

р.6.7  
407

TALLINNA POLÜTEHNILISE  
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 407

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Сборник статей

1

ТАЛЛИН 1976



TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 407

1976

УДК 621-762

## ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Сборник статей

1

Таллин 1976

## С о д е р ж а н и е

1. Л.Э. Вальдма. Эффективность применения безвольфрамовых спеченных твердых сплавов в гидроабразивной среде. . . . . 3
2. П.К. Каллас, Л.Э. Вальдма. Влияние механических свойств на гидроабразивный износ спеченных сплавов TiC-Ni-Co-Cr . . . . . 17
3. В.А. Кудрявцев, Л.Э. Вальдма. Легирование карбидной фазы спеченного твердого сплава TiC-Ni-Co-Cr 25
4. Я.П. Кюбарсеш, Л.Э. Вальдма. Перспективность использования спеченного твердого сплава типа карбид титана - сталь для форсунок жидкого топлива. . . . . 33

© ТПИ, Таллин, 1976

Таллинский политехнический институт  
Труды ТПИ № 407  
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ  
Сборник статей 1

Редактор Д.Аренсбургер  
Техн. редактор В.Ранник  
Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 18 июня 1976 г.  
Подписано к печати 13 декабря 1976 г.  
Бумага 60x90/16  
Печ. л. 2,75+ 0,125 приложение  
Уч.-изд. л. 2,4  
Тираж 300  
МВ-07382  
Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскля, 2/9  
Зак. № 1300  
Цена 24 коп.



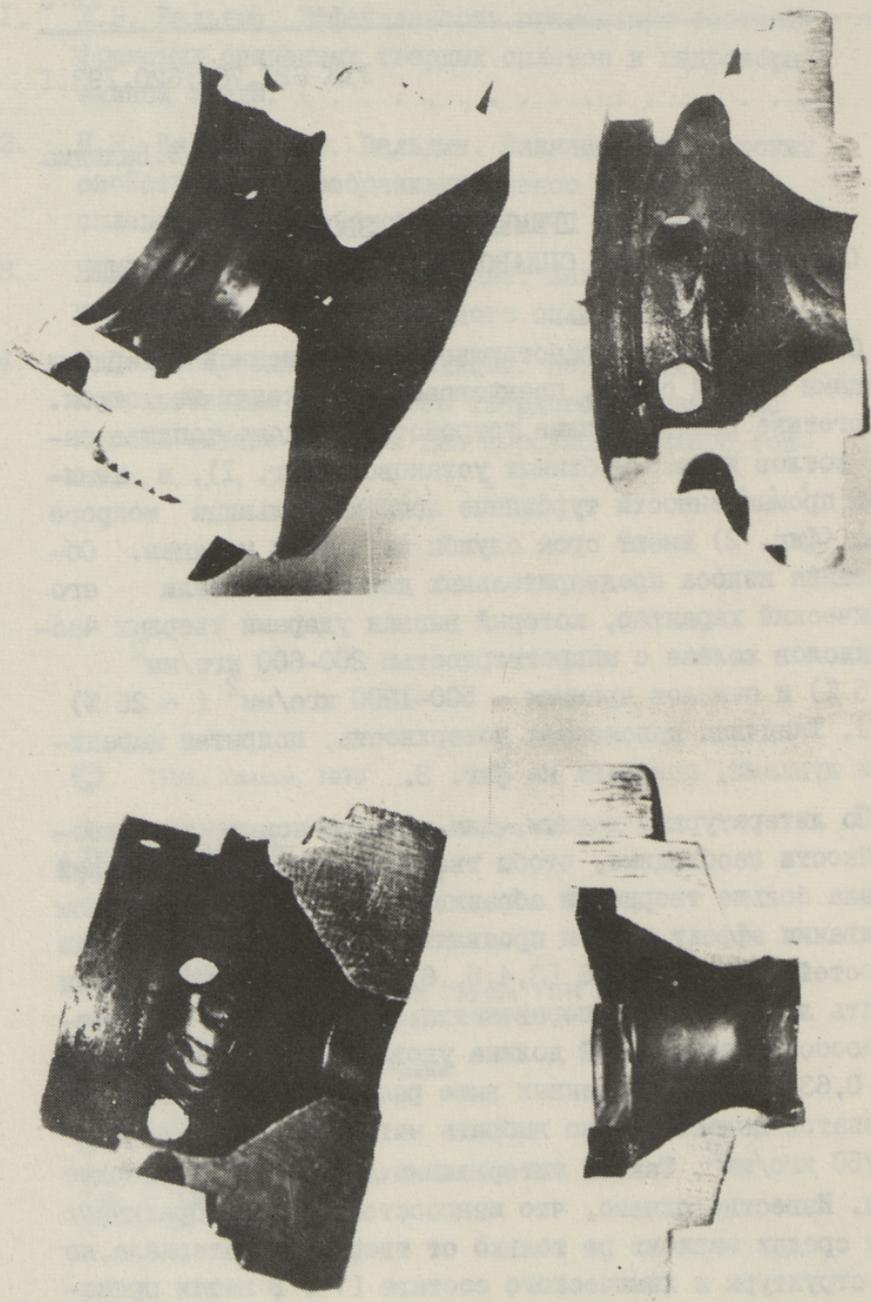
УДК 621.762:620.193.1

Л.Э.Вальдма

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗВОЛЬФРАМОВЫХ  
СПЕЧЕННЫХ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ В ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СРЕДЕ

Стальные детали, работающие в загрязненной твердыми частицами жидкой среде, преждевременно выходят из строя. В энергетике распыливающие устройства жидкого топлива паровых котлов и газотурбинных установок (фиг. 1), в химической промышленности турбинные лопатки мельницы мокрого помола (фиг. 2) имеют срок службы от 1 до 4 месяцев. Обследования износа предварительных деталей доказали его механический характер, который вызван ударами твердых частиц окислов железа с микротвердостью  $200-600 \text{ кгс/мм}^2$  ( $\sim 75\%$ ) и окислов кремния —  $500-1200 \text{ кгс/мм}^2$  ( $\sim 25\%$ ) [1, 2]. Типичная изношенная поверхность, покрытая царапинами и дунками, показана на фиг. 3.

По литературным данным, для резкого повышения износостойкости необходимо, чтобы твердость материала деталей  $H_m$  была больше твердости абразива  $H_a$ . При абразивном изнашивании эффект должен проявляться уже при соотношении твердостей  $H_a/H_m < 1,6$  [3, 4, 5, 6]. Следовательно, если исходить лишь из этого неравенства, то твердость материала износостойких деталей должна удовлетворять соотношению  $H_m \geq 0,63 H_a$ . Для названных выше распылителей и турбинных лопаток целесообразно выбрать материал с твердостью  $HV > 750 \text{ кгс/мм}^2$ . Такими материалами являются твердые сплавы. Известно однако, что износостойкость в абразивных жидких средах зависит не только от твердости материала, но и его структуры и химического состава [7]. В наших примерах материалы должны, кроме износостойкости и прочности, иметь у распылителей окалиностойкость и термостойкость, а



Фиг. 1. Изношенные элементы распылителей форсунок.



Фиг. 2. Изношенные лопатки рабочего органа турбинной мельницы.



Фиг. 3. Вырезанные лунки на изношенных поверхностях форсунок и турбинных лопаток.

