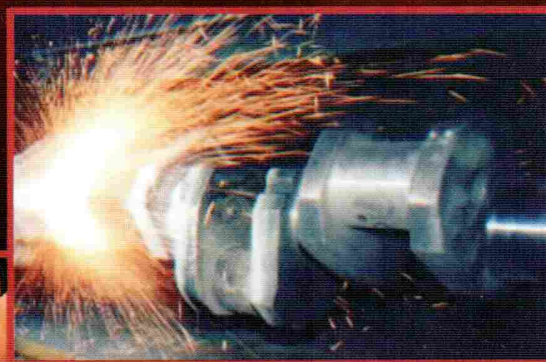
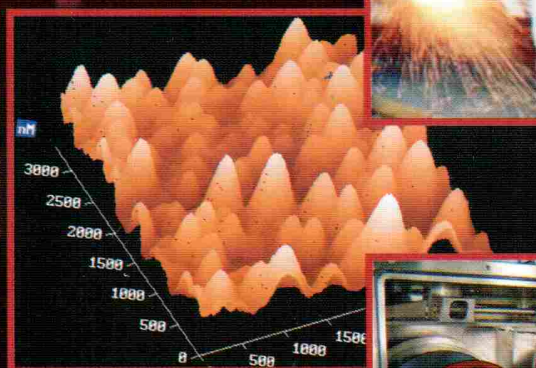


УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

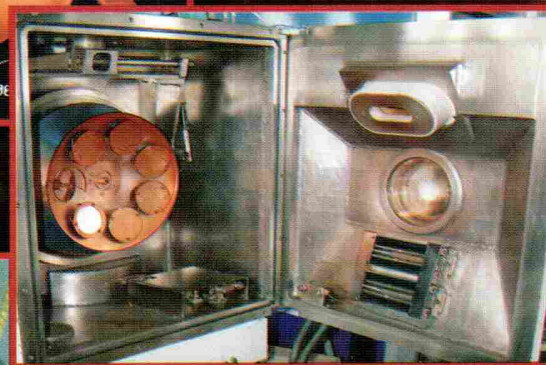
МЕХАНИЧЕСКАЯ
УПРОЧНЯЮЩАЯ
ОБРАБОТКА



ТЕРМИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА

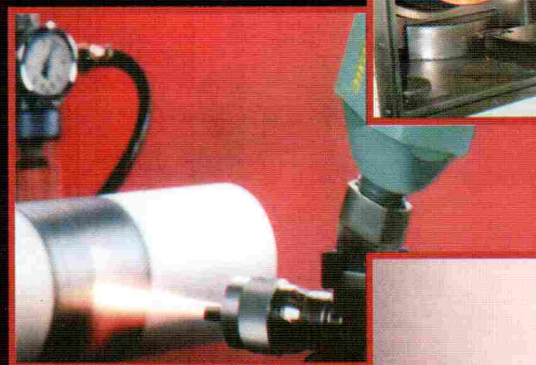


МЕТОДЫ
НАНЕСЕНИЯ
ПОКРЫТИЙ

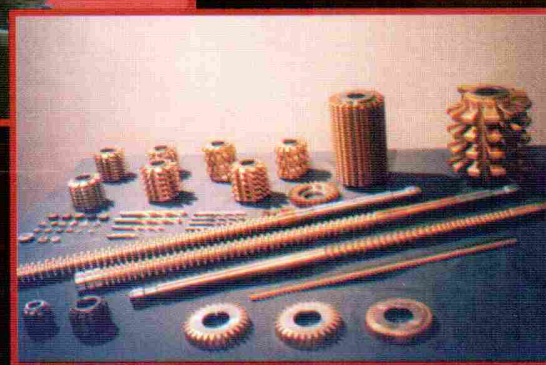


КОМБИНИРОВАННАЯ
ОБРАБОТКА

ПЕРСПЕКТИВНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ



КОНТРОЛЬ
КАЧЕСТВА
УПРОЧНЕНИЯ



9 (45) / 2008

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 9 (45)
сентябрь
2008

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р физ.-мат. наук,
заслуженный деятель науки РФ
В.Н. НЕВОЛИН
**Председатель редакционного
совета**
д-р техн. наук, заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
**Заместители главного
редактора:**
И.Н. ЖЕСТКОВА
д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ
**Заместители председателя
редакционного совета:**
д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК
д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА
Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ
А.П. БАБИЧЕВ
В.П. БАЛКОВ
С.Н. ГРИГОРЬЕВ
В.Ю. ЗАМЯТИН
В.А. ЗЕМСКОВ
С.А. КЛИМЕНКО
В.А. ЛАШКО
В.А. ЛЕБЕДЕВ
В.В. ЛЮБИМОВ
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО
Ю.В. ПАНФИЛОВ
Х.М. РАХИМЯНОВ
Б.П. САУШКИН
В.П. СМОЛЕНЦЕВ
А.М. СМЫСЛОВ
Г.А. СУХОЧЕВ
В.П. ТАБАКОВ
В.А. ШУЛОВ
М.Л. ХЕЙФЕЦ
Редакция:
И.В. СИНЦОВА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в любом
почтовом отделении (индексы
по каталогам: "Роспечать" 85159,
"Пресса России" 39269, "Почта России"
60252) или в издательстве.
Тел.: (495) 269-52-98, 269-66-00,
268-40-77.
Факс: (495) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован
в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ

- ➔ **ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ**
Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Костычев И.В. Трибологические свойства тонкопленочных наноструктурированных покрытий в системе элементов W-Se-C 3
- ➔ **МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ**
Неровный В.М., Михальцевич О.И. Расширение возможностей ремонта лопаток турбины дуговой пайкой в вакууме 11
- ➔ **МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА**
Копылов Ю.Р. Особенности виброударного упрочнения длинномерных деталей 17
Суслов А.Г., Гуров Р.В., Тишевских Е.С. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием 20
Матлин М.М., Мосейко В.О., Мосейко В.В. Выбор степени покрытия отпечатками дроби и зонами пластической деформации упрочняемых поверхностей деталей машин при дробеобработке 23
- ➔ **ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**
Козлов Д.А., Овчинников В.В. Влияние состава бронзы на свойства стали 30ХГСН2А при электроискровом легировании 27
Верхотуров А.Д., Коневцов Л.А., Шпилёв А.М., Гордиенко П.С., Панин Е.С. Исследование влияния электроискрового упрочнения вольфрамокобальтовых твердых сплавов на жаростойкость при нагреве до 1000 °С 34
- ➔ **МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**
Тюрин Ю.Н., Головенко С.И., Дуда И.М., Гарькавый Н.И. Упрочнение шеек крупногабаритных коленчатых валов 39
Сайфуллин Р.Н. Способ электроконтактной приварки ферромагнитных порошков 42
- ➔ **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ**
Гасанов Ш.Г. Решение задачи о трещине на границе раздела покрытия и упругой основы 45
Лесюк Е.А. Исследование влияния выбора охлаждающей среды на микротвердость сталей при ультразвуковой упрочняющей обработке 49
- ➔ **ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ**
Гребенщиков А.В., Смоленцев В.П. Очистка изделий от загрязнений импульсным воздействием 53

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 9 (45)
September
2008

Since 2005, January

Editor-in-Chief

Dr of Phys. Math. Sci.,
The honoured worker
of a science of the RF
V.N. NEVOLIN

Chair of Editorial Council

Dr of Eng. Sci., The honoured
worker of a science and
technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI

Editorial Assistants:

I.N. ZHESTKOVA
Dr of Phys. Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:

Dr of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA

Editorial council:

Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
S.N. GRIGORIEV
V.Yu. ZAMYATIN
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
F.I. PANTELEENKO
Yu.V. PANFILOV
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUHOICHEV
V.A. SHULOV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:

I.V. SINTSOVA
T.V. PARAYSKAYA

CONTENTS



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Fominskiy V.Yu., Romanov R.I., Kostichev I.V. Tribological properties
of the thin-film nanostructured coatings in the system of elements W-Se-C 3



METHODS OF COMPONENTS RESTORATION

Nerovniy V.M., Mikhaltsewich O.I. Enhancement of repairing turbine blades
by the arc soldering in vacuum 11



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Kopylov Yu.R. Features of vibro-impact strengthening of long-length components 17

Suslov A.G., Gurov R.V., Tischevskih E.S. Finishing-strengthening processing
by surface plastic deformation 20

Matlin M.M., Moseyko V.O., Moseyko V.V. Choice the degree of coverage by shot prints
and plastic deformation zones of strengthening mashine parts surfaces under shotpeening 23



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Kozlov D.A., Ovchinnikov V.V. Influence of bronze composition on properties
of steel 30XГЧ2А at electric-spark alloying 27

