

УДК 621.7.014

**А. Г. КОСТОРНОВ, О. И. ФУЩИЧ, Т. М. ЧЕВЫЧЕЛОВА,
В. Т. ВАРЧЕНКО, А. Д. КОСТЕНКО, В. Ф. ГОРБАНЬ, М. В. КАРПЕЦЬ**

Институт проблем материаловедения НАН Украины

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti+10Mo

Сообщение 2.

**А. Г. КОСТОРНОВ, О. И. ФУЩИЧ, В. Ф. ГОРБАНЬ,
Т. М. ЧЕВЫЧЕЛОВА, М. В. КАРПЕЦЬ**

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti+10Mo И СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПРИ ТРЕНИИ ВТОРИЧНЫХ ПЛЕНОК

Исследованы фазовый состав, структурное состояние и некоторые механические свойства ($H_{Т1}$ – твердость, H/Er – нормированная твердость, ε – упругая деформация и σ – предел упругости) композиционных материалов (KM1 Ti+10Mo+MoS₂, KM2 Ti+10Mo+MoSe₂, KM3 Ti+10Mo+CaF₂, KM4 Ti+10Mo+BN) и вторичных пленок, синтезированных на поверхности материалов при их трении в паре со сталью 45 на воздухе при $V = 6$ и 15 м/с под давлением $0,8$ МПа.

Ключевые слова: композиционный материал, состав, структура, скорость скольжения, давление, коэффициент трения, износ, температура, синтез, вторичная смазывающая пленка, нанокристаллическое состояние, фазовый состав, механические свойства.

Введение. Цель работы – исследовать структуру, фазовый состав и механические свойства композиционных материалов на основе титанового сплава Ti+10Mo (KM1 Ti+10Mo+MoS₂, KM2 Ti+10Mo+MoSe₂, KM3 Ti+10Mo+CaF₂, KM4 Ti+10Mo+BN) и смазывающих вторичных пленок, синтезированных на их поверхностях при трении на воздухе без смазывания при скоростях скольжения 6 и 15 м/с под давлением 0,8 МПа; проанализировать факторы, определяющие триботехнические свойства пар трения при указанных условиях работы.

Методы исследования. Структуру спеченных композиционных материалов исследовали при помощи микроскопа МИМ-8, а фазовый состав — на рентгеновской установке ДРОН. Механические характеристики КМ определяли микроиндетированием на установке «Микрон–гамма» по методике, изложенной в работах [1; 2]. Микроиндетирование проводили при комнатной температуре с нагрузкой 90 г алмазной пирамидой Берковича ($\alpha=65^\circ$). Точность определения нагрузки составляет 10^{-3} Н, а глубины h внедрения индентора — $\pm 2,5$ нм. Твердость $H_{Т1}$, модуль упругости $E_{Т1}$ определяли по ISO 14577-2002.

Результаты исследований и их обсуждение. На первом этапе исследовали структуру и фазовый состав вторичных пленок, синтезированных сухим трением на поверхности композиционных материалов Ti+10Mo+CaF₂ и Ti+10Mo+BN, работающих в паре из сталью 45 при давлении 0,8 МПа и скоростях скольжения 6 и 15 м/с (табл. 1 и 2). Из табл. 1 следует, что структура вторичных пленок на

поверхности КМЗ в процессе его трения в паре со сталью 45 под давлением 0,8 МПа при скоростях скольжения 6 и 15 м/с, микрогетерогенна. Их матрица представляет собой смесь твердых растворов молибдена в α -Ti и β -Ti, а твердая смазка — это смесь фтористого кальция CaF_2 с оксидами железа и титана (Fe_2O_3 и TiO). Синтезированные на поверхности трения КМЗ при разных скоростях скольжения вторичные пленки отличаются только содержанием структурных составляющих. Пленка, синтезированная при скорости скольжения 15 м/с, содержит 33,55 % твердой смазки, при скорости скольжения 6 м/с — всего 15,52 % соединений, выполняющих роль твердой смазки. Соответственно, коэффициент трения КМЗ при трении в паре со сталью 45 и $V = 6$ м/с больше ($f=0,38$) коэффициента трения этой той же пары при $V = 15$ м/с ($f=0,28$).