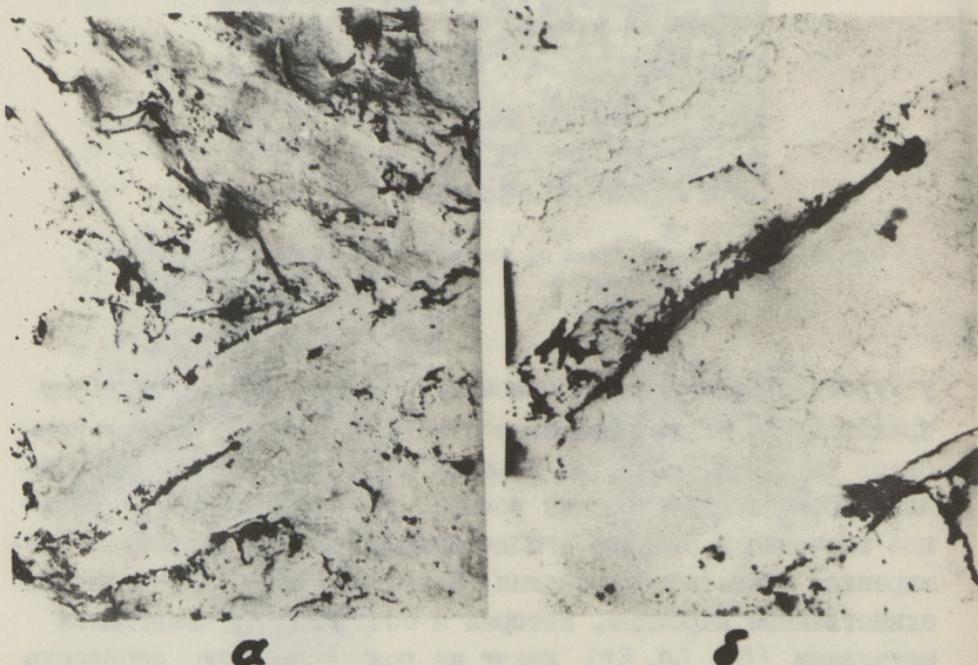
у турбинных лопаток коррозионностойкость. Поэтому интерес представляют безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбидов титана и хрома, как дешевых и легкополучаемых карбидов. Кроме того, экономия вольфрама имеет весьма актуальное значение в связи с его дефицитностью и непрерывным расширением областей применения. Известно, что  $TiC$  является единственным карбидом, который в сочетании со связующими металлами ( $Ni$ ,  $Co$ ,  $Cr$ ) имеет не только высокую стойкость против окисления и жаропрочность, но и удовлетворительную термостойкость [8]. Основой коррозионностойких твердых сплавов является карбид хрома [8]. Специфика формирования структуры безвольфрамовых сплавов, связанная с низкой сма-

чувствительностью к наличию примесей кислорода, предъявляет повышенные требования к технологии производства и исходным материалам, что зачастую не обеспечивает имеющимся на заводах отечественным оборудованием.

В предлагаемой работе была поставлена задача выбрать лабораторную методику оценки и выяснить влияние технологических режимов на износостойкость карбидтитановых и карбидхромовых сплавов в гидроабразивной среде. Кроме того, проверить достоверность полученных данных в эксплуатационных условиях.

#### О методике оценки износостойкости

Предварительные испытания выбранных нами безвольфрамовых твердых сплавов в эксплуатационных условиях (распылители, турбинные лопатки) показали, что износ таких гетеро-



Фиг. 4. Избирательный износ карбидхромового твердого сплава в мазуте. Снимки на электронном микроскопе. а) 6000 х; б) 10000 х.



Фиг. 5. Избирательный износ карбидохромового твердого сплава в мазуте. Сфотографирован на растровом микроскопе 3000 х.

генных материалов происходит избирательно (см. фиг. 4, 5). Карбиды титана  $HV = 3200 \text{ кгс/мм}^2$  и карбиды хрома  $HV = 1300 \text{ кгс/мм}^2$  [9] тверже минеральных частиц и поэтому царапание их при малых углах атаки невозможно [10]. При больших углах атаки энергия удара частиц, по-видимому, не превышает критический предел, чтобы вызвать растрескивание карбидных зерен [11]. Поэтому типичная картина износа твердых сплавов в гидроабразивной среде, где преобладает условие  $H_d < H_m$ , представляет своеобразное механическое "травление" связки в межзеренных областях карбидов, округление их острых кромок в результате повышенной концентрации напряжений при ударе и отрыв округленных слабосвязанных карбидов под действием кинетической энергии струи. Удаление мягкой связки, по-видимому, происходит в результате микрорезания мелкими абразивными частицами или осколками, а также усталостных явлений. Исходя из вышеописанного механизма изнашивания для определения оптимального состава и технологии следует обеспечить при испытании в лабораторных условиях  $H_d \leq H_m$ . Для этой цели абразивным материалом была выбрана окись железа с микротвердостью  $500\text{--}800 \text{ кгс/мм}^2$ . Описание струевой лаборатор-

ной установки приведено в [12]. Условия испытания: состав струи — окись железа I % в воде, величина зерна 0,1–0,3 мм, скорость 80 м/с, углы атаки 30, 60 и 90 °.

### Влияние технологических режимов на износостойкость

Многочисленность влияющих технологических факторов потребовала при оптимизации режимов получения безвольфрамовых твердых сплавов использования математического планирования эксперимента с матрицей I/16 реплики из полного факторного плана типа  $2^7$  с двумя сериями опытов в центре плана [13]. Варьируемыми факторами были выбраны:  $X_1$  — время размола,  $X_2$  — количество связки,  $X_3$  — содержание углерода в засыпке,  $X_4$  — температура спекания,  $X_5$  — скорость нагрева,  $X_6$  — скорость охлаждения,  $X_7$  — время изотермической выдержки. Для проведения корреляционного анализа между износостойкостью и другими свойствами были определены износостойкость, величина карбидного зерна  $d$ , прочность при изгибе  $\sigma_u$ , твердость HV и модуль упругости E.

На основе экспериментов составлены регрессионные уравнения линейного типа

$$y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 X_6 + b_7 X_7. \quad (I)$$

При неадекватности уравнений, износостойкость оценивалась другими свойствами с помощью коэффициентов корреляции. Эксперименты проводили со сплавами  $Cr_3C_2-Ni$  (10, 20, 30 % Ni) и  $TiC-Ni-Co-Cr$  (связка 30, 35, 40 %), соотношение  $Ni : Co : Cr = 4 : 3 : 1$ , как оптимальное [14]. Интенсивность изнашивания карбидтитановых образцов в  $mm^3$  при расходе 1 кг абразива в гидроабразивной струе при различных углах атаки описывается следующими уравнениями регрессии:

$$K_{30^\circ} = 3,54 + 0,17X_2 + 0,53X_4 + 0,7X_7 \quad (2)$$

$$K_{60^\circ} = 8,35 + 1,01X_4 + 0,81X_7 \quad (3)$$

$$K_{90^\circ} = 9,13 + 1,01X_4 + 1,01X_7 \quad (4)$$

Интенсивность изнашивания карбидхромовых сплавов не описывалась линейной функцией. Корреляционный анализ показал ее тесную связь с величиной карбидных зерен. Коэффициент

корреляции при различных углах атаки оказался в пределах 0,94–0,99. У карбидо-титановых 0,67–0,76. Коэффициенты регрессии приведены в табл. I.

Т а б л и ц а I

Коэффициенты регрессии уравнений (I)

Твердый сплав	Свойство	a	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>
КТ	d	3,04		-0,45		+0,47		-1,5	+0,43
КХ	d	9,21	-0,8	-3,1		+1,84			+3,78
КТ	HRA	86,7		-1,3	+0,4	-0,6			-0,3
КХ	HRA	84,7		-2,4	-0,3	-0,4		+0,2	-0,8
КТ	$\sigma_u$	137,8		+18,5					-8,5
КХ	$\sigma_u$	64,5		+26,9		-3,0		+5,7	-12,5
КТ	E	50900	-6500	-4300	+300	-2000	-2100		-2500
								+2900	
КХ	E	32600		-1450				+500	-1930

Примечание: КТ – карбидотитановые сплавы  
 КХ – карбидохромовые сплавы

Исходя из того, что мелкозернистые твердые сплавы показали повышенную износостойкость и, судя по коэффициентам регрессии, величину карбидов ограничивает высшее содержание связки ( $X_2$ ), а из технологических факторов – низкий предел температуры спекания ( $X_4$ ) и короткая изотермическая выдержка ( $X_7$ ). Соблюдая указанные правила, получим наилучшую комбинацию износостойкости – прочности.

При изучении влияния технологических факторов и содержания связки были проведены 2x18 серий опытов. Результаты доказывают, что технологические режимы безвольфрамовых сплавов имеют иногда решающее значение на износостойкость в условиях избирательного гидроабразивного износа. Пределы износостойкости см. табл. 2. Для сравнения приведены данные испытанного в тех же условиях стандартного твердого сплава ВК15 и инструментальной стали ХВГ. В гидроабразивной струе с кварцевым песком вышеуказанные безвольфрамовые твердые сплавы практически эффекта не дают. Например, износостойкость карбидотитановых сплавов колеблется

в пределах 0,97 ( $\alpha = 90^\circ$ ) до 6,87 ( $\alpha = 30^\circ$ ). У карбидохромовых еще меньше (эталон-сталь 45).

