

- деталей на машиностроительных предприятиях. – Мн.: УП "Технопринт", 2002. 163 с. Ил. – С. 109-112.
4. Кундас С. П., Тонконогов Б. А., Гишкелюк И. А., Лемзиков А.В., Левашкевич Я. С., Гурченко П. С. Компьютерное моделирование и исследование тепловых полей в металлических деталях в процессе закалки / Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник. – Мн.: УП "Технопринт"; Новополоцк: ПГУ, 2003. – С. 166-167.
  5. Лемзиков А.В., Кундас С.П., Куцыло В.В., Иванов Д.Г. Применение нейросетей для определения характерных точек фазовых превращений в сталях с различным химическим составом / Информатика. – Мн.: №1(13), 2007.
  6. Нейроинформатика / Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л., Кирдин А.Н. и др. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296с.
  7. Кундас С.П., Лемзиков А.В., Иванов Д.Г., Коваленко В.И. Разработка структуры программного комплекса для моделирования технологических систем на основе динамически заменяемых модулей / Известия Белорусской инженерной академии, 2004 г., №1(17)/3 – С. 199-201.
  8. Кундас С.П., Лемзиков А.В., Коваленко В.И. Разработка гибридной экспертной системы для прогнозирования процесса закалки / Известия белорусской инженерной академии. Мн.: №1(19)/1, 2005. – С. 200-203.
  9. V. Demidovich, S. Kundas, D. Ivanov, A. Lemzikov, F. Tchmilenko Simulation of induction heat treatment as coupling of multiphysics phenomena / Heating by electromagnetic sources. Padua, University of Padua (Italy), 2007.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

УДК 621.762.001, 621.793.18

**Шматов А.А., Побережный С.В.**

## СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ДИФфуЗИОННЫХ Cr-Ti-Mo КАРБИДНЫХ СЛОЕВ НА ТВЕРДОМ СПЛАВЕ

**Введение.** Процессы нанесения многокомпонентных диффузионных карбидных покрытий на твердые сплавы пока недостаточно изучены. Причем наибольшее внимание уделяется двухкомпонентному диффузионному насыщению твердых сплавов карбидообразующими элементами, в то время как по трехкомпонентным диффузионным карбидным покрытиям практически не проведено никаких исследований [1-7].

До настоящего времени широкое промышленное применение получил порошковый способ химико-термической обработки (ХТО) с использованием герметичных контейнеров [8]. Этот наиболее простой и недорогой метод ХТО позволяет быстро разрабатывать двух- и трехкомпонентные диффузионные карбидные покрытия на твердых сплавах. Другие известные методы поверхностного упрочнения не всегда могут сформировать карбидные покрытия, одновременно легированные несколькими тугоплавкими металлами. К лучшим способам нанесения комплексных карбидов на поверхность твердосплавных изделий относятся PVD и CVD процессы, активируемые плазмой, магнетронный способ распыления. Данные процессы малопроизводительны, энергоемки, требуют применения дорогостоящего вакуумного оборудования и расхода дорогих компонентов [9,10].

Ранее авторы настоящей статьи в работе [11] провели сравнительный анализ свойств (твердости и износостойкости) одно-, двух- и трехкомпонентных карбидных слоев, полученных на твердых сплавах T15K6 и BK8 методом ХТО в 5-ти трехкомпонентных системах на основе: Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Nb и Ti-V-Mo. На основании полученных результатов были выбраны лучшие карбидные системы, в которых покрытия на твердых сплавах обладают максимальной износостойкостью. В частности, обработка в оптимальных составах порошковых сред на основе Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo и Ti-V-Mo, позволяет увеличить износостойкость твердого сплава T15K6 в 6,2 - 6,7 раза выше, по сравнению с необработанным. Однако исследования только свойств многокомпонентных карбидных слоев на твердом сплаве будут недостаточны без изучения их структуры, химического и фазового состава, кинетики их формирования, без выявления причин экстремального повышения износостой-

кости трехкомпонентных карбидных покрытий. Из-за большого объема поставленных задач в данной работе ограничились структурными исследованиями покрытий только в одной карбидной системе - на основе Cr-Ti-Mo, нанесенных на один тип твердого сплава - T15K6.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы явилось проведение сравнительного анализа структуры, фазового состава и рабочих свойств диффузионных карбидных слоев, полученных на твердом сплаве путем их одно-, двух- и трехкомпонентного диффузионного насыщения хромом, титаном и молибденом.