Verhoturov A.D., Konevtsov L.A., Shpilev A.M., Gordienko P.S., Panin E.S.
The research of influence of electrospark alloying wolfram-cobaltic hard alloys
on heat-resistance at heating up to 1000 °C 34



METHODS OF DEPOSITION OF FUNCTIONAL COATINGS

Tyurin Yu.N., Golovenko S.I., Duda I.M., Garkaviy N.I. Strengthening
of the large-size crankshaft 39

Sayfullin R.N. The method of electro-contact welding of ferro-magnetic powders 42



QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING

Gasnov Sh.G. The solution of the problem on the crack on border of section
of the coating and elastic basis 45

Lesyuk E.A. Research of influence of cooling medium on microhardness
of steel at ultrasonic strengthening processing 49



INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Grebenschikov A.V., Smolentsev V.P. Container cleaning by impulse action 53

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian
Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses

Journal is spreaded on a subscription,
which can be issued in any post office
(index on the catalogues: "Rospechat"
85159, "Pressa Rossii" 39269, "Pochta
Rossii" 60252) or in publishing office.
Ph.: (495) 269-52-98, 269-66-00,
268-40-77. Fax: (495) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by RF Ministry
Tele- and Broadcasting of Mass
Communications Media. The certificate
of registration ПИ № 77-17733,
March 9, 2004

А.Д. Верхотуров, Л.А. Коневцов (Институт материаловедения
ХабНЦ ДВО РАН, Хабаровск),
А.М. Шпилёв (КнАГТУ, Комсомольск-на-Амуре),
П.С. Гордиенко, Е.С. Панин (Институт химии
ДВО РАН, Владивосток)

Исследование влияния электроискрового упрочнения вольфрамокобальтовых твердых сплавов на жаростойкость при нагреве до 1000 °С

Исследовано температурное окисление вольфрамокобальтовых твердых сплавов (ВТС) групп ВК, ТК, ТТ и их модельных материалов W, TiC, WC, Co. Показано изменение химического, фазового состава, макроструктуры поверхностного слоя ВТС при нагреве до 1000 °С без защитного слоя и после упрочнения методом электроискрового легирования. Установлено значительное увеличение жаростойкости ВТС при формировании защитного ЭИЛ-покрытия нитридоалюминооксидной керамикой, а также композиционной керамикой на основе диборида циркония, увеличивающей работоспособность ВТС на 20...40 %.

Ключевые слова: состав, структура, поверхностный слой, электроискровое легирование (ЭИЛ), вольфрам-содержащий твердый сплав, электрод, жаростойкость, окисление.

Temperature oxidation of wolfram-cobaltic hard alloys (WHA) of groups ВК, ТК, ТТ and their by materials components of model W, TiC, WC, Co is investigated. Change of chemical, phase structure, a macrostructure of superficial layer WHA is shown at heating up to 1000 °С without a protective layer and after strengthening by a method electrospark alloying surfaces. Substantial growth of heat resistance WHA is stated at formation of a protective ESA-coating nitride-aluminum-oxidic by ceramics, and also composite ceramics on a basis zirconium diboride, increasing serviceability WHA on 20...40 %.

Key words: composition, structure, surface layer, electric-spark alloying (ESA), tungsten-bearing hard alloys, electrode, heat resistance, oxidation.

Введение

В машиностроении, горном деле и других отраслях народного хозяйства наибольшее распространение в качестве режущих инструментов получили вольфрамсодержащие твердые сплавы (ВТС). Однако содержание (кларк) вольфрама в земной коре ограничено, его меньше (по А.П. Виноградову), чем таких стратегически важных элементов, как уран, почти в 2,5 раза или титан — в 3,5 тыс. раз. Цена вольфрама на мировых рынках непрерывно растет, растут и требования по повышению эксплуатационных свойств ВТС, обусловленные потребностями производства и ростом производительности труда.

Режущие свойства и работоспособность ВТС, как и других режущих материалов, в первую очередь оценивают твердостью, температурой плавления, модулем упругости, теплопроводностью [1–3]. Однако ВТС при больших тепловых нагрузках в зоне резания подвергается высокотемпературному окислению, что оказывает значительное влияние на износ. Для защиты поверхностей ВТС и повышения их работоспособности используют различные трудоемкие методы физического и химического осаждения покрытий [3]. В литературе встречаются отдельные сведения по влиянию нагрева ВТС до 900 °С и их окислению [1], но отсутствуют систематические исследования влияния покрытий перспективным методом электро-

искрового легирования (ЭИЛ) на изменение жаростойкости, представляющих значительный интерес и для повышения работоспособности сплавов [4].

Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния ЭИЛ-покрытий на жаростойкость ВТС, изменение макро-, микроструктуры, химического и фазового состава.

Методика и материалы

Были использованы отечественные промышленные образцы ВТС трех групп: ВК (ВК3, ВК6, ВК8, ВК8ИМ), ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4) и ТТ (ТТ10К8). Интерес представляли модельные образцы чистого вольфрама W, карбидов TiC, WC и Co, а также износостойкая композиционная керамика ЦЛАБ на основе ZrB₂ системы ZrB₂-ZrSi₂-LaB₆ со связкой Ni-Cr-Al (30 % мол.), полученная в Институте проблем материаловедения НАН Украины.

Для ЭИЛ использовали установки ЭЛФА-541, Элитрон-22А. Для металлографического, рентгенофазового, электронно-зондового анализов, измерения микротвердости применяли: МИМ-10; EVO-50 XVP; D8 ADVANCE; WDS/EDS JXA -8100; ПМТ-3М; DUN-W201 Shimadzu. Исследования образцов по температурному окислению выполняли на дериватографах Q-1000 и STA 449C Jupiter при нагреве образцов от 20 до 1000 °С на воздухе со скоростью

20 °С/мин с последующим охлаждением в печи до температуры ≈500 °С и далее с открытой печью до комнатной температуры. По термической кривой, полученной на дериватографе, рассчитывали увеличение массы при окислении образца. Измерения удельного прироста массы q к суммарной площади поверхности образца до окисления S_0 выполняли через каждые 100 °С с пересчетом по формуле:

$$q = \Delta m / S_0, \text{ г/м}^2,$$

где Δm – изменение массы образца при окислении;
 S_0 – площадь образца до окисления.

В некоторых случаях термоанализ выполнялся в атмосфере Ar. Были проведены модельные эксперименты по исследованию фазового состава твердого сплава ВК8, его основы WC и составляющих его элементов W и Co при нагреве до 1000 °С.

Обсуждение результатов

Было установлено, что окисление исследуемых материалов (оценивали по приросту массы q) до температуры 650 °С незначительно. В этом диапазоне наибольшие величины принятого показателя окисления q получены для Co – 12,9, W – 6,3 и WC – 0,7 г/м². С повышением температуры от 750 до 1000 °С распределение материалов по жаростойкости меняется: q для WC – наибольший, далее – ВТС и наименьший – для TiC. При этом q для WC превышает q вольфрама более чем в 4 раза (рис. 1, а), а для W прирост массы по сравнению с TiC больше в 10 раз, что можно объяснить различным значением констант равновесия при окислении W и WC, которые равны соответственно:

$$K_W = [\text{O}_2]^{3/2};$$

$$K_{WC} = [\text{O}_2]^{5/2} / [\text{CO}_2],$$

т. е. скорость окисления для W пропорциональна концентрации кислорода в степени 3/2, а при окислении WC – 5/2.

Это, по-видимому, является доминирующим фактором по сравнению с влиянием концентрации $[\text{CO}_2]$, что и получили в результате реакции окисления WC. Кроме того, сравнивая энтальпии образования TiC и WC, соответственно 45,657 и 3,968 ккал/(г·атом) при 2000 К [5, 6], ожидали и получили различные скорости окисления этих веществ (рис. 1, а). Выявлено, что жаростойкость ВТС возрастает с увеличением содержания в них карбида титана,

причем увеличение жаростойкости наиболее заметно при содержании TiC > 10 %.

Это можно объяснить прочностью химической связи карбидов WC и TiC, которая определяется образованием W и Ti с атомами углерода sp^3 -конфигураций [7]. Для W характерен высокий *статистический вес атомов с устойчивой конфигурацией* (СВАСК) d^5 , следовательно, атомы W обладают слабыми донорными свойствами и практически не могут стабилизировать sp^3 -конфигурации атомов C, поэтому с повышением температуры WC имеет значения q , соответствующие низкой жаростойкости, тогда как увеличение доли локализованных электронов W обеспечивает карбиду WC повышенную пластичность и больший модуль упругости, чем у TiC.