### Проверка лабораторных результатов в эксплуатации

С целью проверки были изготовлены центробежные распылители мазута для электростанций из оптимизированных составов карбидтитанового твердого сплава, а лопатки для турбинных мельниц для измельчения красящих пигментов в агрессивной жидкости ( $\text{pH} = 8,5-9,5$  с поверхностно-активными добавками) из карбидохромового твердого сплава (см. фиг. 6, 7). Методика эксплуатационных испытаний см. [15]. Относительная износостойкость распылителей из карбидтитановых твердых сплавов приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 2

Пределы относительной износостойкости безвольфрамовых твердых сплавов, полученных различными режимами и содержаниями связки

№	Материал	Минимальные и максимальные относительные износостойкости при различных углах атаки					
		30°		60°		90°	
1.	TiC-Ni-Co-Cr (30-40 % связки 4:3:1)	15	110	8	48	7	44
2.	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + (10-30 %) Ni	31	61	11	38	8	33
<u>Стандартные материалы</u>							
3.	Твердый сплав ВК15	457		257		144	
4.	Сталь ХВГ	1,47		1,09		1,3	
5.	Сталь ХВГ (закаленная)	2,40		1,80		2,04	

Условия испытания: Гидроабразивная струя 1% окалины + вода; скорость струи 80 м/с; величина абразивного зерна 0,1 - 0,3 мм. Эталон - сталь 45.

Относительная износостойкость турбинных лопаток из карбидохромового твердого сплава приведена в табл. 4.

Т а б л и ц а 3  
Относительные износостойкости распылителей  
мазута

№ п/п	Материал распылителя	Твердость по Вик- керсу, кгс/мм <sup>2</sup>	Относи- тельная износо- стойкость
1.	Карбидтитановый твердый сплав (60 % TiC, связка Ni:Co:Cr = = 4 : 3 : 1)	II42	I5
	<u>Из стандартных материалов</u>		
2.	Твердый сплав BKI5	II46	I40
3.	Сталь ХВГ (закаленная)	579	I,62

Примечание: Эталонном служил распылитель из стали ХВГ, как стандартный. При сравнении износостойкости распылителей из стали 45 и ХВГ они имели близкие показатели.

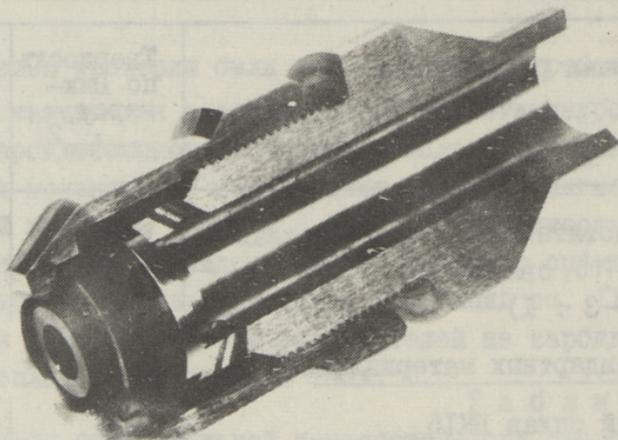
Т а б л и ц а 4  
Относительные износостойкости турбинных лопаток

№ п/п	Материал лопатки	Твердость по Вик- керсу, кгс/мм <sup>2</sup>	Относи- тельная износо- стойкость
1.	Карбидхромовый твердый сплав (70 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + 30 % Ni)	I004	30
2.	Стандартный твердый сплав BKI5	II46	I9

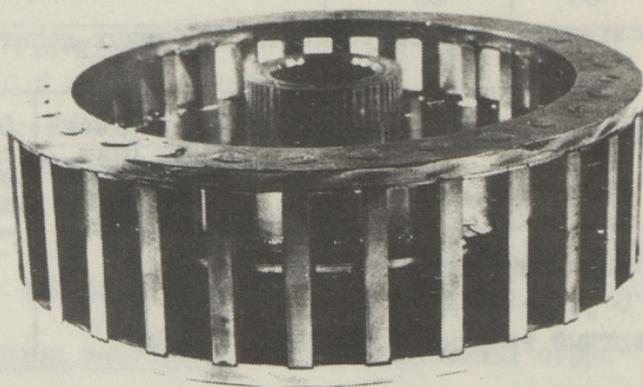
Примечание: Эталонном была лопатка из нержавеющей стали Х18Н9Т, как стандартная для лопаток.

Лабораторные испытания и эксплуатационная проверка подтверждают эффективность безвольфрамовых твердых сплавов в условиях гидроабразивного износа. Таблицы 3 и 4 показывают, что они позволяют повышать износостойкость по сравнению со сталью в 15-30 раз, что можно считать экономически оправданным. Таблица 4 показывает, что при гидроабразивном износе в

агрессивных средах износостойкость карбидохромового твердого сплава даже превышает стойкость карбидовольфрамовых.



Фиг. 6. Центробежный распылитель из карбидтитанового спеченного твердого сплава.



Фиг. 7. Ротор турбинной мельницы с карбидохромовыми спеченными лопатками.

## В ы в о д ы

1. Безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбидов титана и хрома в гидроабразивной среде с минеральными частицами твердостью 500–800 кгс/мм<sup>2</sup> могут иметь высокую износостойкость по сравнению со сталями. Например, при угле атаки струи 30° их износостойкость в 15–110 раз выше, чем у стали в зависимости от количества связки и технологических факторов. Главный признак структуры износостойкого сплава – мелкозернистые карбидные зерна.

2. В данной работе механизм изнашивания имел при всех испытаниях избирательный характер.

3. Часто решающим фактором оказывается технологический режим, к которому безвольфрамовые сплавы весьма чувствительны.

4. Использование безвольфрамовых твердых сплавов для мазутных распылителей и лопаток турбинных мельниц мокрого помола повышают их износостойкость в 15–30 раз.

5. При испытании карбидтитановых и карбидхромовых твердых сплавов в струе воды с кварцевым песком они практически эффекта не дают.

## Л и т е р а т у р а

1. В а л ь д м а Л.Э. и др. Характер эрозии центробежных распылителей мазутных форсунок. "Энергомашиностроение", № 2, 1974, с. 41–43.

2. В а л ь д м а Л.Э., А р е н с б у р г е р Д.С. Условия получения и свойства спеченных сталей, упроченных карбидами. Сб. трудов IV конференции по порошковой металлургии в Польше, т. IV, 1975, с. 67–76.

3. W e l l i n g e r, K., U e t z, H. Gleitverschleiss, Spülverschleiss, Strahlverschleiss unter der Wirkung von körnigen Stoffen. VDI - Forschungsheft 449, Ausgabe A, Band 21, 1955.

4. E s s l i n g e r P. Das Problem der Werkstoffwahl bei Verschleisstellen. VDI - Z. 105, 1963, Nr 26, S. 1209/18.

5. Терещенко А.Ф., Гавриш В.А. О выборе вещества струи для испытания на износ наплавки. Тезисы конференции по износу. Киев, 1970, с. 48-51.

6. К л е i з, I. Anwendung von Auftrags-Schweisswerkstoffen gegen Strahlverschleiss - Schädigungen. VDI Berichte, Nr. 194, 1973.

7. К о з ы р е в С.П. Изнашивание материалов в абразивных и неабразивных жидких средах. Автореферат диссертации. М., 1971.

8. К ш ф ф е р Р., Бенезовский Ф. Твердые сплавы. М., "Металлургия", 1971.

9. Самсонов Г.В. Карбиды, силициды, бориды, нитриды и сульфиды редких металлов и их применение в новой технике. Вестник АН УССР, 1959, 6, с. 27-37.

10. Х р у щ о в М.М., Б а б и ч е в М.А. Исследования изнашивания металлов. М., АН СССР, 1960.