**Объекты и методика исследований.** Одно-, двух- и трехкомпонентные карбидные покрытия в системе на основе карбидообразующих элементов Cr-Ti-Mo были получены на твердом сплаве T15K6 (79% WC, 15% TiC и 6% Co) высокотемпературным методом ХТО. Твердосплавные образцы помещали в контейнер из жаропрочной стали, заполненный специально приготовленной порошковой насыщающей смесью, которую герметично защищали плавким затвором. Затем контейнер с образцами был загружен в электрическую печь, разогретую до температуры 1100 °С, где выдерживали в течение 6 часов. Насыщающую смесь получали методом алюминотермии путем восстановлением оксидов металлов алюминием в порошковых смесях следующего состава, мас. %: 98% (50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+35% Me<sub>x</sub>O<sub>y</sub>+15% Al)+1% NH<sub>4</sub>Cl, где оксиды Me<sub>x</sub>O<sub>y</sub> = Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MoO<sub>3</sub> являлись поставщиком карбидообразующих металлов. Предварительно восстановленную смесь размалывали и просеивали. Когда в нее дополнительно добавляли активатор (2% NH<sub>4</sub>Cl), смесь для ХТО была готова к употреблению.

Структуру и фазовый состав карбидных покрытий изучали методами микроструктурного, дюротметрического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов. Испытания на износостойкость твердосплавных режущих пластин T15K6 с карбидными покрытиями проводили путем точарного точения низколегированной конструкционной стали 40X (0.4% C, 1% Cr) при следующих условиях резания:

**Шматов А.А.**, к.т.н., Белорусский национальный технический университет.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

**Побережный С.В.**, к.т.н., ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Беларусь, 220000, г. Минск, ул. Платонова, 41.

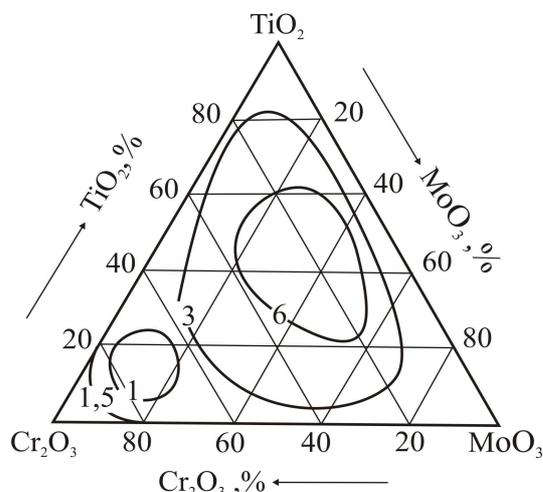
Таблица 1. Результаты исследования толщины, фазового состава и свойств диффузионных карбидных слоев на твердом сплаве Т15К6 для Cr-Ti-Mo системы.

Состав активной части смеси, доли единицы			Микротвердость слоя Н <sub>ц</sub> , МПа	Относительная износостойкость слоя К <sub>w</sub>	Фазовый состав карбидной зоны диффузионного слоя			Толщина сплошной карбидной зоны, мкм
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MoO <sub>3</sub>			карбиды хрома	карбид титана	карбиды молибдена	
1	0	0	15000	2.0	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>		-	10
3/4	1/4	0	18100	2.2	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	TiC	-	8
1/2	1/2	0	21400	2.6	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	TiC	-	5
1/4	3/4	0	19000	2.0	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	TiC	-	7
0	1	0	14000	2.2	-	TiC	-	7*
0	3/4	1/4	17400	2.4	-	TiC	MoC	7
0	1/2	1/2	18300	1.5	-	TiC	MoC	5
0	1/4	3/4	13200	1.2	-	TiC	MoC	4
0	0	1	-	1.0	-	-	-	-**
1/4	0	3/4	15000	2.0	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	-	-	4
1/2	0	1/2	17400	2.6	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	-	MoC	4
3/4	0	1/4	19200	2.4	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	-	-	7
1/2	1/4	1/4	28000	3.0	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	TiC	-	8
1/4	1/2	1/4	32500	6.2	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	TiC	MoC	5
1/4	1/4	1/2	33000	6.2	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	TiC	-	4
1/3	1/3	1/3	33000	5.1	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	TiC	MoC	4
3/4	1/8	1/8	17000	1.5	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	TiC	-	10
1/8	3/4	1/8	19000	3.1	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	TiC	MoC	5
1/8	1/8	3/4	14000	3.0	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	-	MoC	6

\* - формируется диффузионный слой из интерметаллида TiAl<sub>3</sub> с включениями TiC

\*\* - при молибденировании зона карбидов в диффузионном слое отсутствует

а)



б)

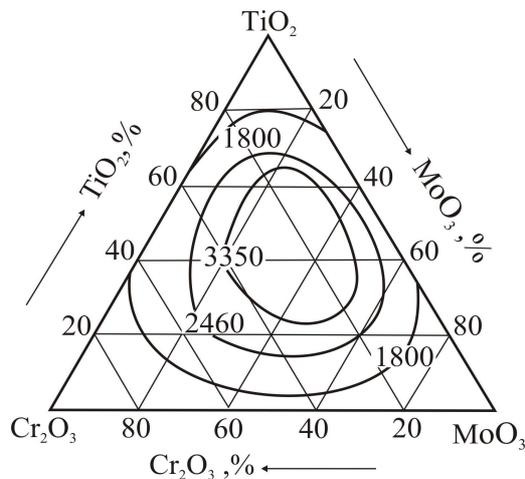


Рис. 1. Зависимость относительной износостойкости (а) и микротвердости (б) карбидных слоев на твердом сплаве Т15К6 от состава насыщающей смеси в системе на основе Cr-Ti-Mo

скорость резания – 100 м/мин, подача – 0.2 мм/об., глубина резания – 1 мм. Показатель относительной износостойкости карбидных покрытий определяли по формуле  $K_w = t_2/t_1$ , где  $t_1$  - время работы твердосплавных режущих пластин без покрытий при критериальном значении лунки износа 0,8 мм,  $t_2$  - время работы твердосплавных режущих пластин с покрытиями при критериальном значении лунки износа 0,5 мм.