Матрица вторичной пленки, синтезированной при $V = 6$ м/с, представляет собой смесь твердых растворов молибдена в α -Ti и β -Ti в количестве 84,48 %; 15,52 % в структуре пленки занимает твердая смазка. Матрица вторичной пленки, синтезированная при $V = 15$ м/с, состоит из смеси тех же твердых растворов молибдена в α -Ti и β -Ti, но в количестве всего 66,45 %; 33,55 % в структуре пленки занимает твердая смазка. Следовательно, матрица этой пленки менее прочная по сравнению с матрицей пленки, сформировавшейся при $V = 6$ м/с, что и является причиной большего износа КМЗ при $V = 15$ м/с ($I_{\text{км}} = 3,11$ мг/км) по сравнению с износом при $V = 6$ м/с ($I_{\text{км}} = 0,53$ мг/км) (табл. 1).

Таблица 1

Фазовый состав исходного КМЗ Ti+10Mo+CaF₂ (а) и вторичных пленок, синтезированных всухую на его поверхности при P=0,8 МПа и скоростях скольжения стали 45 (контртела) 15 (б) и 6 м/с (в)

Объект исследования. Коэффициент трения f пары Ti+10Mo+CaF ₂ – сталь 45 и износ КМ $I_{\text{км}}$; режим трения	α -TiMo	β -TiMo	CaF ₂	TiO	Fe ₂ O ₃
	Содержание фаз, % (мас.)				
<i>а</i> – Исходный КМЗ Ti+10Mo+CaF ₂	46	41	13	—	—
	87 – матрица КМЗ		13 – твердая смазка КМЗ		
Вторичная пленка <i>б</i> – $f=0,28$; $I_{\text{км}} = 3,11$ мг/км $V = 15$ м/с, $P = 0,8$ МПа	51,02	15,43	5,06	13,12	15,37
	66,45 – матрица вторичной пленки		33,55 – твердая смазка вторичной пленки		
Вторичная пленка <i>в</i> – $f=0,38$; $I_{\text{км}} = 0,53$ мг/км $V = 6$ м/с, $P = 0,8$ МПа	48,12	36,36	3,55	4,1	7,87
	84,48 – матрица вторичной пленки		15,52 – твердая смазка вторич- ной пленки		

При трении пары КМ4 Ti+10Mo+BN — сталь 45 на воздухе всухую под давлением 0,8 МПа с увеличением скорости скольжения от 1 до 6 м/с массовый износ материала снизился в 2,5 раз (с 0,75 до 0,30), а с увеличением скорости скольжения от 6 до 15 м/с он увеличился в 1,57 раза по сравнению $I_{\text{км}}$ при 6 м/с (с 0,30 до 0,47 мг/км). В то же время, коэффициент трения пары снизился с повышением скорости скольжения стали 45 от 6 до 15 м/с 1,33 раза (с 0,48 до 0,36).

Объяснение полученных результатов дает исследование структуры и фазового состава вторичных смазывающих пленок, синтезированных при сухом трении на воздухе на поверхности образцов композиционного материала КМ4 Ti+10Mo+BN (табл. 2).

Структура синтезированных трением вторичных пленок, так же, как и исходного материала, — микрогетерогенна. Их несущая структурная составляющая (матрица) — это

твердый раствор молибдена в α -титане, упрочненный частицами TiB и TiN. Твердая смазка — смесь нитрида бора BN с оксидами титана TiO₂ и железа Fe₂O₃. Можно предположить, что оксид железа образовался за счет взаимодействия кислорода воздуха с железом, перенесенного на поверхность трения образца с поверхности стали 45.

Таблица 2

Фазовый состав исходного KM4 Ti+10Mo+BN (а) и вторичных пленок, синтезированных трением на его поверхности при P=0,8 МПа и скоростях скольжения стали 45 (контроля) б (б) и 15 (в) м/с

Объект исследования. Коэффициент трения f пары Ti+10Mo+BN- сталь 45 и износ КМ $I_{км}$;	Содержание фаз, %(мас.)					
	α -TiMo	TiB	TiN	BN	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
а – Исходный КМ Ti+10Mo+BN	73	8	7	12	–	–
Вторичная пленка б – $f = 0,48$; $I_{км} = 0,30$ мг/км при $V = 6$ м/с, $P = 0,8$ МПа	66,6	3,4	6,3	11,5	2,2	10
	66,6	9,7 % – фазы, упрочняющие матрицу		23,7 % – твердая смазка вторичной пленки		
	76,3 % – матрица вторичной пленки					
Вторичная пленка в – $f = 0,36$; $I_{км} = 0,47$ мг/км при $V = 15$ м/с, $P = 0,8$ МПа	54,7	6,4	10,4	13,5	6,8	8,2
	54,7	16,8 % – фазы, упрочняющие матрицу		28,5 % – твердая смазка вторичной пленки		
	71,5 % – матрица вторичной пленки					

В поверхностном слое композиционного материала при $V = 6$ м/с содержит 3,4 % TiB и 6,3 % TiN, то есть 9,7 % фаз, упрочняющих твердый раствор молибдена в α -титане, и 23,7 % фаз, выполняющих роль твердой смазки (табл. 2).