11. В а л ь д м а Л.Э., П и р с о Ю.Ю. Характер изнашивания карбидохромовых спеченных сплавов в струе абразивных частиц. "Порошковая металлургия", №8, 1975.

12. В а л ь д м а Л.Э. и др. О методике исследования изнашивания материалов гидроабразивной струей. "Тр.Таллинск. политехн. ин-та", № 381, 1975.

13. V a l d m a, L., P i r s o, J. Einige Zusammenhänge zwischen Herstellungsfaktoren und Eigenschaften von Chromkarbid-Hartmetallen. Abhandlungen der V Internationalen Pulvermetallurgischen Tagung. Band 2. Dresden, 1973. S. 29 - 1 ... 29 - 14.

14. В а л ь д м а Л.Э., К у д р я в ц е в В.А. Некоторые вопросы по оптимизации состава жаропрочных сплавов. Тезисы докладов I республиканской конференции по порошковой металлургии, 1975, с.19.

1. В а л ь д м а Л.Э., К ю т т н е р Р.А. О перспективности применения металлокерамики для центробежных форсунок. "Энергомашиностроение", № I, 1975.

Der Anwendungseffekt der wolframlosen Sinterhart-  
metalle unter hydroabrasiven Bedingungen

Zusammenfassung

Der Effekt der wolframlosen Hartmetalle kommt zum Ausdruck, wenn man die Grundregel des abrasiven Verschleißes  $H_a < H_M$  befolgt. In diesem Fall hat der Hydroabrasivverschleiß den Auswahlcharakter, d. h. zuerst beseitigt man das Bindemetal und danach folgt anschließende Beseitigung der Karbidkörner. Oft ist der Herstellungsvorgang anschlagend, der die Verschleißfestigkeit der Titankarbid- und Chromkarbid-Hartmetalle 5 bis 10 mal ändern kann. Der Grundfaktor des Gefüges, der die Verschleißfestigkeit erhöht, ist die Feinkörnigkeit der Karbidkörner. Die wolframlosen Hartmetalle können bei Hydroabrasivverschleiß 15 bis 30 mal höhere Verschleißfestigkeit als der Stahl haben.



П.К.Каллас, Л.Э.Вальдма

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ГИДРОАБРАЗИВНЫЙ  
ИЗНОС СПЕЧЕННЫХ СПЛАВОВ  $TiC-Ni-Co-Cr$

Известно, что универсальной константы износа материала существовать не может, так как износ зависит от свойств материала, геометрии контактирования и вида нарушения фрикционной связи (механизма изнашивания) [1, 2]. Многочисленные экспериментальные данные подтверждают, что абразивная износостойкость часто прямо пропорциональна твердости металла [1,3]. Мало изучено влияние механических характеристик на гидроабразивный износ спеченных твердых сплавов.

В статье приведены результаты изучения влияния твердости, прочности на изгиб, модуля упругости, ударной вязкости, произведения величин ударной вязкости и твердости, величины зерна карбидной фазы на гидроабразивный износ жаропрочных спеченных твердых сплавов типа  $TiC-Ni-Co-Cr$ .

Образцы размерами  $5 \times 15 \times 20$  мм подвергались действию струи гидроабразива по методике [4]. Режим испытаний: несущая среда - вода, абразив - окалина, твердостью 500 - 800 кгс/мм<sup>2</sup>, скорость струи 80 м/с, концентрация абразива в смеси по массе 1 %, зернистость абразива 0,1-0,3 мм, углы атаки 30°, 60° и 90°.

При изготовлении титанокарбидовых сплавов применялось оптимальное по прочности на изгиб соотношение компонентов связки по массе  $Ni:Co:Cr = 4:3:1$  [5]. Свойства сплавов, полученные разными технологическими режимами (время размола, содержание графита в засыпке, температура спекания, скорость нагрева и охлаждения, время изотермической выдержки) приведены в табл. I.

Анализ экспериментальных данных выполняли отдельно для сплавов с 30 и 40 % связки, т.е. одинакового состава. Расположение точек на графиках интенсивность изнашивания — свойстве показывает, что несмотря на значительный разброс точек можно выявить тенденцию влияния свойств на износ. При предположении линейной зависимости между интенсивностью изнашивания и свойствами сплавов рассчитаны коэффициенты уравнений прямым методом наименьших квадратов. Линейные зависимости представлены в виде:

$$K = ax + b,$$

где  $K$  — интенсивность изнашивания,  $\text{мм}^3$  на 1 кг абразива;

$x$  — свойство сплава;

$a$  и  $b$  — коэффициенты в зависимости от количества связки, свойств сплава и угла атаки.

Теснота зависимости между износом и свойствами оценивалась через линейный коэффициент корреляции  $r$ . Коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $r$  приведены в табл. 2. Значимыми являются коэффициенты корреляции  $|r| \geq 0,71$  [6]. Следовательно, из-за незначимого коэффициента корреляции невозможно подтвердить линейную зависимость интенсивности изнашивания от модуля упругости, ударной вязкости, произведения величин ударной вязкости и твердости. Значимыми при данных условиях испытания являются твердость, прочность на изгиб и величина карбидного зерна материала (фиг. 1).

У спеченных твердых сплавов величина карбидного зерна является структурным фактором, определяющим однозначно прочностные свойства материала при одинаковом составе. При увеличении размера карбидного зерна износ увеличивается при всех углах атаки, причем влияние больше при содержании связки 40 % при углах атаки  $30^\circ$  и  $90^\circ$ . Аналогичный результат получен при изнашивании в струе кварцевых частиц спеченных сплавов  $\text{TiC-Ni-Mo}$  и  $\text{WC-Co}$  [7]. При одинаковом размере зерна карбидной фазы интенсивность изнашивания гораздо больше при большем содержании связки при всех рассмотренных углах атаки, так как увеличивается доля составляющей сплава, которая значительно мягче абразива. При одинаковом износе может быть размер зерна значительно больше у сплава, содержащего меньше связки.