Оптимизацию составов насыщающих смесей по свойствам (износостойкости, микротвердости) твердых сплавов осуществляли методом математического симплекс - планирования на основании 19 экспериментальных опытов в системе Cr-Ti-Mo для твердого сплава Т15К6 [12]. На основании рассчитанных с помощью ЭВМ математических моделей были

построены диаграммы «состав – свойство» для исследуемой карбидной системы.

**Результаты исследований.** Химико-термическую обработку твердого сплава Т15К6 в алюминотермических порошковых средах из оксидов хрома, титана и молибдена, проводили в соответствии матрицей планирования, составленной при оптимизации порошковых смесей по износостойкости карбидных слоев в трехкомпонентной системе на основе Cr-Ti-Mo [11]. Согласно примененного метода симплекс-планирования параметром оптимизации (у) являлись износостойкость, микротвердость и толщина карбидных слоев, а в качестве независимых переменных взяты поставщики карбидообразующих элементов: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (x<sub>1</sub>), TiO<sub>2</sub> (x<sub>2</sub>), MoO<sub>3</sub> (x<sub>3</sub>).

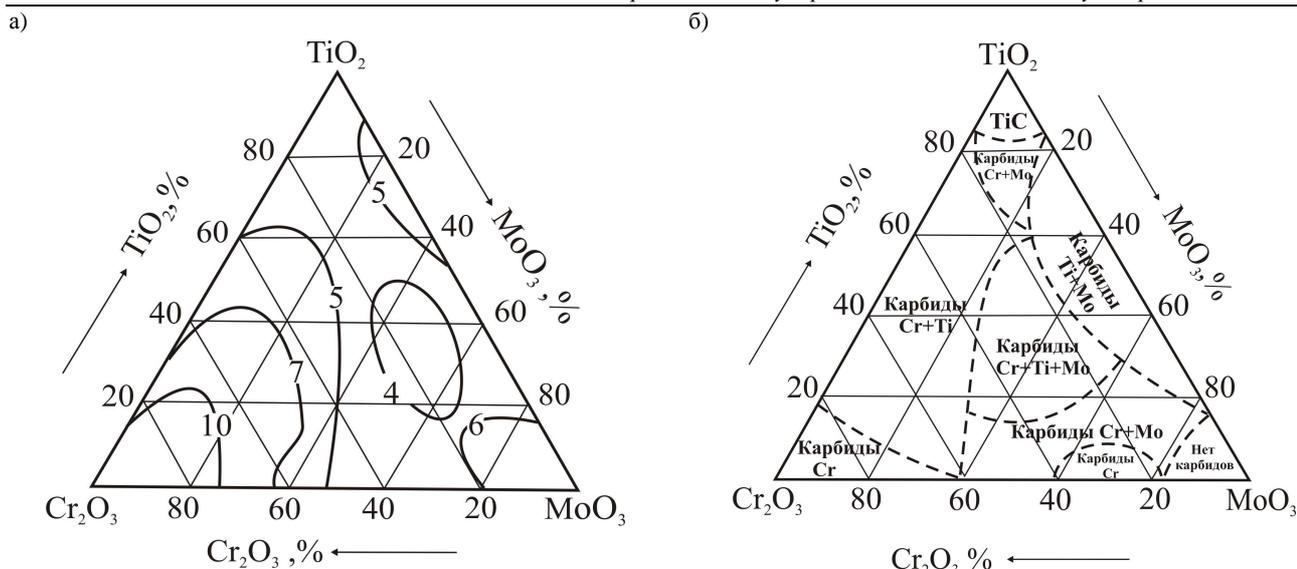


Рис. 2. Зависимость толщины (а) и фазового состава (б) карбидных слоев на твердом сплаве Т15К6 от состава насыщающей смеси в системе на основе Cr-Ti-Mo

Таблица 2. Взаимная растворимость карбидов в многокомпонентных диффузионных слоях на сплаве Т15К6 для Cr-Ti-Mo системы

