корпусов до значений, указанных в табл. 4.

W	C	Co
4,7... 10,5	4,4... 8,8	5,1... 9,3
7,5	7,3	6,8

Металлографические исследования, изучение химического состава и механических свойств при различных вариантах термообработки, а также результаты натурных испытаний буровых коронок, изготовленных из опытной стали типа 45ХГСВ09 ЭКЛ, и их стоимость приведены в работе [1].

Выводы

1. Показано, что в процессе нагрева расходуемого электрода, составленного из б/у бурового инструмента, происходит окисление WC и Co с образованием шпинели $CoWO_4$ и WO_3 .

2. Рассчитаны изменения относительной массы образцов и тепловые эффекты реакций окисления WC и Co. Установлено, что в процессе нагрева расходуемого электрода до 1150... 1200 °С окисляется незначительная (до 10 %) часть WC и Co, остальное остается в шлаковой и металлической ваннах.

3. Установлено, что флюс АН-295 отличается невысоким окислительным потенциалом. При этом мень-



ший угар WC и Co имеется при плавке на высокой мощности, соответствующей 1,2... 1,4 кВт/кг/мин.

4. Отработана оптимальная схема сборки расходоуемого электрода, состоящая в том, что твердосплавные вставки располагаются в положении «верх» относительно шлаковой ванны.

5. Оптимизация технологических параметров электрошлаковой плавки б/у бурового инструмента позволила существенно улучшить показатели окисления (угара) вольфрама, углерода и кобальта при производстве экономнолегированных сталей системы легирования C-Si-Mn-Cr-W для корпусов бурового инструмента.

1. *Богаченко А. Г., Линенко-Мельников Ю. П., Мельник В. И.* Новые экономнолегированные стали для корпусов буровых коронок. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев, 2009. — Вып. 12. — С. 69–79.
2. *Клочко Н. А.* Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента. — М.: Металлургия, 1981. — С. 73–76.

3. *Штампы для горячего деформирования металлов.* — М.: Высш. шк., 1977. — С. 319–328.
4. *Гуманов В. И.* Свойства сплавов системы карбид вольфрама–кобальт. — М.: Металлургия, 1971. — 10 с.
5. Тепловой баланс и температурные поля расходоуемого электрода при плавке под флюсом / А. А. Никулин, Л. А. Волохонский, В. И. Дроздов и др. // *Электротермия.* — 1964. — Вып. 38. — С. 29–30.
6. *Металлургия электрошлакового процесса.* — Киев: Наук. думка, 1986. — С. 122, 157.
7. *Куликов И. С.* Термическая диссоциация соединений. — М.: Металлургия, 1966. — 112 с.
8. *Куликов И. С.* Термодинамика карбидов и нитридов. — Челябинск: Металлургия, 1988. — С. 76–77.
9. *Краткий справочник по химии* / Под ред. О. Д. Куриленко. — Киев: Наук. думка, 1988. — 386 с.
10. *Пат. 22677* Украина, МПК С 21 С 5/56; В 23 К 25/00. Способ электрошлаковой тигельной плавки расходоуемого электрода — Оpubл. 25.04.2007; Бюл. № 5.
11. *Пат. 21646* Украина, МПК С 21 С 5/00; В 23 К 25/00. Расходоуемый электрод / А. Г. Богаченко, Т. А. Богаченко, А. Ф. Бурлыка и др. — Оpubл. 15.03.2007; Бюл. № 3.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Киев. нац. ун-т им. Тараса Шевченко

Ин-т проблем материаловедения им. И. М. Францевича, Киев
Поступила 20.11.2012

ПАО «ДНЕПРОСПЕЦСТАЛЬ» — 80 лет!



Коллектив первенца отечественной высококачественной металлургии Запорожского электрометаллургического завода «Днепроспецсталь» имени А. Н. Кузьмина празднует 80-летие. 10 октября 1932 г. вся страна отмечала пуск Днепрогэса, а его промышленный ток пошел на Завод инструментальных сталей, как тогда называлась «Днепроспецсталь». Редколлегия от всей души поздравляет коллег-электрометаллургов и с удовольствием напоминает, что именно здесь впервые в мире в 1958 г. была пущена печь электрошлакового перепада, разработанного учеными Института электросварки под руководством Б. Е. Патона и Б. И. Медовара.

Пять лет спустя коллектив наиболее активных участников разработки и промышленной реализации ЭШП был удостоен Ленинской премии в области науки и техники. На «Днепроспецстали» начиналась вакуумная металлургия страны, заработал первый отечественный реактор газокислородного-рафинирования. Многие другие новые технологии и оборудование проходили обкатку именно в цехах юбилея.

Постоянное стремление к новому обеспечивало и конкурентные преимущества. Так было в прошлом, такова ситуация и сегодня, а в будущем — только с новыми технологиями, производством новых сталей и сплавов Электрометаллургический завод будет иметь перспективы.



Дорогие Коллеги!

От всей души поздравляем Вас и желаем дальнейшего развития и новых творческих взлетов в вашем нелегком труде.