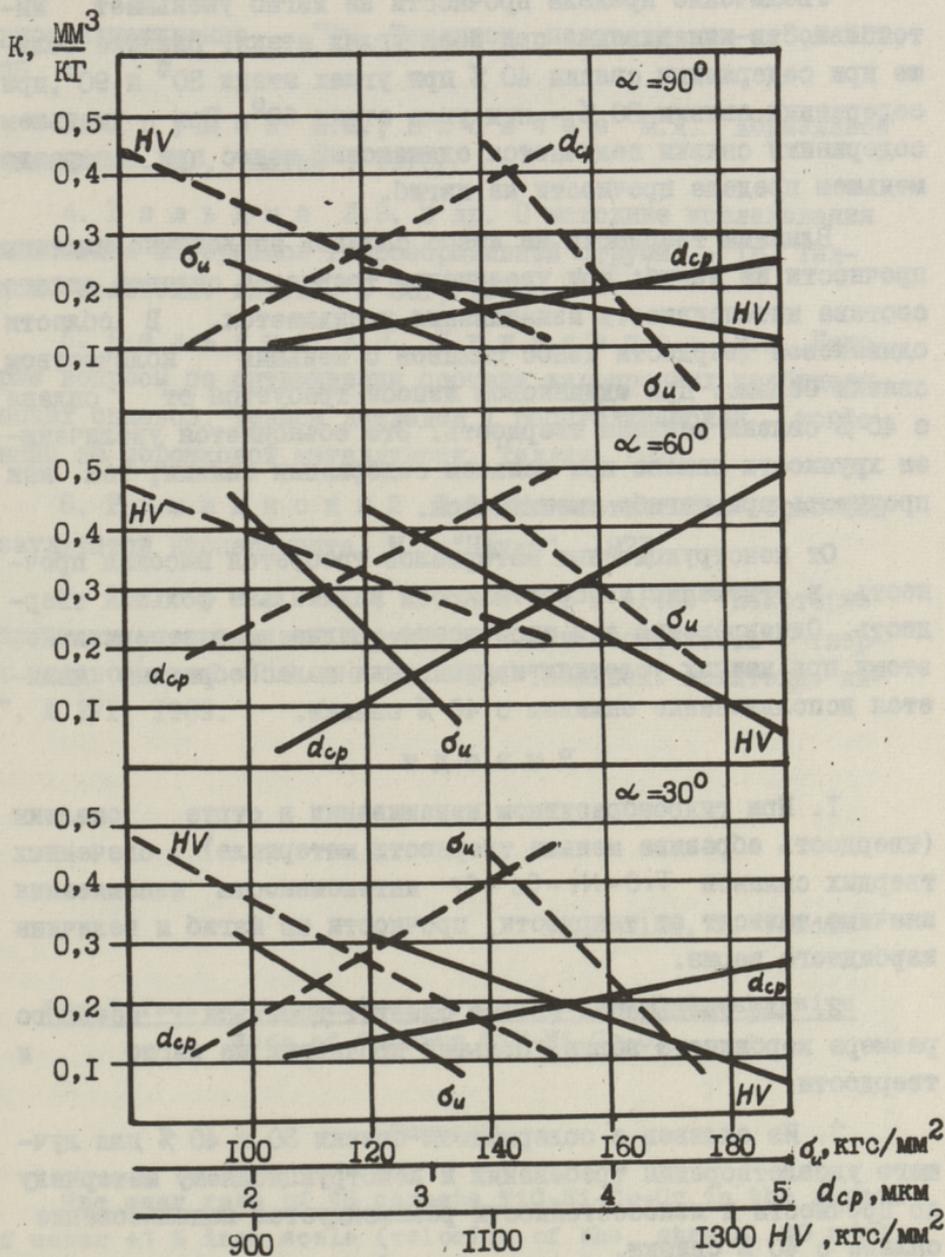
Т а б л и ц а I

Свойства сплавов TiC-Ni-Co-Cr

№ сплава	Содержание связки, %	Величина зерна, $d_{ср}$ , мкм	Твердость, HV, $\frac{кгс}{мм^2}$	Прочность при изгибе, $\sigma_b$ , $\frac{кгс}{мм^2}$	Модуль упругости, E, $\frac{кгс}{см^2}$	Ударная вязкость $a_k$ , $\frac{кгм}{см^2}$	$a_k$ , HV	Интенсивность изнашивания, K, $\frac{мм^3}{кг \text{ при углах атаки}}$		
								30°	60°	90°
1	30	3,00	1350	130,7	50200	0,164	221,4	0,08	0,11	0,087
2	30	3,68	1180	115	52400	0,08	94,4	0,14	0,14	0,11
3	40	3,19	920	149,8	56300	0,265	243,8	0,16	0,3	0,19
4	40	1,66	1140	175,3	30900	0,345	393,3	0,14	0,16	0,072
5	30	4,65	1070	102	64100	0,091	97,37	0,31	0,35	0,26
6	30	3,54	1070	123,1	60800	0,092	98,44	0,23	0,26	0,15
7	40	2,29	920	157,2	36000	0,184	169,28	0,28	0,33	0,19
8	40	3,74	830	141,5	30400	0,197	163,51	0,6	0,46	0,47
11	40	2,75	980	150,2	38100	0,352	344,96	0,23	0,32	0,24
12	40	2,83	990	152,1	63600	0,373	369,27	0,37	0,53	0,44
13	30	3,31	1180	133,5	38900	0,103	121,54	0,13	0,18	0,16
14	30	4,95	1020	97,2	59000	0,105	107,1	0,25	0,62	0,27
15	40	1,95	1140	170,8	46800	0,392	446,88	0,13	0,17	0,11
16	40	2,32	1070	151,6	70300	0,31	331,7	0,25	0,3	0,3
17	30	2,47	1200	115,5	56400	0,217	260,4	0,15	0,15	0,21
18	30	2,29	1340	125,5	59800	0,084	112,56	0,13	0,11	0,14

Коэффициенты формул  $K = ax + b$  и коэффициенты корреляции  $r$ 

Характеристика испытываемого материала, $x$	Ед. изм.	Сод. связ-ки %	Угол атаки								
			30°			60°			90°		
			$a$	$b$	$r$	$a$	$b$	$r$	$a$	$b$	$r$
Твердость, HV	кгс/мм <sup>2</sup>	30	-0,00073	1,04	-0,86	-0,00109	1,52	-0,80	-0,00035	0,58	-0,73
Прочность при изгибе, $\sigma_u$	"	40	-0,00107	1,34	-0,72	-0,00074	1,06	-0,71	-0,00091	1,16	-0,63
	"	30	-0,0065	0,95	-0,78	-0,0104	1,47	-0,79	-0,0038	0,62	-0,81
Ударная вязкость, $a_k$	кгсм/см <sup>2</sup>	40	-0,0108	1,96	-0,70	-0,0079	1,55	-0,78	-0,012	2,13	-0,81
	"	30	-0,72	0,26	-0,36	-0,87	0,34	-0,24	0,047	0,17	0,02
Модуль упругости, $E$	кгс/мм <sup>2</sup>	40	-0,99	0,57	-0,52	-0,38	0,43	-0,30	-0,47	0,39	-0,26
	"	30	0,0000039	-0,035	0,66	0,0000084	-0,22	0,38	0,0000042	-0,059	0,46
$a_k \cdot HV$	кгс <sup>2</sup> /мм <sup>2</sup>	40	-0,0000018	0,35	-0,18	0,0000021	0,22	0,22	0,0000022	0,15	0,24
	мм <sup>2</sup> /см <sup>2</sup>	30	-0,00069	0,28	-0,51	-0,001	0,38	-0,39	-0,00013	0,19	-0,15
Величина зерна, $d_{cp}$	мм	40	-0,00091	0,55	-0,60	-0,00053	0,48	-0,46	-0,00057	0,43	-0,40
	"	30	0,053	-0,005	0,77	0,16	-0,32	0,86	0,046	0,012	0,62
		40	0,17	-0,17	0,74	0,15	-0,069	0,74	0,16	-0,16	0,76



Фиг. 1. Регрессионные линии интенсивности изнашивания сплавов TiC-Ni-Co-Cr в зависимости от прочности на изгиб, размера карбидного зерна и твердости: — 30 % связки, - - - 40 % связки.

Увеличение предела прочности на изгиб уменьшает интенсивность изнашивания при всех углах атаки. Влияние больше при содержании связки 40 % при углах атаки  $30^\circ$  и  $90^\circ$ , при содержании связки 30 % – при угле атаки  $60^\circ$ . При меньшем содержании связки получается одинаковый износ при гораздо меньшем пределе прочности на изгиб.

Влияние твердости на износ сплавов аналогично влиянию прочности на изгиб: при увеличении твердости сплавов одного состава интенсивность изнашивания уменьшается. В области одинаковой твердости износ сплавов с меньшим количеством связки больше. При одинаковом износе требуется от сплава с 40 % связки меньшая твердость. Это объясняется увеличением хрупкости сплава при меньшем содержании связки, так как прочность при изгибе уменьшается.

От конструкционных материалов требуется высокая прочность, в отношении износостойкости желательна большая твердость. Одновременно эти требования трудно удовлетворить. Поэтому при данных условиях изнашивания целесообразным является использование сплавов с 40 % связки.

#### В ы в о д ы

1. При гидроабразивном изнашивании в струе окалин (твердость абразива меньше твердости материала) спеченных твердых сплавов TiC-Ni-Co-Cr интенсивность изнашивания значительно зависит от твердости, прочности на изгиб и величины карбидного зерна.

2. Для уменьшения износа следует добиться меньшего размера карбидного зерна, большей прочности на изгиб и твердости.

3. Из сплавов с содержанием связки 30 и 40 % для лучшего удовлетворения требований к конструкционному материалу по прочности и износостойкости рекомендуется использование сплава с 40 % связки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Крагельский И.В. Трение и износ. М., Машиз, 1962.

2. Паппель Т., Клейс И. О некоторых проблемах при создании стандартных методов испытания на абра-

зменное изнашивание. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 381, 1975.

3. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М., "Наука", 1970.

4. Вальдма Л.Э. и др. О методике исследования изнашивания материалов гидроабразивной струей. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 381, 1975.

5. Вальдма Л.Э., Кудрявцев В.А. Некоторые вопросы по оптимизации состава жаропрочных карбидотитановых сплавов. Тезисы докладов I республиканской конференции по порошковой металлургии. Таллин, 1975.

6. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М., "Наука", 1971.

7. Кабрал Х.И., Мозберг Р.К. Некоторые результаты исследования структуры и износостойкости твердых сплавов типа TiC-Ni-Mo "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 271, 1969.

P. Kallas, L. Valdma

The Effect of Mechanical Properties on Hydroabrasive  
Wear of Cermets TiC-Ni-Co-Cr

Summary

The wear rate of 16 cermets TiC-Ni-Co-Cr in the stream of water +1 % iron scale (velocity of the stream 80 m/s) with the impact angles  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$  was determined. The influence of hardness, bending strength, elastic modulus, impact strength, product of impact strength and hardness, carbide grain size on the wear rate of cermets has been studied. A statistically significant correlation was found between the wear rate and hardness, bending strength, as well as carbide grain size.



УДК 621.762

В.А.Кудрявцев, Л.Э.Вальдма

ЛЕГИРОВАНИЕ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ СПЕЧЕННОГО  
ТВЕРДОГО СПЛАВА  $TiC-Ni-Co-Cr$

Известно, что легирующие добавки, вводимые в сплавы на основе карбида титана, по своему действию могут быть разделены на три группы. Первая группа улучшает свойства карбидной составляющей, вторая — свойства металлической связки и третья существенно влияет на межфазные границы, главным образом, изменяя свойства сплава за счет изменения его структуры [1].

Ввиду того, что спеченные твердые сплавы в основном используются в качестве износостойких материалов, интерес представляет изучение влияния легирования карбидной фазы другими карбидами на механические свойства сплава.

Исследования тройных безвольфрамовых сплавов показали, что разработанные Киффером [2] сплавы на основе карбида титана и карбида ванадия имеют особое техническое значение. Эти сплавы с точки зрения экономики в качестве заменителей карбидовольфрамовых сплавов представляют большой интерес. Практические исследования сплавов  $TiC-VC-NbC$ ;  $TiC-VC-TaC$ ;  $TiC-VC-Mo_2C$  показали, что при правильном дозировании третьего элемента эти сплавы имеют существенные преимущества перед бинарными сплавами из карбида титана и сплавами из карбида ванадия, как с точки зрения их производства, так и с точки зрения их применения. Слишком низкие или слишком высокие добавки не дают никаких результатов или даже сказываются отрицательно.

Учитывая вышеизложенное нами было изучено влияние таких легирующих добавок, как  $NbC$  и  $Mo_2C$  к сплаву на основе карбида титана с никель-кобальт-хромовой связкой.

Учитывая поставленную задачу нахождения оптимального соотношения между компонентами в системе  $TiC-NbC-Mo_2C$ , которая требует многочисленных опытов при традиционном методе проведения эксперимента, нами было применено математическое планирование эксперимента.

Поскольку область возможного решения (диапазоны варьирования) определена другими исследователями, была сразу построена квадратическая модель.

$$y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2.$$

В этом случае было целесообразно применить симплекс-суммирующий ротатабельный план второго порядка с размещением опытов в вершинах и центре шестигульника [3], причем в центре опыты были повторены четыре раза для обеспечения равномерности плана и определения ошибки воспроизводимости опыта.

#### Выбор интервалов варьирования

В работе [4] исследовано влияние легирования карбидом ниобия твердой фазы карбида титана - сплава марки ТНМ20 ( $TiC + 20$  вес. % связки, содержащей никель и молибден в объемном соотношении 4:1). Для всех исследованных сплавов, где твердой фазой служат двойные карбиды составов от  $Ti_{0,98}Nb_{0,02}C$  до  $Ti_{0,75}Nb_{0,25}C$ , были определены предел прочности при изгибе, ударная вязкость и твердость. Из результатов работы видно, что наличие карбида ниобия в составе твердой фазы существенно влияет на прочность сплава, способствуя ее повышению с увеличением содержания  $NbC$ , при этом у ударной вязкости очевидна тенденция роста. Твердость по Роквеллу уменьшается незначительно.

Известен сплав "Титанит S" ( $TiC-Mo_2C-Ni$ ) для обработки стали [5]. Следует отметить, что сплавы этой системы отличаются высокой твердостью и превосходят по твердости сплавы наиболее технической важной системы  $WC-Co$  на I -I,5 ед. HRA.

Из анализа данных [6] видно, что небольшие добавки к сплаву на основе  $TiC$  карбида молибдена могут увеличивать его твердость на одну ед. HRA (примерно при 8 %  $Mo_2C$ ) или при замене до 40 %  $TiC$  на  $Mo_2C$  повысить прочность при изгибе практически не изменяя твердость.

Учитывая вышесказанное при планировании эксперимента за  $X_1$  было принято количество добавляемого карбида молибдена, которое изменялось от 0 до 40 вес. %, за  $X_2$  - количество карбида ниобия, изменяемое от 0 до 25 вес. %.

### Планирование эксперимента и его реализация

В данной работе нами применялось некомпозиционное ротатбельное планирование при  $K = 2$  (4 центральные точки). Матрица планирования и условия эксперимента приведены в табл. I.

Т а б л и ц а I

Матрица планирования и условия эксперимента

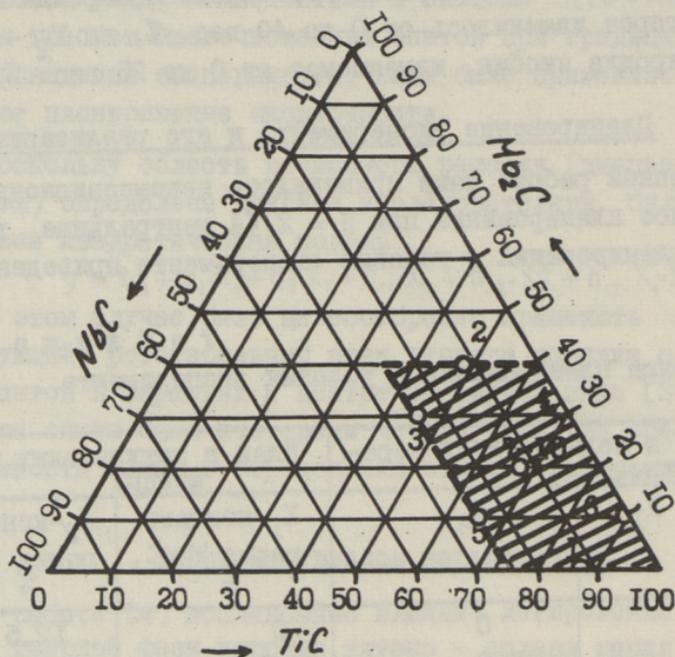
Но- мер опы- та	План в кодированных пере- менных		План в натуральных пере- менных	
	$X_1$	$X_2$	$X_1$ -концент- рация $Mo_2C$ , %	$X_2$ -концент- рация $NbC$ , %
1	-1	0	0	12,5
2	+1	0	40	12,5
3	0,5	0,87	30	25
4	0,5	-0,87	30	0
5	-0,5	0,87	10	25
6	-0,5	-0,87	10	0
7- 10	0	0	20	12,5

Исследованная область концентрационного треугольника  $TiC - Mo_2C - NbC$  с контрольными точками, обозначающими номер опыта, представлена на фиг. I.

Все испытанные серии образцов изготавливались по следующей технологии: размол шихты в течение 72 часов при соотношении шары:смесь - 10:1 в среде этилового спирта, пресование с удельным давлением 1 т/см<sup>2</sup>, спекание - предварительное в среде водорода при 700 °C в течение 30 мин, окончательное - в вакууме  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст. Все образцы изготавливались с 30 вес. % связки, причем соотношение компонентов связки Ni : Co : Cr составляло 4:3:1 [7].

Параметрами оптимизации при исследовании являлись прочность при изгибе, твердость, модуль упругости, окали-

нотойкость и термостойкость. Результаты измерения выходов приведены в табл. 2.



Фиг. 1. Исследованная область концентрационного многоугольника TiC-Mo<sub>2</sub>C-NbC.