Химический состав покрытия, %			Фаза	Параметры решетки, нм						Состав фазы
Cr	Ti	Mo		a		b		c		
			опыт.	табл.	опыт.	табл.	опыт.	табл.		
<b>Насыщение Cr+Ti (25%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:75% TiO<sub>2</sub>)</b>										
70	20	-	TiC	0,43028	0,4326	-	-	-	-	[Ti <sub>92</sub> Cr <sub>8</sub> ]C
			Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	1,01942	1,0660	-	-	-	-	Cr <sub>23</sub> C <sub>5,25</sub>
			Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1,40022	1,4016	-	-	0,43061	0,4524	Cr <sub>7</sub> C <sub>2,85</sub>
<b>Насыщение Cr+Mo (50%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 50%MoO<sub>3</sub>)</b>										
85	-	6	MoC	0,29921	0,3010	-	-	1,48644	1,4630	MoC
			Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1,38214	1,4016	-	-	0,47581	0,4524	[Cr <sub>66</sub> Mo <sub>34</sub> ] <sub>7</sub> C <sub>3</sub>
			Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0,55907	0,5545	0,2820	0,2830	1,14138	1,1470	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
<b>Насыщение Ti +Mo (50%TiO<sub>2</sub>: 50%MoO<sub>3</sub>)</b>										
-	87	8	TiC	0,43124	0,4326	-	-	-	-	[Ti <sub>94</sub> Mo <sub>6</sub> ]C
			MoC	0,30036	0,3010	-	-	1,39057	1,4630	MoC <sub>0,95</sub>
<b>Насыщение Cr+Ti +Mo (50%TiO<sub>2</sub>: 25%MoO<sub>3</sub>:25% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>										
7	81	6	TiC	0,43168	0,4326	-	-	-	-	[Ti <sub>96</sub> (Cr,Mo) <sub>4</sub> ]C
			MoC	0,2856	0,3010	-	-	1,3724	1,4630	[Mo <sub>77</sub> Ti <sub>23</sub> ]C
			Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	1,06367	1,0660	-	-	-	-	Cr <sub>23</sub> C <sub>5,94</sub>
			Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0,55441	0,5545	0,28341	0,2830	1,1517	1,1470	[Cr <sub>98</sub> (Ti,Mo) <sub>2</sub> ] <sub>3</sub> C <sub>2</sub>

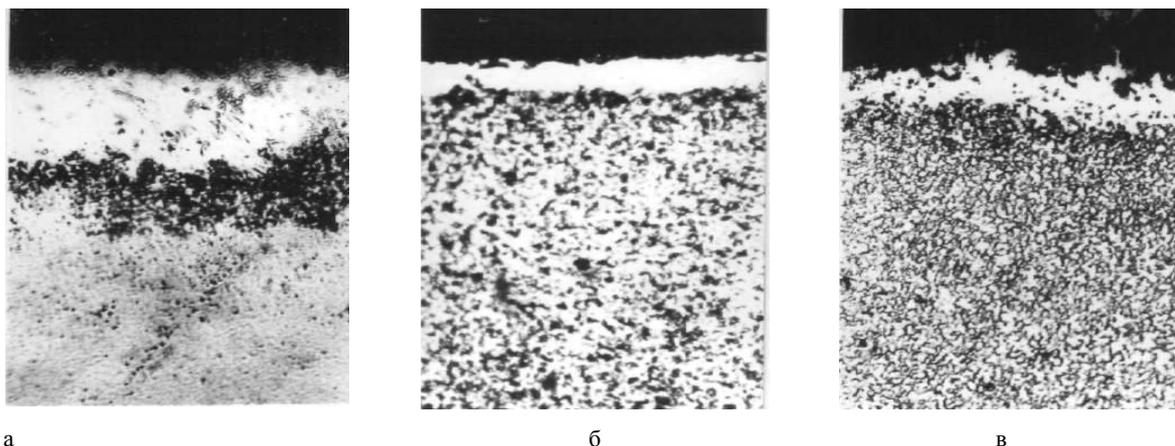
Причем сумма оксидов металлов Me<sub>x</sub>O<sub>y</sub> в Cr-Ti-Mo порошковой смеси, содержащей 98%(50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+35%Me<sub>x</sub>O<sub>y</sub>+15%Al)+2% NH<sub>4</sub>Cl, была постоянной, т.е. сумма Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ TiO<sub>2</sub>+ MoO<sub>3</sub> равна 100% (или 1 в долевом соотношении). Сравнительные данные по износостойкости, микротвердости, толщине и фазовому составу карбидных покрытий, полученных на твердом сплаве Т15К6 при реализации 19 экспериментальных опытов матрицы планирования в системе Cr-Ti-Mo, представлены в табл.1. Фазовый состав карбидных слоев Cr-Ti-Mo системы был получен в результате рентгеноструктурного исследования только поверхности покрытий.

Геометрическая интерпретация полученных данных (табл.1) представлена на рис. 1, 2. Причем геометрические зависимости износостойкости, микротвердости и толщины карбидных слоев на твердом сплаве Т15К6 от состава насыщающей смеси в системе на основе Cr-Ti-Mo получены на основании рассчитанных математических моделей, а диаграмма зависимости фазового состава карбидных слоев от состава порошковой смеси нарисована условными пунктирными линиями, поскольку границы областей различного фазового состава не носят директивного характера.

