

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С ЖЕЛЕЗО-МОЛИБДЕНОВОЙ СВЯЗКОЙ

Выполнена экспериментальная оценка свойств твёрдых сплавов на основе 70% и 80% карбида титана с железной и железо-молибденовой связками при содержании молибдена 2%, 5%, 10% в сплаве. Установлено, что молибден в количестве 5% существенно повышает твёрдость, прочность при изгибе и износостойкость, снижает пористость сплавов.

Карбид титана, железная связка, шихта, пористость, карбидное зерно, износостойкость, прочность, твёрдость.

Экспериментальная оценка и анализ свойств твёрдых сплавов на основе карбида титана с разными стальными связками показали нецелесообразность применения в качестве связки сталей аустенитного, перлитного, карбидного классов из-за снижения уровня свойств сплавов даже по сравнению со сплавом с железной связкой. Оказались не востребовавшими такие свойства сталей, как высокая вязкость, высокая прочность, твёрдость и износостойкость, прежде всего, из-за ослабленных межфазовых границ между стальной связкой и карбидом титана [1].

Нами высказано предположение, что в качестве связки с карбидом титана необходимо использовать только стали ферритного класса (без углерода) с сильными феррито-карбидообразующими легирующими металлами, способными растворяться в карбиде титана. К таким металлам относятся молибден, вольфрам, ванадий, ниобий, тантал, образующие с карбидом титана твёрдый карбидный раствор на базе простой кристаллической решётки карбида титана. Например, в классических твёрдых сплавах группы ТК образуется карбидный твёрдый раствор  $(Ti, W)C$ , в сплавах группы ТТК – твёрдый раствор  $(Ti, W, Nb, Ta)C$ . Другие переходные металлы (хром, цирконий, гафний) слабо растворяются в карбиде титана из-за большой разницы атомных радиусов (Cr: 1,28Å, Zr: 1,6Å, Hf: 1,59Å) с титаном (Ti: 1,45Å).

Кроме растворения в карбиде титана легирующий металл должен хорошо растворяться в феррите и вызывать его упрочнение. Самым эффективным способом упрочнения феррита является выделение из пересыщенного твёрдого раствора дисперсных интерметаллидов в виде отдельной фазы с частично когерентным сопряжением кристаллических решёток интерметаллида и феррита либо в виде зон с полностью когерентным сопряжением с ферритом. Из названных металлов к хорошим упрочнителям феррита относятся хром, молибден и ванадий. Однако хром плохо взаимодействует с карбидом титана. Ванадий более склонен к карбидообразованию, интерметаллид с железом образует только при высокой концентрации (около 50%) в твёрдом растворе. Молибден способен образовывать интерметаллиды типа  $Fe_7Mo_6$  уже при концентрации ~10% в феррите.

Приведённые соображения позволяют считать молибден лучшим легирующим компонентом для ферритной связки в твёрдых сплавах на основе карби-

да титана. Для изучения нами выбраны сплавы на основе 70%TiC, остальное – ферритная связка с содержанием молибдена в сплаве 2,5%, 5%, 10% масс. (соответственно 8,3%, 16,7%, 33,3% в связке). Дополнительно выбран сплав 80%TiC, 5%Mo, 15%Fe (по аналогии со сплавом ТН20: 80%TiC, 5%Mo, 15%Ni), для сравнения – сплавы 70%TiC,30%Fe; 80%TiC,20%Fe; 85%TiC,15%Fe; 90%TiC,10%Fe.

Из указанных сплавов были изготовлены образцы в количестве 6 штук для каждой температуры спекания (3 образца для испытания на абразивный износ, они же повторно – для испытания прочности при изгибе). Твёрдость, пористость и средний размер карбидного зерна определялись на шлифах частей образцов после разрушающих испытаний. Установленные свойства сплавов приведены в таблице.

Анализ экспериментальных данных показал:

1. Все свойства всех сплавов находятся в зависимости от температуры спекания. Оптимальная температура соответствует наиболее высокому уровню всех механических свойств. Например, для сплава 70%TiC,5%Mo,25%Fe оптимальная температура спекания – 1550°C (рис. 1).

2. Молибден, введённый в состав связки Fe-Mo, снижает примерно на 50°C оптимальную температуру спекания по сравнению с чисто железной связкой (с 1600°C до 1550°C в сплавах с 70%TiC). Хорошее уплотнение сплавов (пористость 1,5–2,5%) достигается уже при 1500°C (ниже температуры плавления железа). Это можно объяснить образованием механического твёрдого раствора Fe-Mo при тонком размоле шихты.