Т а б л и ц а 2  
Результаты измерения выходов

Номер опыта	Прочность при изгибе, $\sigma_u$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Твердость, HRA	Модуль упругости, E, кгс/мм <sup>2</sup>	Привес при окислении при 900 °C на воздухе, K, г/м <sup>2</sup>	Мах перепад температур, $\Delta T$ °C
1	106,7	88,9	41830	14,66	1100
2	104,1	89,9	43930	21,98	1100
3	99,8	90,0	40950	12,87	850
4	110,3	89,2	38450	31,74	850
5	97,4	89,9	42150	11,09	870
6	121,1	89,9	40610	40,46	1100
7	114,5	89,7	38660	20,37	850
8	110,3	90,0	38210	22,36	800
9	114,5	89,7	41670	22,43	850
10	110,3	90,0	39990	20,37	900
Ошиб-ка, $S_{эв}$	2,4	0,17	1550	1,15	41

Образцы на изгиб испытывались по трехточечной схеме, расстояние между опорами - 30 мм, сечение образца 5x5 мм. При каждом опыте использовались 20 образцов..

Модуль упругости измерялся путем замера прогиба образца сечением 5x5 мм при нагрузке 100 кг и расстоянии между опорами 35 мм. При каждом опыте испытывались 10 образцов.

Окалиностойкость определялась путем измерения привеса образца после окисления на воздухе при 900 °С в течение 6 часов. Испытывались по 3 образца на серию.

Термостойкость материала оценивалась по максимальному перепаду температур, при котором возникает трещина на образце при охлаждении его с высокой температуры в кипящей воде. Испытывались по три образца на серию.

Построение моделей проводилось на блок-алгоритмах для расчета и статического анализа моделей [3].

После математической обработки полученных результатов были получены регрессионные уравнения, которые адекватно описывают зависимости параметров оптимизации от количества легирующих добавок.

$$\sigma_u = 111,5 - 10X_2 - 8,5X_1^2 + 6,6 X_1X_2 \text{ кгс/мм}^2 \quad (1)$$

$$HRA = 89,8 + 0,3X_1 + 0,3X_2 - 0,5 X_1^2 \quad (2)$$

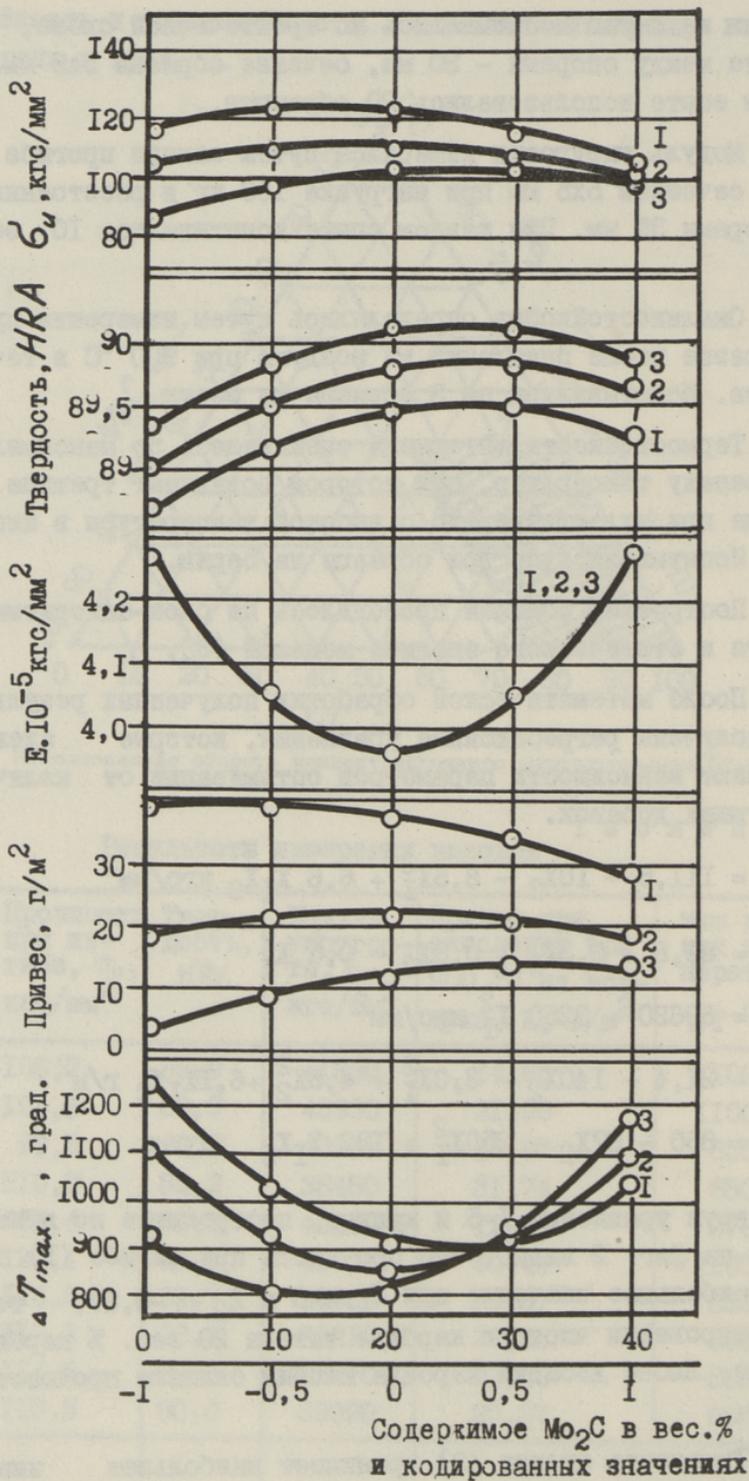
$$E = 39630 + 3250 X_1^2 \text{ кгс/мм}^2 \quad (3)$$

$$K = 21,4 - 140X_2 - 3,0X_1^2 + 4,6X_2^2 + 6,1X_1X_2 \text{ г/м}^2 \quad (4)$$

$$\Delta T_{\max} = 850 - 67X_2 + 250X_1^2 + 132 X_1X_2 \text{ град} \quad (5)$$

Анализируя уравнения 1-5 и кривые, построенные по этим уравнениям на фиг. 2 видно, что прочность при изгибе (1) принимает наибольшее значение при  $X_1 = 0$  и  $X_2 = -0,87$ , то есть при легировании чистого карбида титана 20 вес. % карбида молибдена. Любые добавки карбида ниобия снижают прочность сплава.

Твердость сплава (2) принимает наибольшее значение при  $X_1$  от 0 до 0,5 и при  $X_2 = 0,87$ , то есть с увеличением



Фиг. 2. Зависимость механических свойств сплава от содержания легирующих добавок: 1 - TiC; 2 - TiC + 12,5 % NbC; 3 - TiC + 25 % NbC.

добавок карбида ниобия твердость монотонно возрастает, оптимальным для твердости является количество добавок карбида молибдена в пределах 20–30 вес. %.

Уравнение (3) указывает на то, что на модуль упругости в исследованных пределах концентраций влияют только добавки карбида молибдена, причем при  $X_1 = 0$ , т.е. при 20 вес. %  $Mo_2C$  модуль упругости минимальный.

Уравнение (4) указывает на то, что влияние легирующих добавок на окалиностойкость сплава носит сложный характер, причем добавка к сплаву карбида ниобия во всем исследованном диапазоне концентраций несколько повышает окалиностойкость сплава. При совместном легировании исследованными добавками с повышением концентрации карбида молибдена окалиностойкость зависит от количества карбида ниобия в сплаве, причем при  $X_2 = -I$  (0 вес. % NbC) окалиностойкость растет, при  $X_2 = I$  (25 вес. % NbC) падает и при  $X_2 = 0$  (12,5 вес. % NbC) остается практически неизменной.

Уравнение максимального температурного перепада, выдерживаемого сплавом без появления трещин (5) указывает на то, что сплав с чистым карбидом титана является наиболее термостойким и только в присутствии 40 вес. %  $Mo_2C$  добавки карбида ниобия в исследованных пределах несколько повышают термостойкость.

## В ы в о д ы

1. При использовании спеченного твердого сплава на основе карбида титана с никель-кобальт-хромовой связкой в качестве износостойкого конструкционного материала, работающего при повышенных температурах, можно рекомендовать легирование его твердой фазы карбидом молибдена в количестве до 20 вес. %, что приводит к увеличению его твердости на I ед. HRA и некоторому увеличению его предела прочности на изгиб.