В результате оптимизации исследуемой Cr-Ti-Mo карбидной системы выявлена область оптимальных составов активных компонентов порошковых сред: 10-35% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 25-65% TiO<sub>2</sub> + 15-55% MoO<sub>3</sub>, ХТО в которой повышает износостойкость твердого сплава Т15К6 более чем в 6 раз (рис1а).

Как видно из табл.1 двух- и трехкомпонентное диффузионное насыщение твердого сплава Т15К6 хромом, титаном и молибденом приводит к формированию сплошных диффузионных карбидных слоев толщиной 4-10 мкм на основе комплексных карбидов одного, двух и трех элементов. Причем максимальные показатели механических свойств покрытий достигаются при формировании диффузионных слоев из карбидов двух или трех металлов с обязательным участием карбида титана, а оптимальная толщина карбидных слоев составляет 4-5 мкм.

Данные по химическому и фазовому составу многокомпонентных диффузионных слоев на основе хрома, титана и молибдена, изменения параметров решетки образуемых карбидных фаз приведены в табл.2.



а б в

Рис. 3. Микроструктуры оптимальных карбидных слоев на твердом сплаве Т15К6, полученных при  $T = 1100^{\circ}\text{C}$  и  $\tau = 6$  час. ( $\times 320$ ). Составы насыщающих смесей по основным компонентам:

- а) 50%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ +25%  $\text{TiO}_2$ +25%  $\text{MoO}_3$
- б) 25%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ +50%  $\text{TiO}_2$ +25%  $\text{MoO}_3$
- в) 25%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ +25%  $\text{TiO}_2$ +50%  $\text{MoO}_3$

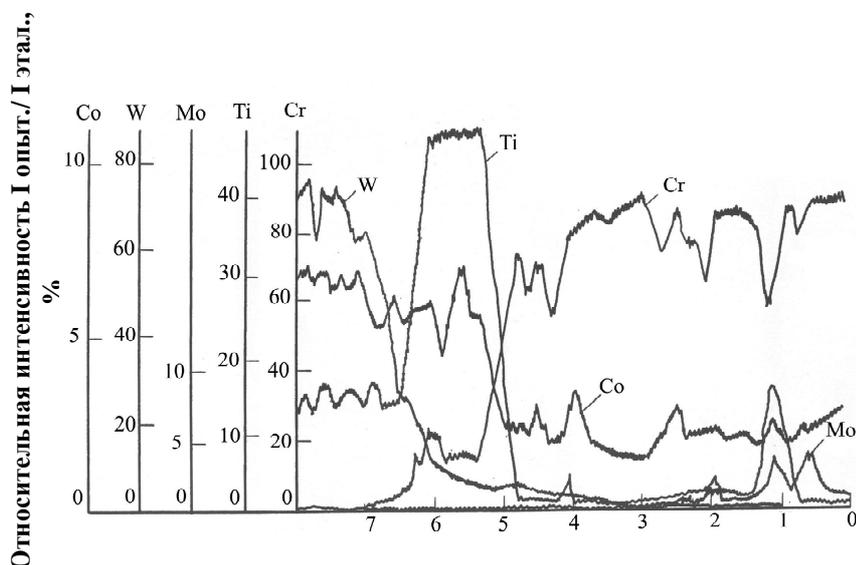


Рис. 4. Распределение элементов в диффузионном слое на твердом сплаве Т15К6, полученном при  $T = 1100^{\circ}\text{C}$  и  $\tau = 6$  час. ( $\times 240$ ). Состав насыщающей смеси по основным компонентам: 50%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ +25%  $\text{TiO}_2$ +25%  $\text{MoO}_3$

Научный интерес представляют также результаты микроструктурного (рис.3) и микрорентгеноспектрального анализа (рис.4-6) Cr-Ti-Mo карбидных покрытий, полученных в оптимальных составах насыщающих смесей.

Концентрационное распределение элементов по сечению трех Cr-Ti-Mo диффузионных слоев (рис.4 - 6) показало, что все карбидные покрытия содержат не только насыщающие элементы (Cr, Ti, Mo), но и кобальт основы. Причем в оптимизированных карбидных слоях отмечено высокое содержание титана или хрома (до 75-90%), хотя эти элементы с меньшим содержанием (5-15%) могут чередоваться по всей толщине карбидного слоя. Молибден в основном равномерно распределяется в слое в небольшом количестве (2-4%), максимальное его количество (до 10%) может быть сосредоточено на поверхности покрытия, полученного в Cr-Ti-Mo насыщающей смеси с преобладанием Mo (рис.6). Распределение кобальта по сечению образца носит общий характер: на границе «слой-основа» его содержание сначала немного падает, затем увеличивается до уровня основы - 6%, а на всей толщине покрытия отмечено пониженное количество кобальта (до 2-5%).