3. Молибден значительно снижает пористость сплавов. Пористость в сплавах с 70%TiC при оптимальной температуре спекания 1550°C составляет 0,6–1,2% (у сплава с железной связкой – 3,4%). Снижение пористости свидетельствует о хорошей смачиваемости карбида титана железо-молибденовой связкой.

4. Молибден способствует уменьшению среднего размера карбидного зерна в основном в связи со снижением температуры спекания. Однако высокое содержание молибдена (10% в сплаве) усложняет эту зависимость: при температурах 1500–1550°C – тормозит рост, при высокой температуре 1650°C – ускоряет рост карбидных зёрен.

5. Содержание молибдена в сплаве (и в связке) оказывает значительное влияние на механические свойства сплавов (прочность при изгибе, твёрдость,

износ абразивом) по экстремальной зависимости с максимумом для прочности и твёрдости, с минимумом для износа абразивом при 5% молибдена в сплаве (рис. 2). По-видимому, 2,5% молибдена недостаточно для одновременного растворения в карбиде титана и существенного упрочнения феррита. Избыточная концентрация молибдена (10% в сплаве) приводит к снижению микротвёрдости карбидов, к усиленному росту карбидных зёрен, к чрезмерному упрочнению

(охрупчиванию) ферритной связки. У сплава 70%TiC,5%Mo,25%Fe обнаружен высокий уровень свойств (HRA89,5;  $\sigma_u = 970$ МПа), что делает этот сплав пригодным для технического применения (например, в качестве износостойкого материала).

6. Ещё более высокий уровень основных свойств достигнут у сплава 80%TiC,5%Mo,15%Fe:HRA91;  $\sigma_u = 830$ МПа, износ абразивом 5,7 мг приблизился к износу стандартного твёрдого сплава T15K6:5,5 мг.

Таблица

Свойства твёрдых сплавов TiC-Mo-Fe при разных температурах спекания

№ п/п	Состав сплава, % масс.	Температура спекания, °С	Линейная усадка, %	Пористость, %	Средний размер карбидных зёрен, мкм	Предел прочности при изгибе, МПа	Твёрдость HRA	Износ абразивом, мг
1.	70%TiC,30% Fe	1550	21,5	-	3	710	85	30,4
		1600	22,2	3,4	5	790	86	20,2
		1650	22,6	-	7	750	85,5	24,3
2.	70%TiC, 2,5%Mo,27,5 %Fe	1500	22	2,5	2	670	85	20,8
		1550	23,9	1,2	3	860	88	16,5
		1600	24,2	1	4	810	88	22,5
3.	70%TiC, 5%Mo, 25%Fe	1500	23,4	2	2	860	85	26,5
		1550	23,8	0,6	3	970	89,5	7,2
		1600	24,4	1,1	4	930	90	8,1
		1650	25,2	-	5	840	90	18,4
4.	70%TiC, 10%Mo, 20%Fe	1500	24	1,5	1,5	820	86	14,8
		1550	25,2	0,8	2,5	880	88,5	8,5
		1600	25,6	1	5	770	89	10,5
		1650	26	1	8	650	88	-
5.	70%TiC, 10%Mo, 20%Fe	1500	22,5	2,2	2	780	89	12,5
		1550	23,2	1,5	3,5	830	91	5,7
		1600	24	1,5	5	750	90	8,8