С повышением скорости скольжения стали 45 с 6 до 15 м/с коэффициент трения пары понижается с 0,48 до 0,36, а износ КМ увеличивается с 0,30 до 0,47 мг/км (табл. 2). Количество твердой смазки в составе вторичной пленки, синтезированной в процессе трения на поверхности KM4 Ti+10Mo+BN при скорости скольжения стали 15 м/с, увеличивается с 23,7 % до 28,5 %, обеспечивая паре снижение коэффициента трения до 0,36 (табл. 2).

С повышением скорости скольжения с 6 до 15 м/с во вторичной увеличивается пленке с 9,7 до 16,8 % и процентное содержание соединений TiB и TiN, упрочняющих ее несущую структурную составляющую твердый раствор молибдена в α -титане (табл. 2). Известно, что эти соединения имеют высокую твердость и низкую теплопроводность [3; 4]. Микротвердость TiN составляет 20,5 ГПа, а TiB — 25÷36 ГПа. В зависимости от количества TiN и TiB в структуре вторичных пленок износостойкость КМ и его износ изменяются. При $V = 6$ м/с, когда количество упрочняющих их матрицу фаз оптимальное, (TiN + TiB = 9,7 %), эти фазы повышают износостойкость КМ и уменьшают его износ. При $V = 15$ м/с, когда количество соединений TiB и TiB в матрице пленки повысилось до 16,8 %, массовый износ KM4 увеличился. Вероятно 16,8 % включений TiB и TiN, упрочняющих твердый раствор молибдена в α -титане, больше оптимального, что снижает пластичность материала пленки и его склонность к деформированию в процессе нагружения трением (PV). Это повлекло за собой

увеличение массового износа КМ4 Ti+10Mo+BN с 0,30 до 0,47 мг/км при $V = 15$ м/с.

Во вторичной пленке, синтезированной при $V = 1-6$ м/с, массовое содержание соединений TiB и TiN, упрочняющих твердый раствор молибдена в α -титане, меньше 9,7 %, но с повышением скорости скольжения стали 45 до 6 м/с оно увеличивается и приближается к оптимальному. Материал вторичной пленки упрочняется, но не теряет пластичность и имеет возможность эффективно деформироваться в процессе нагружения трением (PV). Как следствие массовый износ КМ4 уменьшается с повышением скорости скольжения стали 45.

Повышение температуры поверхности КМ4 с увеличением скорости скольжения стали 45 от 1 до 6 м/с можно объяснить увеличением во вторичной пленке количества и массового содержания соединений TiN и TiB, имеющих низкую теплопроводность.

В табл. 3 приведены механические характеристики композиционных материалов КМ1–КМ4: H_{IT} (твердость), H/Er (нормированная твердость), ε (упругая деформация), и σ (предел упругости). Величина нормированной твердости характеризует структурное состояние объекта исследования: при $H/Er \approx 0,00-0,05$ структура считается крупнозернистой с размером зерна >100 нм, при $H/Er \approx 0,05-0,09$ и выше — нанокристаллической с размером зерна <100 нм [1].

Таблица 3

Механические характеристики композиционных материалов и вторичных пленок, синтезированных в процессе трения при $P = 0,8$ МПа и $V = 6$ и 15 м/с

Объект исследования; условия трения	f	I , мг/к	H_{IT} , ГПа	H/Er	ε , %	σ , ГПа
КМ1 Ti+10Mo+MoS ₂ , исх.			4,7	0,074	2,27	1,503
Втор. пленка; 15 м/с	0,31	3,85	7,7	0,089	2,75	2,363
КМ2 Ti+10Mo+MoSe ₂ ; исх	–	–	3,8	0,050	1,54	1,185
Втор. пленка; 6 м/с	–	–	10	0,108	3,33	3,069
Втор. пленка; 15 м/с	0,30	55,4	11,8	0,133	4,09	3,621
КМ3 Ti+10Mo+CaF ₂ ; исх.	–	–	4,0	0,054	1,67	1,227
Втор. пленка, 6 м/с	–	–	5,1	0,098	3,03	–
Втор. пленка; 15 м/с	0,28	3,11	6,2	0,103	3,18	2,021
КМ4 Ti+10Mo+BN; исх.	–	–	4,8	0,064	1,97	1,473
Втор. пленка; 6 м/с	–	–	4,7	0,087	–	–
Втор. пленка; 15 м/с	0,36	0,47	6,8	0,115	3,55	2,087

Известно, что материалы с нанокристаллической структурой имеют свойства выше, чем те же материалы с крупнозернистой структурой. Это служит одним из факторов, которые обеспечивают исследуемым материалам сравнительно высокие триботехнические свойства: так, все исследованные материалы на основе титана показали в паре со сталью 45 сравнительно низкие коэффициенты трения и незначительные износы ($f = 0,38-0,48$, а $I_{KM} = 0,10-0,53$ мг/км при $PV = 4,5$ МПа · м/с) и $f = 0,28 - 0,36$, а $I_{KM} = 0,47-3,85$ мг/км при $P.V = 12$ МПа · м/с.