При соотношении активных компонентов порошковой насыщающей смеси 25%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ +50%  $\text{TiO}_2$ +25%  $\text{MoO}_3$  (рис.5)

формируется карбидный слой с высоким содержанием титана 85-90% по всей толщине покрытия и незначительным количеством хрома и молибдена; при соотношении металлосодежающих компонентов 25%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ +25%  $\text{TiO}_2$ +50%  $\text{MoO}_3$  (рис.6) карбидный слой содержит с поверхности 75-90% хрома, 3% Co и 5-10% молибдена, а ближе к границе «слой-основа» преобладает титан (75-90%). Оба эти диффузионные покрытия имеют экстремальную износостойкость ( $K_w=6,2$ ) и микротвердость (32500-33000МПа), что можно объяснить большим содержанием в них (до 60-85%) карбида титана, комплексно легированного молибденом и хромом, многофазностью структуры и оптимальной толщиной покрытия (4-5 мкм). При соотношении основных компонентов насыщающей смеси 50%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ +25%  $\text{TiO}_2$ +25%  $\text{MoO}_3$  (рис.6) образуется карбидный слой, содержащий с поверхности до 90% хрома и до 40% титана ближе к границе «слой-основа». Повышение износостойкости такого трехкомпонентного Cr-Ti-Mo покрытия (с преобладанием хрома в смеси) перед двухкомпонентным Cr-Ti покрытием объясняется дополнительным легированием карбидов хрома и титана 2-3% молибдена, а также большим содержанием в слое (до 25%) карбида титана.

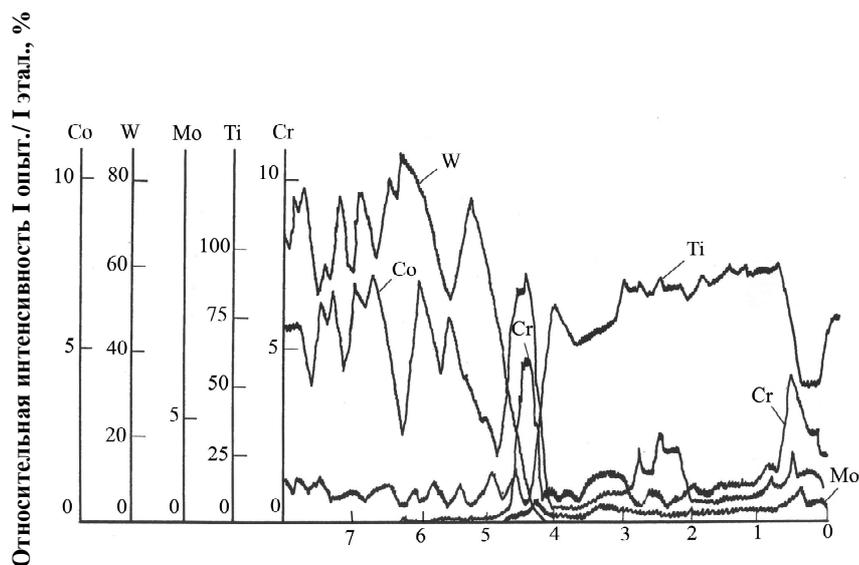


Рис. 5. Распределение элементов в диффузионном слое на твердом сплаве Т15К6, полученном при  $T = 1100^{\circ}\text{C}$  и  $\tau = 6$  час. ( $\times 240$ ). Состав насыщающей смеси по основным компонентам:  $25\% \text{Cr}_2\text{O}_3 + 50\% \text{TiO}_2 + 25\% \text{MoO}_3$

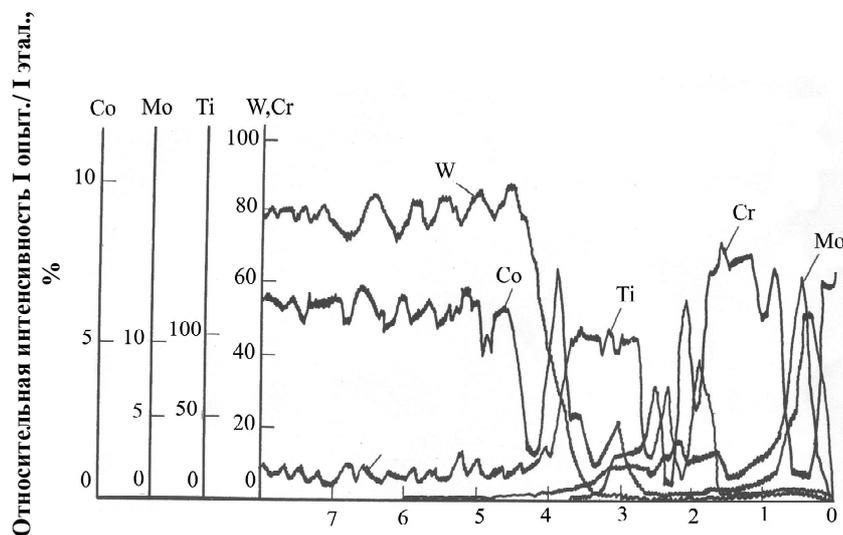


Рис. 6. Распределение элементов в диффузионном слое на твердом сплаве Т15К6, полученном при  $T = 1100^{\circ}\text{C}$  и  $\tau = 6$  час. ( $\times 240$ ). Состав насыщающей смеси по основным компонентам:  $25\% \text{Cr}_2\text{O}_3 + 25\% \text{TiO}_2 + 50\% \text{MoO}_3$