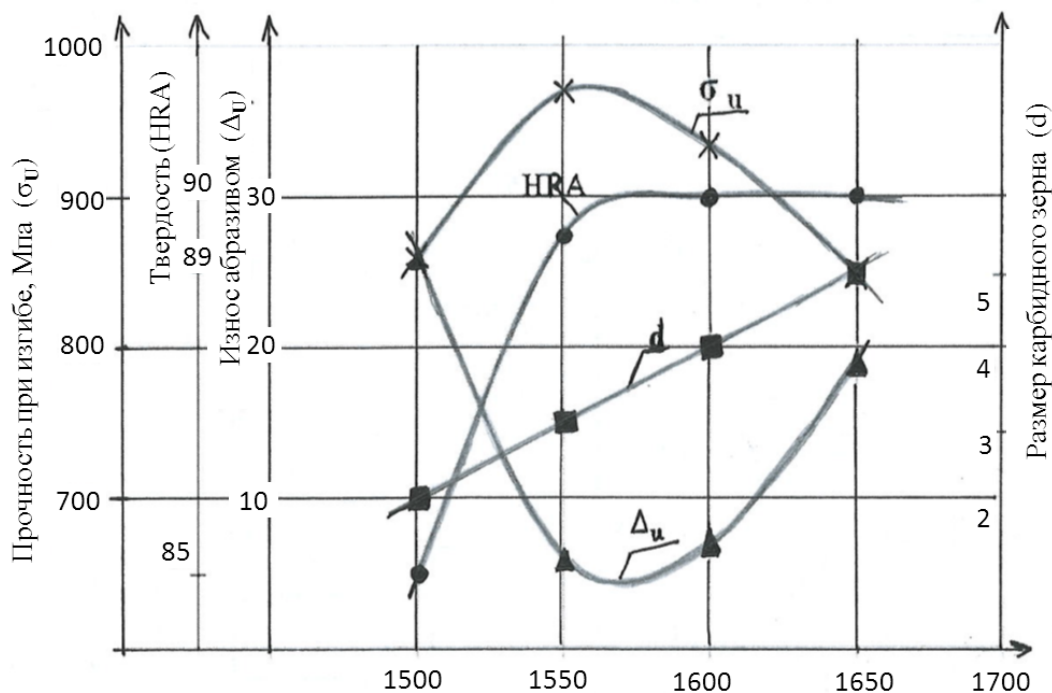


Рис. 1. Влияние температуры спекания на свойства сплава 70%TiC,5%Mo,25%Fe

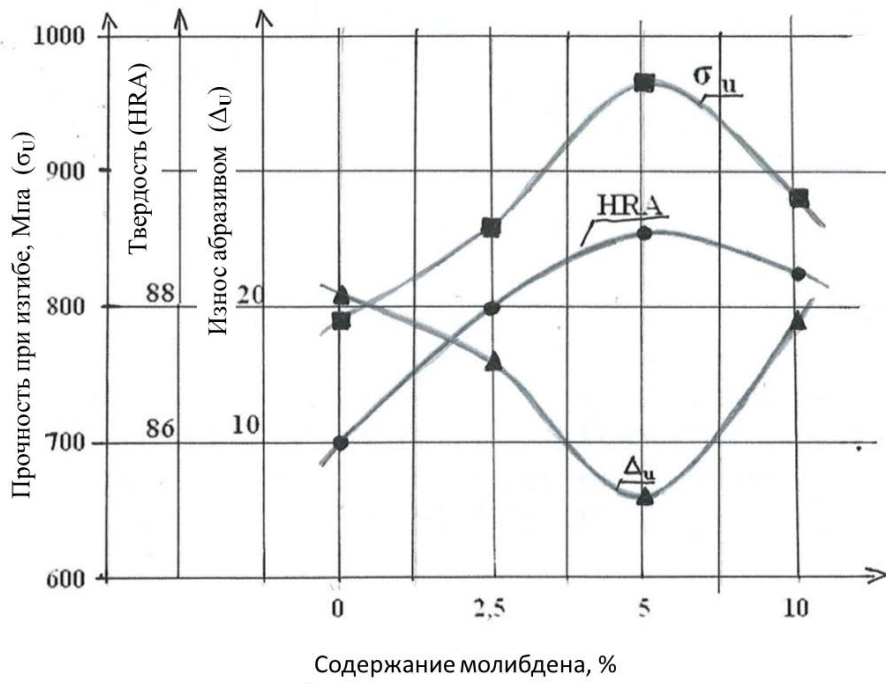


Рис. 2. Влияние содержания молибдена на свойства сплавов 70%TiC-Mo-Fe

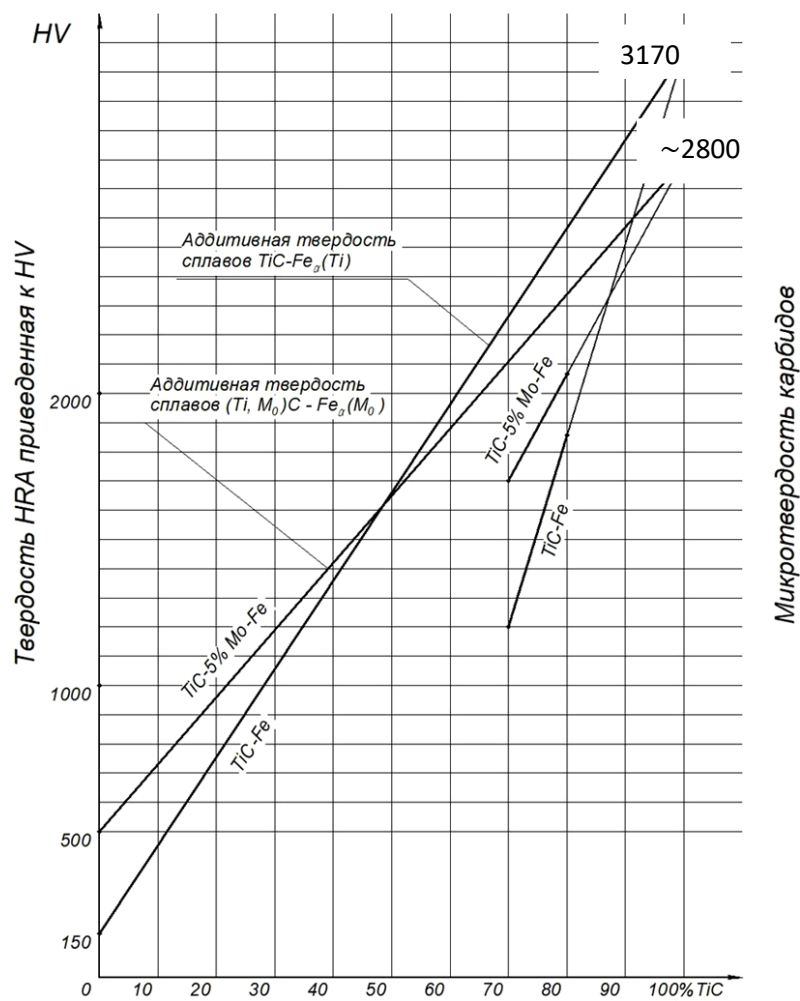


Рис. 3. Твёрдость сплавов TiC-Fe TiC-5%Mo-Fe

7. Твёрдость сплавов TiC-Fe и TiC-5%Mo-Fe подчиняется общим аддитивным зависимостям для гетерогенных материалов. На рис. 3 представлены теоретические аддитивные зависимости  $TiC-Fe_{\alpha}(Ti)$  и  $(Ti,Mo)C-Fe_{\alpha}(Mo)$ . Экспериментально установленная твёрдость сплавов 70%TiC, 30%Fe – 80%TiC, 20%Fe и сплавов 70%TiC,5%Mo,25%Fe – 80%TiC,5%Mo,15%Fe ожидаемо и закономерно выстроилась в две линии ниже теоретических аддитивных линий. Снижение твёрдости сплавов объясняется, с одной стороны, некоторой дефектностью (пористостью) сплавов и разными условиями пластической деформации при оценке макротвёрдости по Роквеллу и микротвёрдости по Виккерсу, с другой. Под индентором Роквелла под нагрузкой 600Н менее твёрдая связка в бо́льшей степени вовлечена в пластическую деформацию, чем разделённые связкой мелкие карбидные зёрна. Интерес представляет экстраполяция экспериментальных линий на ось микротвёрдости. Она показывает, что карбид титана сохраняет свою мик-

ротвёрдость HV3170 в сплавах TiC-Fe, а микротвёрдость карбидного твёрдого раствора  $(Ti,Mo)C$  снижена до  $\sim HV2800$ . В целом, молибден способствует значительному повышению твёрдости сплавов.

8. Прочность при изгибе в сплавах на основе карбида титана заметно увеличивается при введении в ферритную связку 5% молибдена (рис. 4) благодаря улучшению взаимодействия связки с карбидом титана и упрочнению связки.

9. Износ абразивом (рис. 5) при введении в состав сплава 5% молибдена значительно уменьшается (с 20,2 мг до 7,2 мг у сплава на основе 70%TiC, с 14,5 мг до 5,7 мг у сплава с 80%TiC). Кроме общего повышения твёрдости сплавов, упрочнения связки, повышения прочности межфазовых границ объяснение следует искать в структуре сплавов. Предположительно, карбидные зёрна, объединённые в каркас, более успешно сопротивляются микрорезанию абразивными зёрнами.