Из табл. 3 следует: твердость H_{IT} вторичных пленок, синтезированных на поверхности материала в процессе трения, больше по сравнению с твердостью исходных материалов. Твердость таких пленок при скорости скольжения 15 м/с и постоянном давлении больше H_{IT} пленок на поверхности КМ4 Ti+10Mo+BN при $V = 6$ м/с. H_{IT} вторичной пленки при скорости скольжения 15 м/с на поверхности

КМ4 Ti+10Mo+BN составляет 6,8 ГПа. $H_{ГТ}$ вторичной пленки на поверхности трения КМ1 Ti+10Mo+MoS₂, для которого $f=0,31$ в паре со сталью 45, а массовый износ 3,85 мг/км, составляет 7,7 ГПа. В то же время $H_{ГТ}$ вторичной пленки на поверхности КМ2 Ti+10Mo+MoSe₂, массовый износ которого 55,4 мг/км, составляет 11,8 ГПа; при этом $H/E_{ГТ} = 0,133$. Размер зерна вторичной пленки уменьшился по сравнению с размером зерна в исходном материале в 2,66 раза (табл. 4). Таким образом, чем выше твердость вторичной пленки по сравнению с твердостью исходного КМ ($H_{ГТ \text{ плен}}/H_{ГТ \text{ матер}}$), тем триботехнические свойства КМ хуже (табл. 4).

Таблица 4

**Триботехнические характеристики КМ при $V=15$ м/с и $P=0,8$ МПа.
Соотношения механических характеристик вторичных пленок и композиционных материалов**

КМ	f	I , мг/км	$H_{ГТ \text{ плен}}/H_{ГТ \text{ матер}}$	$H/E_{ГТ \text{ плен}}/H/E_{ГТ \text{ матер}}$	$\epsilon_{\text{плен}}/\epsilon_{\text{матер}}$	$\sigma_{\text{плен}}/\sigma_{\text{матер}}$
КМ1	0,31	3,85	1,57	1,20	1,21	1,572
КМ2	0,30	55,4	3,10	2,66	2,66	3,055
КМ3	0,28	3,11	1,51	1,90	1,90	1,624
КМ4	0,36	0,47	1,41	1,80	1,80	1,41

В процессе трения имеет место разная степень дробления зерен структур композиционных материалов (КМ1–КМ4) и вторичных синтезированных на их поверхностях пленок; отличающихся в исходном состоянии только составом соединений, выполняющих роль твердой смазки.

Из табл.4, следует, что чем меньше размер зерна вторичной пленки по сравнению с размером зерна исходного КМ (то есть, чем больше соотношение $H/E_{ГТ \text{ плен}}/H/E_{ГТ \text{ матер}}$), тем триботехнические свойства хуже. Так, при $V=15$ м/с соотношение $H/E_{ГТ \text{ плен}}/H/E_{ГТ \text{ матер}}$ для вторичной пленки на поверхности КМ2 равняется 2,66, а его массовый износ — 55,4 мг/км; он больше по сравнению с массовым износом материалов КМ1, КМ3 и КМ4, для которых это соотношение меньше, и, соответственно, антифрикционные свойства выше (табл. 4).

Упругая деформация ϵ и предел упругости σ вторичных пленок на поверхности композиционных материалов больше по сравнению с таковыми для исходных материалов. При этом их показатели при скорости скольжения 15 м/с больше, чем при $V=6$ м/с (табл. 4).

Упругая деформация ϵ вторичных пленок по сравнению с ее значением для исходных материалов возросла с 1,54 до 4,09 (для КМ2); с 1,67 до 3,18 (для КМ3); с 1,97 до 3,55 (для КМ4); с 2,27 до 2,75 (для КМ1).

Исходя из этого следует, что чем меньше рост упругой деформации вторичных пленок по сравнению с упругой деформацией исходных материалов, тем выше их триботехнические характеристики (более высокая износостойкость и более низкий коэффициент трения).

Выводы.

