



АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С ЖЕЛЕЗО-МОЛИБДЕНОВОЙ СВЯЗКОЙ

Металлографический, рентгеноструктурный, фрактографический виды анализов позволили установить различия в структурах сплавов на основе карбида титана с железной и железо-молибденовой связками. В сплаве 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe обнаружено сильное легирование феррита и образование интерметаллида, с которыми связывается упрочнение связки и сплава в целом.

Карбид титана, феррит, интерметаллид, легирование, железная связка, микрорельеф, сплав, микроструктура.

У твёрдых сплавов на основе карбида титана с железо-молибденовой связкой нами экспериментально установлен [1] высокий уровень механических свойств (табл.), который позволяет рекомендовать сплавы 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe – 80%TiC, 5%Mo, 15%Fe для промышленного использования в качестве износостойких материалов как альтернативу другим твёрдым сплавам и износостойким сталям.

Положительное влияние молибдена на свойства твёрдых сплавов на основе карбида титана с никель-молибденовой связкой отмечено во многих работах отечественных и зарубежных авторов.

Для объяснения повышения основных механических свойств (прочности при изгибе, твёрдости, износа абразивом) за счёт легирования молибденом нами проведён комплексный сравнительный анализ структуры экспериментальных твёрдых сплавов TiC-Fe-Mo и TiC-Fe [2].

Для анализа микроструктуры использовались: металлографический микроскоп «Neophot-2» (Германия) и электронный микроскоп «JSM-35» (Япония). Рентгеноструктурный фазовый анализ выполнен на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-3». Фрактографи-

ческий анализ поверхностей разрушения и износа производился на электронном микроскопе «JSM-35».

Металлографический анализ показал сходство микроструктур сплавов 70%TiC, 30%Fe и 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe (рис. 1).

В микроструктурах наблюдаются округлые зёрна карбида, частично объединённые (слившиеся) в агрегаты, в большей степени – в сплаве с молибденом. Сплошного карбидного каркаса нет. Фрагменты (прослойки) связки довольно равномерно окружают карбидные зёрна, между отдельными агрегатами – увеличены, но по ширине не превышают средний размер карбидного зерна. В сплаве с молибденом средний размер карбидного зерна (3 мкм) меньше, чем в сплаве с железной связкой (5 мкм). Это связано со снижением оптимальной температуры спекания.

Микроструктуры сплавов на основе 80%TiC имеют большое сходство со сплавом на основе 70%TiC и закономерные отличия: несколько больший размер карбидных зёрен, меньший объём связки, большая степень агрегатирования зёрен (фактически образование карбидного каркаса в сплаве 80%TiC, 5%Mo, 15%Fe).

Таблица

Свойства твёрдых сплавов TiC-Mo-Fe

№ п/п	Состав сплава, % масс.	Оптимальная температура спекания, °С	Пористость, %	Средний размер карбидных зёрен, мкм	Предел прочности при изгибе, МПа	Твёрдость HRA	Износ абразивом, мг
	1	2	3	4	5	6	7
1	70%TiC, 30%Fe	1600	3,4	5	790	86	20,2
2	70%TiC, 2,5%Mo, 27,5%Fe	1550	1,2	3	860	88	16,5
3	70%TiC, 5%Mo, 25%Fe	1550	0,6	3	970	89,5	7,2
4	70%TiC, 10%Mo, 20%Fe	1550	0,8	2,5	880	88,5	8,5
5	80%TiC, 5%Mo, 15%Fe	1600	1,5	3,5	830	91	5,7
6	80%TiC, 20%Fe	1650	4	5	700	88,5	14,5