Сравнительный анализ условно построенной диаграммы фазового состава диффузионных карбидных слоев (рис.2б) с известными диаграммами состояния карбидных систем Cr-Ti-C, Cr-Mo-C, Ti-Mo-C [14-17], позволил сделать заключение, что между ними имеется очень далекое сходство, связанное только с взаимной растворимостью образуемых карбидных фаз. Так, при наличии ограниченной растворимости карбидов хрома и молибдена, карбидов титана и молибдена, карбидов хрома и титана, а также взаимной растворимости между карбидами хрома, титана, молибдена и кобальтом, данные элементы присутствуют в Cr-Ti-Mo карбидных покрытиях (рис.8-10). О точном количестве и распределении карбидных фаз в покрытиях в соответствии с диаграммами состояния не приходится говорить, поскольку процесс ХТО не является равновесным: процесс ХТО недостаточно длителен для гомогенизации фаз; образцы после ХТО не закалывают, как требуется при построении диаграмм состояний, а медленно охлаждаются; в образовании карбидов участвуют кроме углерода и металлов - диффузانتов также другие элементы, такие как кобальт, вольфрам и титан основы, алюминий - восстановитель оксидов насыщающих элементов и т.д.

В целом процессы образования многокомпонентных и многофазовых карбидных покрытий имеют сложную природу и являются результатом диффузионного взаимодействия насыщающих карбидообразующих металлов с углеродом твердосплавной матрицы, содержащей карбиды вольфрама и

титана. Диффузионное насыщение поверхности твердых сплавов карбидообразующими металлами в порошковых средах сопровождается перераспределением элементов (W, Ti и Co) подложки из-за взаимного влияния элементов, например, градиент химического потенциала хрома влияет на диффузионный поток углерода и т.д. Поэтому химико-термическая обработка твердого сплава приводит к образованию неравновесного фазового состава полученных карбидных слоев.

Из приведенных на рис.1 и в табл. 1 данных также видно, что по износостойкости и микротвердости трехкомпонентные Cr-Ti-Mo карбидные покрытия превосходят одно- и двухкомпонентные покрытия. Последнее обусловлено следующим: (i) большим содержанием в покрытии до 60-85% сложнолегированного карбида титана, имеющего в силу своей физической природы высокие механические свойства, (ii) наличием взаимной растворимости карбидов, входящих в состав многокомпонентных диффузионных слоев с образованием таких комплексных карбидов, как  $[\text{Ti}_{96}(\text{Cr},\text{Mo})_4]\text{C}$ ,  $[\text{Mo}_{77}\text{Ti}_{23}]\text{C}$  и  $[\text{Cr}_{98}(\text{Ti},\text{Mo})_2]_3\text{C}_2$ . Повышение износостойкости карбидных покрытий напрямую зависит от их толщины: оптимальной считается толщина 4 - 7 мкм. При такой толщине карбидный слой обладает наилучшей адгезией с основой. Нанесение на твердые сплавы более толстых слоев сопровождается образованием хрупкой интерметаллидной  $\eta$ -фазы, которая приводит к отслаиванию карбидных покрытий.

### Выводы

1. Сравнительный анализ условно построенной диаграммы фазового состава диффузионных покрытий в трехкомпонентной карбидной системе на основе Cr-Ti-Mo с диаграммами состояния карбидных систем Cr-Ti-C, Cr-Mo-C, Ti-Mo-C, позволил сделать вывод о несоответствии в количестве и распределении карбидных фаз на диаграммах.

2. Показано, что экстремальное повышение микротвердости и износостойкости оптимизированных Cr-Ti-Mo карбидных слоев обусловлено:

- большим содержанием (60-85%) в диффузионных слоях сложнелегированного карбида титана, обладающего наиболее высокими показателями механических свойств;
- формированием при ХТО гетерогенной структуры покрытий, состоящих из взаимно растворенных друг в друге карбидов на основе двух или трех насыщающих металлов;
- оптимальной толщиной покрытия (4-7 мкм), при которой не образуется хрупкая интерметаллидная  $\eta$ -фаза.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Громов, Ю.Н. Хромотитанирование порошковых твердых сплавов / Ю.Н.Громов, Н.Я. Кудрявцева, В.В. Котляров // Изв. вузов Чер. металлургия. - 1990. - №10. - С. 40-41.
2. Громов, Ю.Н. Химико-термическая обработка сталей и сплавов / Ю.Н. Громов, Н.Я. Кудрявцева, В.А. Котофеев // Хим. методы обраб. поверхностей неорган. матер.: Тез. докл. 3 Всес. семин., Москва, 23-24 мая 1991 г.-М., 1991. - С. 44.
3. Ленская, Т.Г. Диффузионное взаимодействие в системе твердый сплав с покрытием – обрабатываемый материал / Т.Г. Ленская // Исслед. тверд. сплавов / Всес. н.-и. и проект. ин-т. тугоплав. мет. и тверд. сплавов (ВНИИТС).- М., 1991.- С.151-155.
4. Хижняк, В.Г. Нанесение карбидных покрытий на безвольфрамовые твердые сплавы. / В.Г. Хижняк, В.Ю. Долгих, В.И. Король // Изв. вузов. Чер. металлургия.- 2002. - №1. - С. 75-76.
5. Хижняк, В.Г. Нанесение защитных покрытий на безвольфрамовые твердые сплавы. / В.Г. Хижняк, М.В. Карпец, В.Ю. Долгих // Порош. Металлургия (Киев). - 2003. - №9. - С.118-123.
6. Лоскутова, Т.В. Комплексное насыщение углеродистых сталей и твердых сплавов ниобием и хромом.: Автореф. дис. ... канд.техн.наук: 05.16.01/ Т.В. Лоскутова; Киев. политех. ин-т. - Киев, 2004 - 20 с.