По сравнению с WC окисление TiC при нагревании затруднено образованием стабильных sp^3 -конфигураций атомов углерода, так как для TiC характерен больший СВАСК sp^3 , что обуславливает жесткую ковалентную связь, на разрушение которой требуется больше тепла. Этим же обусловлены большая энергия связи TiC, чем для WC, снижение пластичности, модуля упругости, повышение хрупкости. Следствием является также уменьшение доли связанных с O_2 электронов в константах равновесия при температурном окислении. Следовательно, полученные данные согласуются с конфигурационной моделью электронной структуры вещества [8].

Образцы ВТС с низкой жаростойкостью и образцы из WC при температурном окислении значительно изменяют форму и размеры (рис. 1, б). При этом у WC наблюдается наибольшая высота образуемого нароста окалины, а у ВТС – меньший нарост окалины, который снижается с повышением содержания в ВТС карбида титана особенно при содержании TiC > 10 %. Формирование нароста окалины идет в направлении, перпендикулярном к каждой внешней поверхности

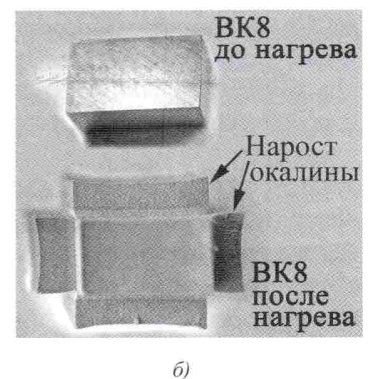
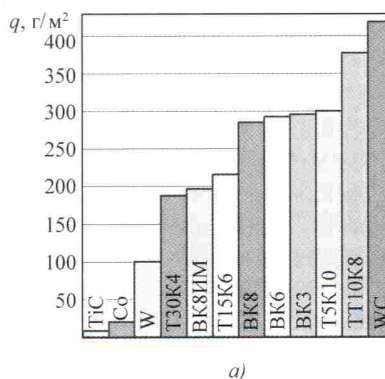
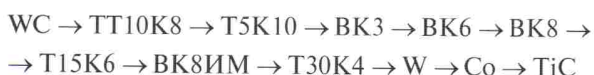
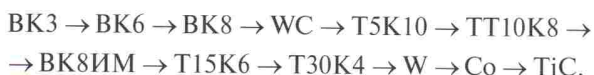


Рис. 1. Удельный прирост массы образцов q при нагревании до 1000 °С (а) и макроструктура ($\times 14$) образца ВК8 до и после окисления (б)

образца. Полученный ряд по возрастанию жаростойкости исследуемых образцов



не во всех случаях совпадает с рядом в направлении увеличения высоты нароста окалины



Это может быть связано с зависимостью показателя жаростойкости q от средней высоты нароста окалины и его средней плотности:

$$q = \Delta m / S_0 = \rho_{\text{cp}} \Delta H_{\text{cp}},$$

где ρ_{cp} — средняя плотность нароста окалины;

ΔH_{cp} — изменение средней высоты нароста при температурном окислении.

Установлено, что элементный состав нароста окалины ВТС определяется в основном содержанием W, O, Co, которые формируют: 1) верхний слой с большим содержанием CoWO_4 и меньшим содержанием WO_3 ; 2) нижний слой из WO_3 с малым содержанием CoWO_4 ; 3) средний слой с примерно одинаковым содержанием CoWO_4 и WO_3 .

Состав окалины ВТС группы ТК более разнообразен и включает в себя WO_3 с моноклинной и кубической кристаллическими решетками, а также CoWO_4 с моноклинной и TiO_2 с тетрагональной кристаллическими решетками. Микротвердость окалины для таких ВТС, как ВК6, ВК8, Т15К6, ТТ10К8, составляет в нижних слоях 0,2...0,4 ГПа и в верхних слоях — 0,58...0,87 ГПа. Под наростом окалины она у ВК8 выше на 0,4 ГПа, а у ВК6, Т15К6, ТТ10К8 ниже на 1,5...2 ГПа (при твердости ВТС 16,1...17,9 ГПа). В процессе образования нароста окалины WC и ВТС возникают усилия, достаточные для деформаций стенок платинового тигля, с которыми он, "расправляясь", контактирует. Способность WC и ВТС создавать такие усилия при нагреве может быть использована при конструировании специальных устройств. Однако нарост окалины хрупок, разрушается при небольших нагрузках, а при резании металлов его легко может удалить с поверхности режущего инструмента сходящая стружка, т.е. при нагреве выше 730 °C резко возрастает роль химического износа инструмента из ВТС.