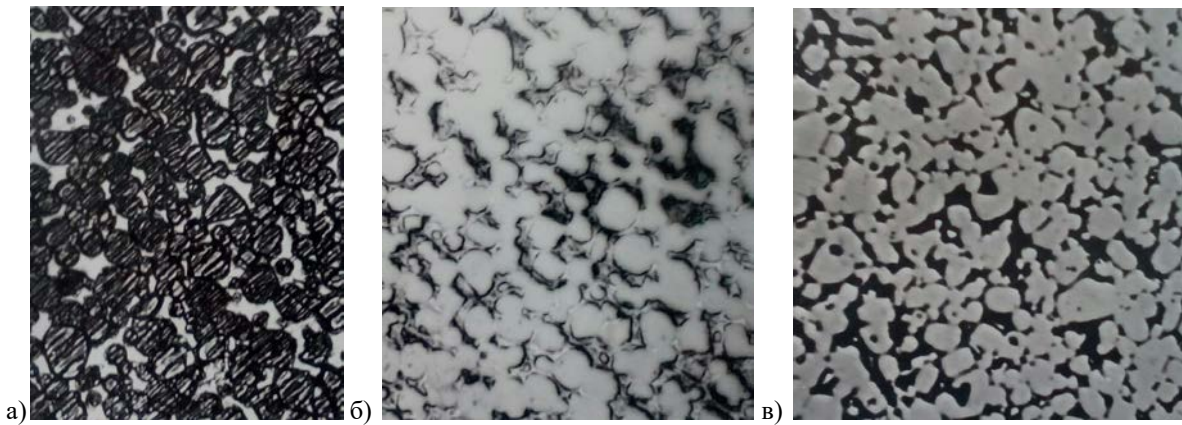


Рис. 1. Микроструктуры сплавов: а) 70%TiC, 30%Fe, травление реактивом Мураками;
 б) 70%TiC, 30%Fe, травление солянокислым хлорным железом;
 в) 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe, травление азотной кислотой

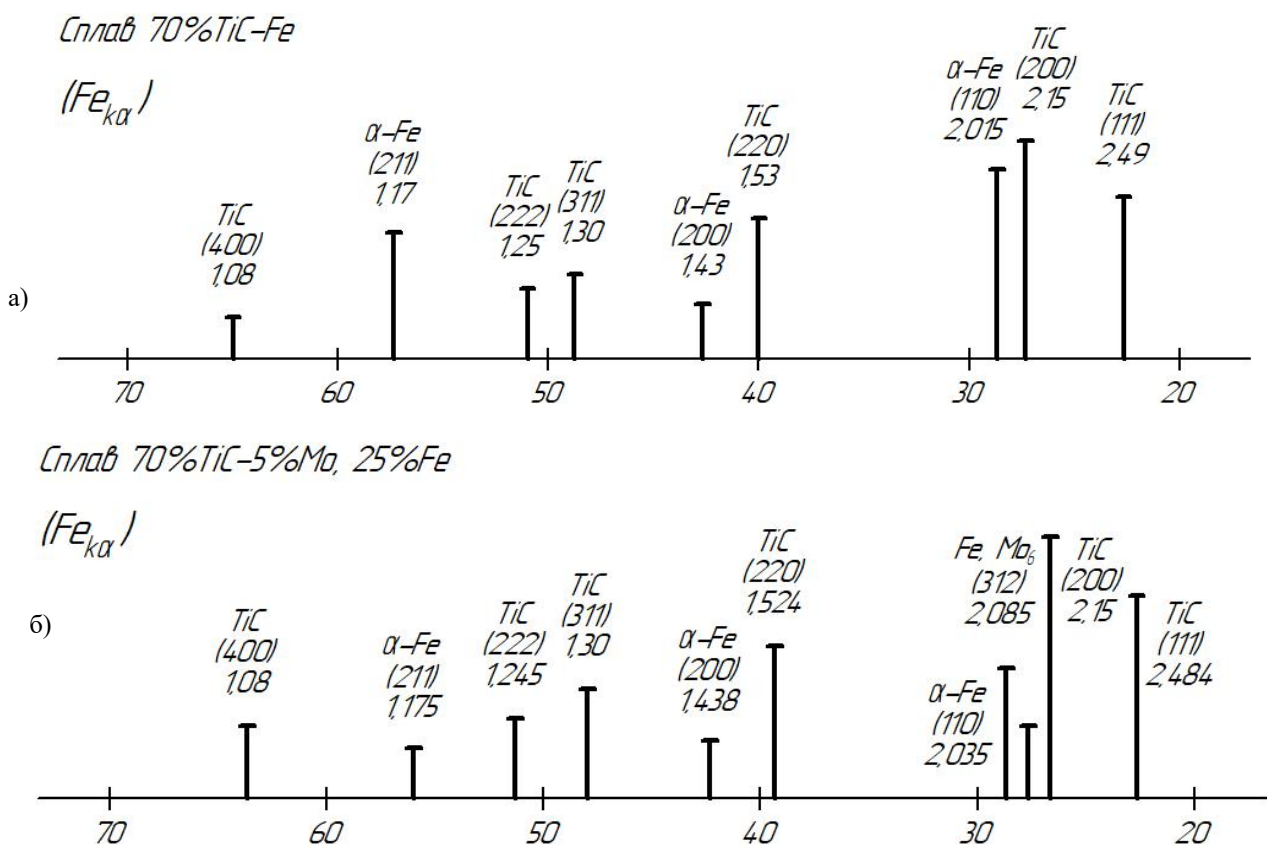


Рис. 2. Рентгенограммы сплавов: а) 70%TiC, 30%Fe,
 б) 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe

Рентгеноструктурный фазовый анализ обнаруживает различия в фазовом составе сплавов 70%TiC, 30%Fe (рис. 2а) и 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe (рис. 2б).