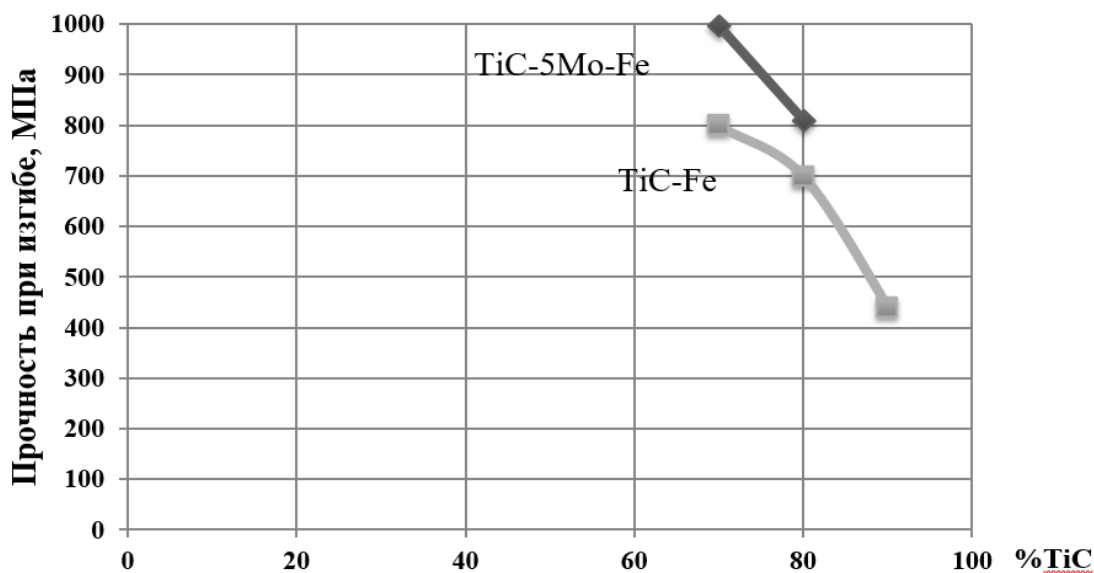


Рис. 4. Прочность сплавов TiC-Fe TiC-5%Mo-Fe

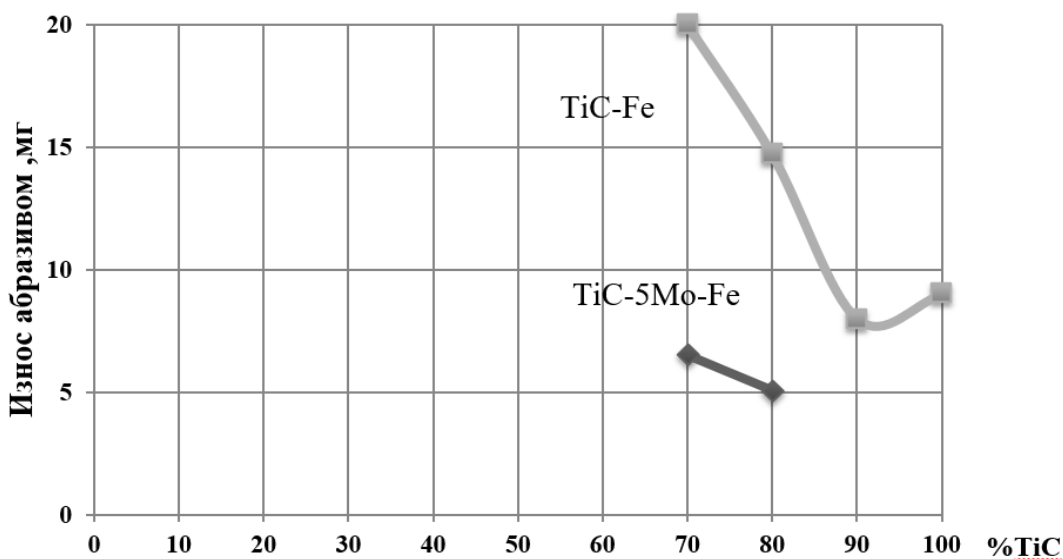


Рис. 5. Износ абразивом TiC-Fe TiC-5%Mo-Fe

Связь свойств со структурой сплавов на основе карбида титана с железо-молибденовой связкой более подробно изложена в нашей последующей работе.

Литература

1. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твёрдых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень

// Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надёжность машин приборов и оборудования: материалы XIII междунар. науч.-техн. конф. / ВоГУ. – Вологда, 2018. – С. 281–284.

**S.V. Ianjak, G.Y. Piven**

### **EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE PROPERTIES OF HARD ALLOYS BASED ON TITANIUM CARBIDE WITH IRON-MOLYBDENUM BUNDLE**

The properties of hard alloys on the basis of 70% and 80% titanium carbide with iron and iron-molybdenum ligaments are experimentally evaluated at the molybdenum content of 2%, 5%, 10% in the alloy. It was found that molybdenum in the amount of 5% significantly increases the hardness, bending strength and wear resistance, reduces the porosity of alloys.

Titanium carbide, iron oxide, charge, porosity, carbide grain, wear resistance, strength, hardness.