1. Структура вторичных пленок, синтезированных на поверхности композиционных материалов в процессе трения в паре со сталью 45 под давлением 0,8 МПа при скоростях скольжения 6 и 15 м/с, микрогетерогенна.

2. В процессе трения и трибосинтеза вторичных пленок происходит дробление зерен структуры пленок. Чем выше скорость скольжения пары трения, тем степень дробления зерен выше и размер зерна меньше.

3. Структура композиционных материалов и сформированных на их поверхностях смазывающих вторичных пленок оценивается как нанокристаллическая. Такая структура обеспечивает материалам на основе титановых сплавов сравнительно низкие коэффициенты трения и малые износы.

4. С уменьшением размера зерна вторичной пленки по сравнению с исходным КМ характеристики процесса трения снижаются.

Список литературы

1. Фирстов С. М. Уравнение индентирования / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Э. П. Печковский, Н. А. Мамека // *Доповіді академії наук України*. – 2007. – № 12. – С. 100–106.

2. Горбань В. Ф. Использование метода инструментального индентирования для исследования свойств вторичных структур металлов и покрытий // *Порошковая металлургия*. – 2008. – № 7/8. – С. 146–155.

3. Титановые сплавы в машиностроении / под ред. Г. И. Капырина. – Машиностроение. – 1977. – 248 с.

4. Катюг И. С. Некоторые испытания титана и его сплавов на трение и износ / И. С. Катюг, В. И. Свициков // *Судостроение*. – 1958. – № 8. – С. 46 – 48.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2016

Повідомлення 2

*А. Г. КОСТОРНОВ, О. І. ФУЩИЧ, В. Ф. ГОРБАНЬ, Т. М. ЧЕВИЧЕЛОВА,
М. В. КАРПЕЦЬ*

СТРУКТУРА, ФАЗОВИЙ СКЛАД І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti+10Mo І СИНТЕЗОВАНИХ ПРИ ТЕРТІ ВТОРИННИХ ПЛІВОК

Досліджені фазовий склад, структурний стан і деякі механічні властивості ($H_{\text{ТТ}}$ – твердість, H/E_r – нормована твердість, ε – пружна деформація і σ – межа пружності) композиційних матеріалів (KM1 Ti+10Mo+MoS₂, KM2 Ti+10Mo+MoS₂, KM3 Ti+10Mo+CaF₂, KM4 Ti+10Mo+BN) і вторинних плівок, синтезованих на їх поверхні при терті у парі зі сталлю 45 на повітрі без змащування при $V = 6$ і 15 м/с під тиском $0,8$ МПа.

Ключеві слова: композиційний матеріал, склад, структура, швидкість ковзання, тиск, коефіцієнт тертя, знос, температура, синтез, вторинна мастильна плівка, нанокристалічний стан, фазовий склад, механічні властивості.

*A.G. KOSTORNOV, O.I. FUSCHYCH, V.F. GORBAN, T. M. CHEVYCHELOVA,
M.V.KARPETS*

STRUCTURE, PHASE COMPOSITION, MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED TITANIUM ALLOY Ti + 10Mo AND SYNTHESIZE FILMS OF FRICTION

The phase composition, structural state and some of the mechanical properties (HTI - Hardness, H / E_r - normalized hardness, ε - elastic strain and σ - the elastic limit) of composite materials (KM1 Ti + 10Mo + MoS₂, KM2 Ti + 10Mo + MoS₂, KM3 Ti + 10Mo + CaF₂, KM4 Ti + 10Mo + BN) and secondary films synthesized at the surface of the friction material when mated with steel in air at $45 V = 6$ and 15 m / s under a pressure of 0.8 MPa. The structure of composite materials formed on their surfaces secondary lubricating films evaluated as nanocrystalline. This structure provides a material based on titanium alloys is relatively low coefficients of friction and low wear.

Keywords: composite material, composition, structure, sliding velocity, pressure, friction, wear, temperature, synthesis, secondary lubricating film, nanocrystalline state, phase composition, mechanical properties

Косторнов Анатолій Григорович – академік НАН України, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу триботехнічних і проникних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства НАН України, email: Otds Kostornov@ipms.kiev.ua.

Фушич Ольга Іванівна – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник ІПМ НАН України, email: Otds Kostornov@ipms.kiev.ua.

Горбань Віктор Федорович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ІПМ НАН України.

Чевичелова Тетяна Михайлівна – науковий співробітник ІПМ НАН України, email: Otds Kostornov@ipms.kiev.ua.

Карпець Мирослав Васильович – доктор фізмат наук, провідний науковий співробітник ІПМ НАН України.