Линии (межплоскостные расстояния) феррита (α -Fe) сильно смещены у сплава с молибденом в сторону увеличения: у сплава TiC-Fe расстояние (110) составляет 2,015Å, у сплава TiC-Mo-Fe расстояние (110) – 2,035Å. Это свидетельствует о значительном растворении молибдена с атомным радиусом 1,40Å в феррите (атомный радиус железа 1,27Å). В сплаве TiC-Mo-Fe на пределе чувствительности метода (2% в сплаве, 7% в связке) обнаружена линия – межплос-

костное расстояние (321) 2,085 Å – наиболее интенсивная линия интерметаллидного соединения Fe₇Mo₆. Это означает, что часть молибдена в сплаве превратилась в соединение, упрочняющее связку. Выделение интерметаллида возможно только из пересыщенного твёрдого раствора (молибдена в α -железе). Остаточная растворимость молибдена в железе зафиксирована на рентгенограмме. С учётом атомных радиусов металлов (у железа – 1,27Å, у молибдена – 1,40Å) по изменению межплоскостного расстояния (110) феррита с 2,015Å до 2,035Å (на 0,02Å), с учётом расположения атомов молибде-

на в параллельных плоскостях атомов по обе стороны расстояния (110) можно ориентировочно определить содержание молибдена в феррите: 8–10% масс. (рис. 3). Линии карбида титана в сплаве TiC-Mo-Fe немного сдвинуты влево, в сторону уменьшения межплоскостных расстояний: (111) 2,484Å; (220) 1,524Å; (222) 1,245Å. У сплава TiC-Fe соответственно: (111) 2,49Å; (220) 1,53Å; (222) 1,25Å. Это свидетельствует об образовании твёрдого карбидного раствора (Ti,Mo)C на базе кубической кристаллической решётки карбида титана. Уменьшение параметров решётки вызвано меньшим атомным радиусом молибдена (1,40Å) по сравнению с атомным радиусом титана (1,45Å). Примерное распределение молибдена по фазам из 5% в сплаве: 1% – в карбидном твёрдом растворе (Ti,Mo)C, 1% – в интерметаллидах Fe₇Mo₆, 3% – в феррите α-Fe(Mo). Рентгенофазовый анализ других сплавов не проводился. Ожидается другое распределение молибдена в сплаве с 10% Mo: 2–4% – в (Ti,Mo)C, 5–6% – Fe₇Mo₆, 3–4% – в α-Fe.

Молибден, введённый в сплав на основе карбида титана с железной связкой, заметно меняет вид поверхности разрушения при изгибе (изломе) сплава (рис. 4).

Сплав с молибденом имеет более мелкую фасетку разрушения карбидных зёрен (если привести снимки к одинаковому увеличению). Разрушающая трещина в сплаве с молибденом пересекает почти все карбидные зёрна (что свидетельствует об упрочнении связки и её границ с карбидными зёрнами). В сплаве без молибдена разрушающая трещина значительно чаще проходит по ослаблённым границам зёрен со связкой. Характер разрушения железной связки – чашечный, вязкий, железо-молибденовой связки – преимущественно, хрупкий, что дополнительно подтверждает упрочнение связки (за счёт образования твёрдого раствора и интерметаллидов). Фрактография объясняет повышение прочности при изгибе (на 20%) сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe по сравнению со сплавом 70%TiC, 30%Fe.