На рис. 2 показано изменение фазового состава поверхности сплава ВК8 при нагреве до 1000 °C. Видно, что при нагреве до 400 °C изменений фазового состава на поверхности не наблюдается. При нагреве до 620 °C и выдержке в печи 1 ч в поверхностном слое появляются оксидные фазы WO_3 и CoWO_4 при

наличии основообразующей фазы ВТС — WC. При температуре от 670 °C и выдержке в печи 2 ч в поверхностном слое основная фаза WC отсутствует, но при меньшей выдержке (0,75 ч) основная фаза еще существует. При нагреве до 730 °C в поверхностном слое присутствуют только оксиды CoWO_4 и WO_3 , т.е. происходит образование шпинели и нароста окалины. При этом как оксиды CoWO_4 , так и WO_3 имеют моноклинную кристаллическую решетку при нагреве от 900 до 1000 °C. При нагреве до 620 °C оксиды WO_3 имеют триклинную кристаллическую решетку, при нагреве до 670 °C — моноклинную, от 730 до 900 °C — вновь триклинную.

Образование аналогичных оксидов было выявлено при нагревании составляющих ВК8: карбида WC, элементов W и Co. Так, при нагреве вольфрама до 600 °C на поверхности наблюдается W с кубической кристаллической решеткой. Оксид WO_3 формируется на поверхности несколько раньше, чем у ВК8, он наблюдается при нагреве до 600 °C и имеет триклинную кристаллическую решетку. В диапазоне температур от 700 до 1000 °C на поверхности W наблюдается только формирование WO_3 с моноклинной кристаллической решеткой, аналогичной с решеткой при нагреве ВК8.

При нагреве карбида вольфрама до 400 °C фазовые превращения в поверхностном слое отсутствуют, наблюдается только WC с гексагональной кристаллической решеткой. При нагреве до 600 °C наблюдаются две фазы: WC с гексагональной и WO_3 с моноклинной кристаллическими решетками. При дальнейшем нагреве WC до 1000 °C наблюдается только оксид WO_3 с моноклинной кристаллической решеткой.

В поверхностном слое Co фазовых превращений не происходит при нагреве до 250 °C и наблюдается только Co с гексагональной кристаллической решеткой. Начиная с температуры 350 °C, в поверхностном слое кроме Co происходит образование оксидных фаз CoO и Co_3O_4 с кубическими кристаллическими решетками. При нагреве до 670 °C в поверхностном слое Co уже отсутствует, образуются только оксиды CoO и Co_3O_4 с кубическими решетками. Но начиная с температуры 900 °C, в поверхностном слое кроме фаз CoO и Co_3O_4 присутствуют α -Co с гексагональной кристаллической решеткой. При нагреве до 1000 °C наблюдаются только фазы Co_3O_4 и Co с кубическими кристаллическими решетками.

Из сказанного выше можно сделать вывод о необходимости образования защитного покрытия на поверхности металлокерамических режущих материалов из ВТС, т.е. слоя из жаростойких материалов и их