7. Хижняк, В.Г. Разработка физико-химических и технологических основ нанесения на поверхность сталей и твердых сплавов двухкомпонентных покрытий на основе карбидов переходных металлов для повышения служебных характеристик изделий: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01 / В.Г. Хижняк; Нац. акад. наук Украины. - Киев, 1998 - 24 с.
8. Многокомпонентные диффузионные покрытия. / Ляхович Л.С. [и др.] – Минск: Наука и техника, 1974. – 288 с.
9. Hocking, M.G. Metallic and Ceramic Coatings. Production, Properties and Applications / M.G. Hocking, V. Vasantasree, P.S. Sidky. – London, New York: 2000. - 518 p.
10. Структура, фазовый состав износостойких покрытий (Ti,Zr)C, полученных магнетронным способом / О.В. Гусев [и др.] // Поверхн. слой, точ. и эксплуат. Свойства деталей машин: Тез.докл. семин., Москва, 25 мая 1990. – М., 1990. – 36 с.
11. Шматов, А.А. Многокомпонентное диффузионное насыщение твердых сплавов карбидообразующими металлами / А.А. Шматов, С.В. Побережный // Порошковая металлургия.- 2007. - №36 - С. 28-39.
12. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. Раздел III / Ф.С. Новик. - М.: МиСИС, 1970. - 106 с.
13. Диаграммы состояния металлических систем, опубликованные в 1966 г. / под ред. Н. В.Агеева. – М.: ВИНТИ, 1969. – с. 169–170, 173–175, 248–249.
14. Диаграммы состояния металлических систем, опубликованные в 1966 г. / под ред. Н. В.Агеева. – М.: ВИНТИ, 1969. – с. 169–170, 173–175, 248–249.
15. Кузьма, Ю.Б. Фазовые равновесия в системе молибден-хром-углерод / Ю.Б. Кузьма, Т.Ф.Федотов // Порошковая металлургия.- 1965. - №11 - С. 62-65.
16. Еременко, В. Н. Непрерывные ряды твердых растворов карбидов со структурой типа NaCl в тройных системах Mo(W)-Me<sub>N,V</sub>-C / В. Н. Еременко, Т.Я. Великанова, С.В. Шабалова // Порошковая металлургия. – 1973. – № 11 – С. 58–62.
17. Холек, Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов. / Х. Холек – М.: Металлургия, 1988. – 319 с.

Статья поступила в редакцию 02.10.2007

УДК 621.97+539.52

Хвисевич В.М., Пивник Я., Патеюк А., Якушевич С.

## ПЛАСТИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ВЕРХНИХ СЛОЕВ СПЛАВА PA2 ПРИ КОВКЕ

**Введение.** Технологические процессы изготовления различных валов основываются на операцияхковки. При таких операциях в верхних слоях изделий возникают значительные деформации. Теоретические основыковки касаются решения вопросов из области пластической обработки. Анализ этой проблемы часто сводится к решению краевых задач, относящихся к случаям, когда контур поперечного сечения вала является замкнутой выпуклой кривой с  $n^{\circ} = 2, 3 \dots$  осями симметрии. Представление решения охватывает соответствующую

стадию процесса деформирования вала, подверженно-го симметричному давлению. При этом учитывается, что силы трения достаточно малы и на протекание процесса влияет только нормальная составляющая скорости к поверхности изделия. В такой постановке процессковки вала дает такой же эффект как его симметричное сжатие, например, тремя или четырьмя плоскими, идеально гладкими штампами. При этом учитывается также достаточно большая длина нагруженной зоны цилиндра в сравнении с его диаметром.

*Хвисевич Виталий Михайлович, к.т.н., зав. кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

*Пивник Ян, д.т.н., профессор Белостокской политехники, Республика Польша.*

*Патеюк Алексей, к.т.н., доцент Белостокской политехники, Республика Польша.*

*Якушевич Сергузи, к.т.н., директор ZPD<sub>i</sub>UT, Белостокская политехника, Республика Польша.*