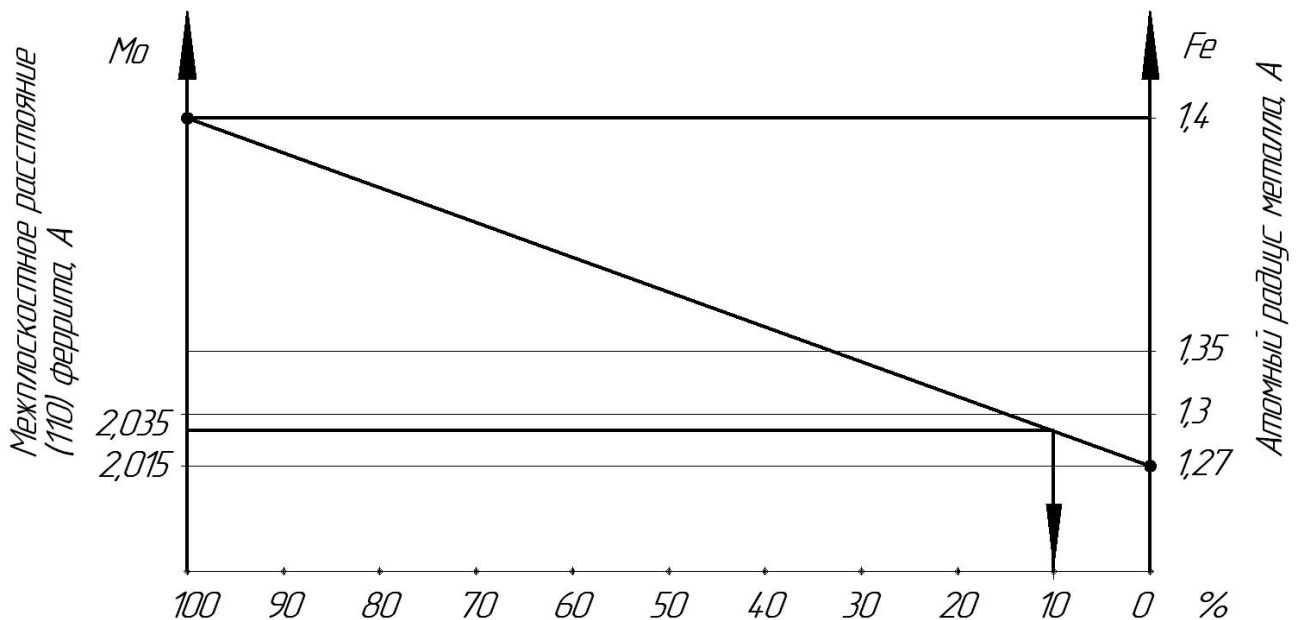


Рис. 3. Содержание молибдена в феррите

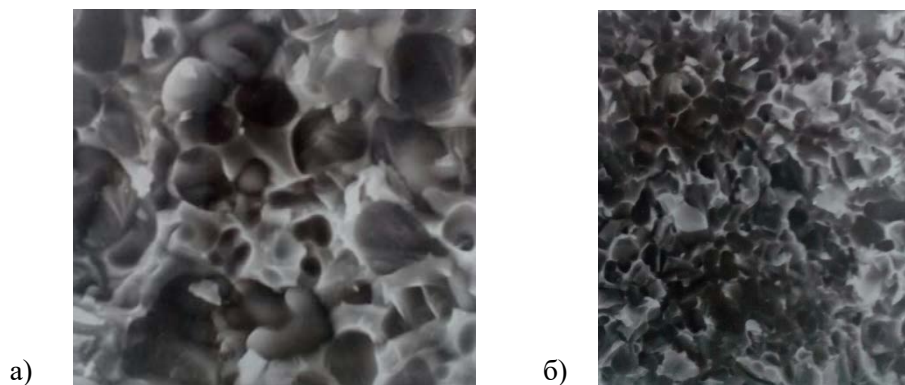


Рис. 4. Микрорельеф излома: а) сплава 70%TiC, 30%Fe x2000, б) сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe, x1000

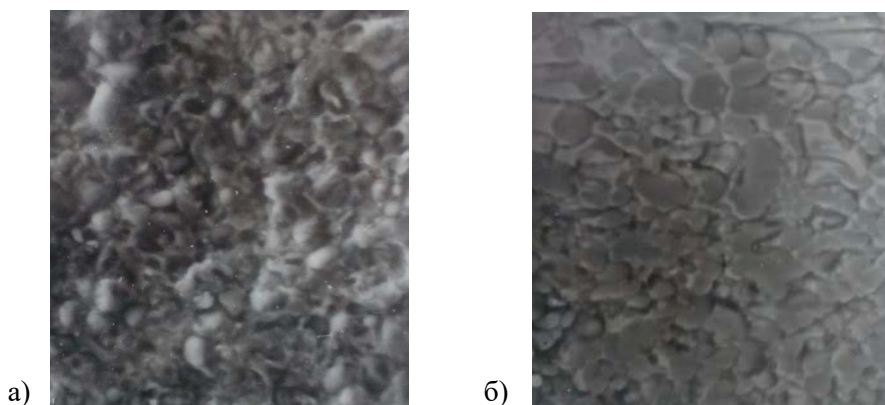


Рис. 5. Микрорельеф изношенных абразивом поверхностей:
а) сплава 70%TiC, 30%Fe, б) сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe

Наиболее заметны различия поверхностей сплавов с железной и железо-молибденовой связкой после износа абразивом (рис. 5).