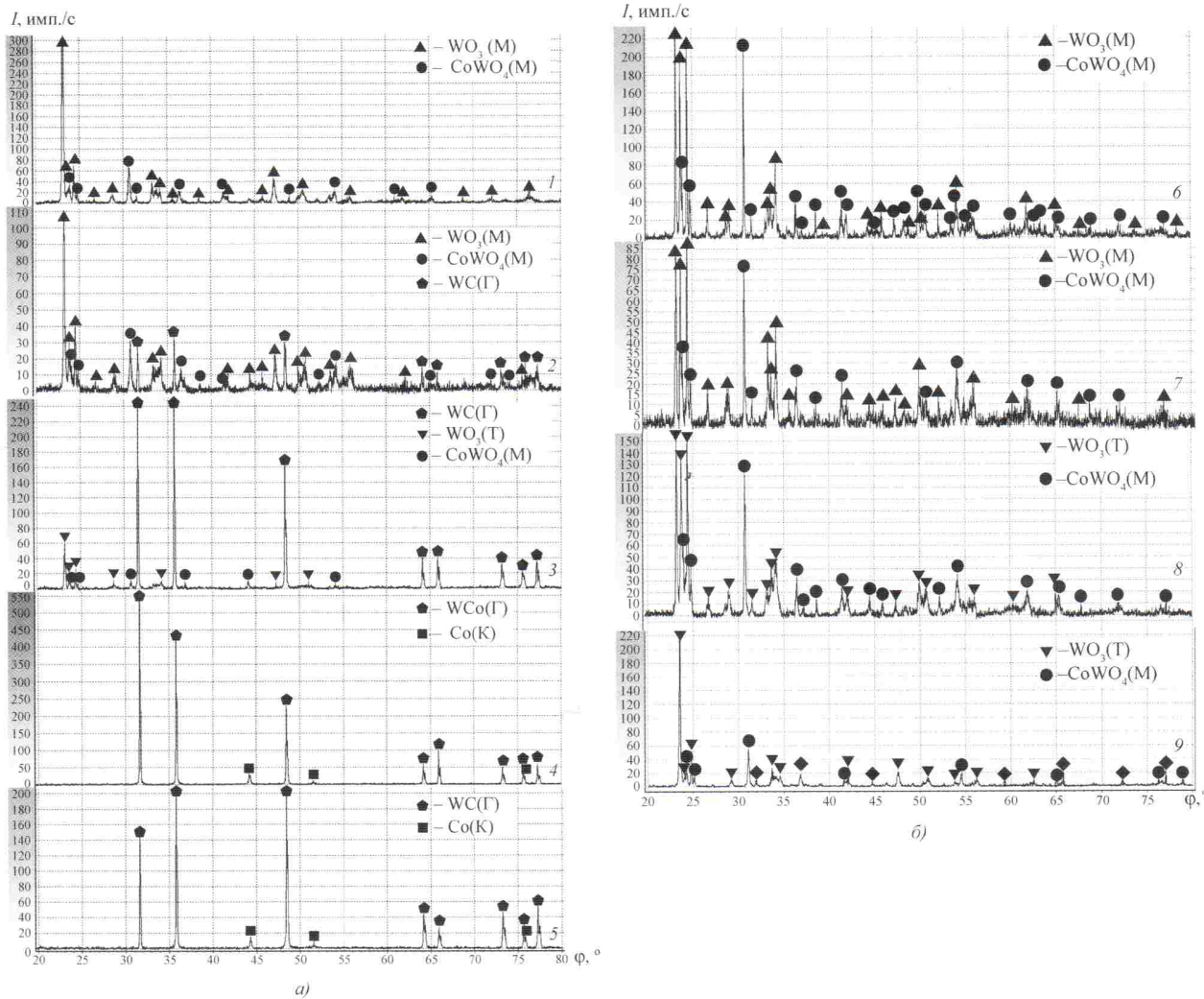


Рис. 2. Фазовые превращения ВК8 при нагреве в интервалах 25...670 °С (а) и 730...1000 °С (б):

I – интенсивность импульсов; φ – угол поворота образца (для проведения измерений); М, Г, Т, К – моноклинная, гексагональная, триклинная и кубическая кристаллические решетки соответственно; 1 – 670 °С, 2 ч; 2 – 670 °С, 0,75 ч; 3 – 620 °С; 4 – 400 °С; 5 – 25 °С; 6 – 1000 °С, 35 ч; 7 – 900 °С, 11,5 ч; 8 – 800 °С, 2 ч; 9 – 730 °С, 2 ч

соединений, который должен повысить высокотемпературное сопротивление окислению.

Выполненные исследования жаростойкости образцов ВТС с защитными покрытиями поверхностей, нанесенными методом ЭИЛ после окисления на воздухе при нагреве со скоростью 20 °С/мин от 25 до 1000 °С, показали, что во всех случаях жаростойкость образцов выше, чем без покрытий (рис. 3, а). При использовании в качестве анода Al и Ti значения жаростойкости образцов с ЭИЛ-покрытиями даже превосходят жаростойкость TiC, Co, Ti.

Показатель жаростойкости *q* составляет для образцов с покрытиями Al/Ti5K6 – 2,9 г/м², (Al+Ti)/T5K10 – 5,5 г/м² и Al/ВК8ИМ – 6,1 г/м² (в то время как у TiC – 8,99 г/м²). Испытания жаростойко-

сти при легировании в два слоя (Al+Ti) показали результаты лучше, чем при ЭИЛ с Al-электродом (марки А5М для образца Т5К10).

У образца Al/ВК8, покрытого защитным слоем только с одной (нижней) стороны (рис. 3, б), образование нароста окалины практически не наблюдается, в то время как на незащищенных сторонах ВК8 его величина достигает 1,6 мм.