На изношенной поверхности сплава 70%TiC, 30%Fe заметны признаки разрушения (выкрашивания) мелких карбидных зёрен из-за их ослабленной связи с железной связкой). Ресурс сплава (высокая микротвёрдость карбида титана) не использован. У сплава с железо-молибденовой связкой карбидные зёрна постепенно изнашиваются более твёрдым электрокорундовым абразивом без выкрашивания. Это означает, что связка прочно удерживает карбидные зёрна до их полного износа и обнажения новых зёрен. Менее твёрдая связка изнашивается быстрее, образуя на микрорельефе углубления между зёрнами. Такое поведение объясняет значительное (в 3 раза) повышение износостойкости сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe по сравнению со сплавом 70%TiC, 30%Fe.

Диаграмма состояния сплавов железо-молибден [3] показывает сильное ферритообразующее влияние молибдена. Уже при 3,3% масс. молибдена в сплавах Fe-Mo (что соответствует 1% масс. в сплавах 70%TiC-Mo-Fe) происходит полное «выклинивание» аустенитной области γ -Fe. При концентрации молибдена 53% масс. образуется стабильная ϵ -фаза, которая рентгенографически идентифицируется как интерметаллид Fe_7Mo_6 . В пределах концентрации молибдена от 37% при 1400°C до 6,7% масс. при 650°C существует переменная растворимость молибдена в железе, которая означает выделение при охлаждении из перенасыщенного твёрдого раствора α -Fe(Mo) избыточного молибдена. Выделение молибдена приводит либо к возникновению зон упорядоченного твёрдого раствора с повышенной концентрацией молибдена до состава $MoFe_2$ (типа фазы Лавеса), либо при неравновесных условиях (связанных с повышенной скоростью охлаждения или с ликвацией) – к образованию богатой молибденом ϵ -фазы (интерметаллида Mo_6Fe_7).

Фазовый анализ диаграммы состояния Fe-Mo полностью подтверждает наши данные рентгеноструктурного фазового анализа сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe, подтверждает факт упрочнения связки по твёрдорастворному и дисперсному механизмам (за счёт легирования молибденом феррита и образования

в связке дисперсных упрочняющих интерметаллидных фаз).

Выводы:

Молибден в составе железо-молибденовой связки в сплавах с TiC-Fe-Mo вызывает существенные изменения в структуре сплавов по сравнению со сплавами TiC-Fe:

1. Обнаружено уменьшение среднего размера карбидного зерна, вызванное снижением оптимальной температуры спекания \sim на 50°C в связи с уменьшением температуры плавления связки.

2. Значительно уменьшается пористость сплавов (в 3–5 раз) благодаря улучшению взаимодействия связки с карбидом титана, так как молибден при температуре спекания имеет высокую растворимость как в железе, так и в карбиде титана (рис. 2).

3. Происходит повышение прочности межфазовых границ и связки (рис. 4), что приводит к повышению прочности (на 10–25%).

4. Меняется характер износа поверхности сплава (рис. 5), что обеспечивает повышение износостойкости при абразивном изнашивании (в 1,5–3 раза).

5. Структурное состояние связки (сталь ферритного класса с интерметаллидным упрочнением) предположительно является оптимальным для твёрдых сплавов на основе карбида титана со стальной связкой.

Литература

1. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твёрдых сплавов на основе карбида титана с железо-молибденовой связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Вестник Вологодского государственного университета. – Вологда: ВГПУ, 2018. – С. 23–27.

2. Третьяков, В. И. Основы металлургии и технологии производства спеченных твёрдых сплавов / В. И. Третьяков. – Москва: Металлургия, 1976. – 528 с.

3. Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко; пер. с англ. П. К.Новика, М. Б. Гутермана, Л. Б. Вульф, Г. В. Инденбаум. – Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – 760 с.

S.V. Yanyak, G.Y. Piven
Vologda State University

**ANALYSIS OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF HARD ALLOYS BASED ON TITANIUM CARBIDE
WITH IRON-MOLYBDENUM BUNDLE**

Metallographic, x-ray, factographic types of analysis allowed to establish differences in structures of alloys on the basis of titanium carbide with iron and iron-molybdenum bundles. In the alloy of 70%TiC,5% Mo,25%Fe we found a heavy doping of ferrite and formation of the intermetallic compound, which is associated with hardening of the bundle and of the alloy on the whole.

Titanium carbide, ferrite, intermetallic compound, doping, iron bundle, microrelief, alloy, microstructure.