Фазовый состав полученного слоя покрытия после ЭИЛ Al/ВК8 показал, что он сформирован в виде сложной композиционной нитридоалюминооксидной керамики при наличии фаз WN и WC с гексагональными кристаллическими решетками, γ-Al₂O₃ с кубической решеткой, χ-Al₂O₃ с гексагональной кристаллической решеткой. При этом фазовый



Рис. 3. Удельный прирост массы модельных материалов q TiC*, Co*, BK8* (без покрытия) и ВТС с ЭИЛ-покрытиями (а); образец ВК8 ($\times 14$) с покрытием нижней стороны Al-электродом после окисления (б)

состав покрытия меняется при повышении температуры. При нагреве до 350 °С и выдержке в течение 2 ч в поверхностном слое ЭИЛ-покрытия появляется фаза δ -Al₂O₃ с тетрагональной кристаллической решеткой, при 600 °С – фазы Al₂O₄ и Al₁₂W с кубическими кристаллическими решетками и AlWO₃ с орторомбической призматической решеткой. При нагреве выше 700 и до 1000 °С в поверхностном слое наблюдаются фазы WC и WN с гексагональными кристаллическими решетками и фаза γ -Al₂O₃ с кубической решеткой.

Образцы ВТС с ЭИЛ-покрытием ЦЛАБ, износостойкой композиционной керамикой на основе ZrB₂ системы ZrB₂-ZrSi₂-LaB₆ со связкой Ni-Cr-Al (30 % мол.) (рис. 2, а), показали повышение жаростойкости более чем в 3,5 раза для ВК6 и почти на порядок для TT10K8 (в 9,5 раз) и T5K10 (в 14 раз). При этом стойкость режущего инструмента из быстросменных пластин ВТС при чистовом точении прутков из стали 45 длиной $L = 450$ мм и диаметром 45 мм была увеличе-

на на 20...40 % по параметрам износа задней грани и размерному износу.

Выводы

1. Окисление карбидов обусловлено особенностями их электронного строения, значениями статистического веса атомов карбидообразующего металла в устойчивые d⁵-конфигурации: чем больше СВАСК d⁵-металла, тем меньше жаростойкость его карбида.

2. При нагревании WC и ВТС до 1000 °С интенсивно образуется хрупкий нарост окалины из WO₃, CoWO₄ перпендикулярно к граням. Его легко может удалить с поверхности ВТС сходящая стружка при резании стали.

3. Жаростойкость снижается в ряду: TiC, Co, W, ВТС с содержанием TiC >10 %, WC-Co, WC. Наибольший нарост окалины – у WC и сплавов WC-Co. Окисляемость ВТС может быть одним из критериев их работоспособности.

4. Исследования жаростойкости ВК8 показали начало образования оксидной шпинели при нагреве до 620 °С и ее окончательное формирование при нагреве до 1000 °С при отсутствии в поверхностном слое WC-фазы после нагрева до 670 °С и выдержке 2 ч.

5. Жаростойкость ВТС может быть значительно повышена применением ЭИЛ-покрытий Al, Ti, Cr, а также износостойкой композиционной керамикой ЦЛАБ на основе ZrB₂ системы ZrB₂-ZrSi₂-LaB₆ со связкой Ni-Cr-Al (30 % мол.), которые повышают работоспособность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киффер З., Бенезовский Ф. Твердые сплавы / пер. с нем. Е.И. Еченистовой и Г.С. Чуриковой. М.: Металлургия, 1971. 392 с.
2. Matthews A., Leyland A. Developments in Vapour Deposited Ceramic Coatings for Tribological Applications // Key Eng. Mat. 2002. Vol. 206–213. P. 459–466.
3. Разработка и создание слоистых материалов инструментального назначения с заданным градиентом свойств / В.С. Фадеев, А.Д. Верхотуров, Н.М. Паладин и др. // Перспективные материалы. 2004. № 5. С. 45–52.
4. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский и др. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
5. Елютин В.П., Павлов Ю.А. Высокотемпературные материалы. Ч. 1. М.: Металлургия, 1972. 264 с.
6. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения: справ.; 2-е изд. М.: Металлургия, 1976. 558 с.
7. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, Г.А. Бовкун и др. Киев: Наук. думка, 1976. 219 с.
8. Самсонов Г.В., Прядко И.Ф., Прядко Л.Ф. Электронная локализация в твердом теле. М.: Наука, 1976. 340 с.