2. Как показали исследования, карбидтитановый сплав, легированный 20 вес. %  $Mo_2C$ , теряет свои преимущества в условиях работы с резкими теплосменами.

## Л и т е р а т у р а

1. Е р е м е н к о В.М. Труды семинара по жаростойким материалам. Изд. АН УССР, 1958, 3, 27.
2. Патент (герм.) № 748933, 1938.
3. В о з н е с е н с к и й В.В. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М., "Статистика", 1974, с. 192.
4. С а м с о н о в Г.В., В и т р я н я к В.К., В о р о н к и н М.А., Л о м а к и н Г.К. Влияние карбида ниобия на свойства безвольфрамовых твердых сплавов. "Порошковая металлургия", № 9, 1973, с. 83-86.
5. Патент (австр.) № I60I72, 1931.
6. К и ф ф е р Р., Б е н е з о в с к и й Ф. Твердые сплавы. Пер. с немецкого. М., "Металлургия", 1971, с. 94.
7. В а л ь д м а Л.Э., К у д р я в ц е в В.А. Некоторые вопросы по оптимизации состава жаропрочных карбидотитановых сплавов. Тезисы докладов I республиканской конференции по порошковой металлургии "Эрозиянностойкие спеченные материалы и их применение". Таллин, 1975, с. 19.

V. Kudrjajtsev, L. Valdma

### Das Legieren von TiC-Ni-Co-Cr

#### Sinterhartmetall

#### Zusammenfassung

Mit Hilfe mathematischer Methoden der Versuchsplanung wurde der Einfluß des Zusatzes  $\text{Mo}_2\text{C}$  und  $\text{NbC}$  auf Biegefestigkeit, Härte, Elastizitätsmodul, Zunder- und Wärmebeständigkeit untersucht. Es ist festgestellt, daß 20 %  $\text{Mo}_2\text{C}$  die Härte und die Biegefestigkeit erhöht, aber die Wärmebeständigkeit verringert.

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЧЕННОГО ТВЕРДОГО  
СПЛАВА ТИПА КАРБИД ТИТАНА - СТАЛЬ ДЛЯ ФОРСУНОК  
ЖИДКОГО ТОПЛИВА

В настоящее время достаточно широкое применение получили материалы нового класса: карбиды, цементированные железом и его сплавами. Различные фирмы ФРГ, Великобритании, США, Японии и других стран выпускают большой ассортимент твердых сплавов данного типа. В качестве твердой фазы в сплавах данного типа, так называемых ферротик, преимущественное применение получили относительно легкий и дешевый чистый карбид титана, а также  $TiC$  в смесях с  $Cr_3C_2$  и  $VC$  [1]. Порошки железа и стали в качестве связки также как и карбид титана сравнительно доступны и недороги. Отсюда вытекает первое ценное свойство материала типа ферротик: он представляет из себя безвольфрамовый твердый сплав. Второе, и самое важное достоинство данного материала: это возможность термической и механической обработки, если содержание карбидной фазы  $\leq 50$  об. % [2, 3].

В СССР уже почти десять лет ведутся исследования по изучению технологии и свойств сплавов типа ферротик, главным образом с целью использования их как износостойких материалов для инструментов бесстружковой обработки различных металлов и сплавов [4, 5, 6].

В ТПИ на кафедре технологии металлов несколько лет ведутся исследования по разработке перспективных материалов для изготовления форсунок жидкого топлива [7].

Основные требования, предъявляемые к материалу форсунок, следующие:

- а) износостойкость в потоке жидкости, увлекающем абразивные частицы;

- б) окалиностойкость до 800 °С;
- в) термостойкость;
- г) достаточные прочность и вязкость.

В первый период работ выяснилось, что форсунки из стандартного сплава ВК15 ввиду очень высокой износостойкости выходят из строя не вследствие износа, а вследствие хрупкости, невысокой термостойкости и окалиностойкости. В эксплуатации расходуется только небольшая часть "запаса износа" перед растрескиванием детали в процессе эксплуатации. Таким образом, материал для форсунок может иметь меньшую износостойкость по сравнению с ВК15, но обладать повышенной вязкостью и такой же прочностью. Поэтому в предлагаемой работе изучены некоторые технологические особенности и свойства с целью выяснения перспективности использования ферротитана в качестве материала форсунок жидкого топлива в энергоблоках.

### Технологические особенности

Типичный технологический цикл по данным литературы [8, 9, 10] и нами проверенный был следующим:

1. Совместный размол-смешивание шихты в шаровой мельнице в этиловом спирте в течение 48 часов.
2. Сушка смеси в вакуумном сушильном шкафу.
3. Пластифицирование смеси 3 %-ным раствором каучука в бензине из расчета 35 мл раствора на 100 г шихты.
4. Прессование деталей или образцов при удельном давлении прессования 1,5-2,5 тс/см<sup>2</sup>.
5. Первое спекание при 650-700 °С в атмосфере осушенного водорода для выжигания пластификатора.
6. Второе, окончательное спекание в вакуумной печи в присутствии жидкой фазы (величина вакуума  $5 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст., печка с молибденовыми нагревателями).

В литературе имеются данные почти о всех этапах технологического цикла изготовления сплавов ферротитан, кроме размола. В первых же опытах оказалось, что употребляемое при размоле карбидтитановых твердых сплавов весовое соотношение размольных шаров к весу шихты 10:1 [11] не го-

дится при изготовлении твердых сплавов со стальной связкой ввиду сильной окисляемости порошка железа, который может после такого интенсивного размола даже спонтанно воспламениться. Поэтому размол был произведен при весовом соотношении размольных шаров к шихте 3:1 до 4:1.

### Свойства материалов типа ферротек

В табл. I приведены некоторые свойства и данные о проведении технологического цикла некоторых сплавов карбида титана - сталь, изготовленных в лаборатории порошковой металлургии ТПИ. Не все, приведенные в табл. I, сплавы соответствуют требованиям, предъявляемым к форсункам. Например, известно, что окалиностойкость до 800 °C стальной матрицы может быть обеспечена, если в твердом растворе хрома в железе содержится не менее 7,5 - 8 % хрома. Однако образцы содержат некоторое количество углерода, вводимого в основном карбидом титана (содержит  $C_{своб}$  до 0,95 %) и порошком железа. После закалки в хромистых сталях растворен весь хром, но при низких температурах отпуска (< 500 °C) выделяются карбиды цементитного типа  $(Fe, Cr)_3C$ . При температурах отпуска выше 500 °C эти карбиды начинают переходить в карбиды  $(Cr, Fe)_7C_3$ , а при еще более высоких температурах и продолжительности отпуска - в карбиды  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  [12].

После довольно продолжительного подогрева при высоких температурах должна быть получена равновесная структура металлической матрицы, состоящая из легированного феррита и специальных карбидов хрома [12].

Углерод, связывая хром в карбидах, объединяет таким образом твердый раствор железа хромом. Принимая, что в высоколегированных хромистых или хромоникелевых сталях присутствуют карбиды хрома состава  $Cr_{23}C_6$  с наиболее высоким содержанием хрома, получаем, что 1 % углерода связывает шестнадцатикратное количество хрома в карбид, при выделении которого такое же количество хрома извлекается из основы структуры твердого раствора.

Предполагая, что при длительной эксплуатации весь углерод, вводимый с карбидом и порошком стали (при 40 вес.% карбида и 60 вес.% стали ~ 0,73 % C) будет связан в кар-

Т а б л и ц а I

Свойства и данные технологического цикла некоторых твердых сплавов ферритик (без применения термической обработки)

№ сплава	Состав сплава, вес. %		Температура спекания, °С	Продолжит. спекания, мин.	Пористость, %	Твердость по Роквеллу, HRC	Предел прочности при изгибе, кгс/мм <sup>2</sup>
	карбиды	связка					
1	30 %	70 % стали состава: 69,5 % Fe, 0,5 % C	1420	20	1,5-2	32	134
2	40 %	60 % стали состава: 3 % Cr, 3 % Mo, 0,7 % C, ост. Fe	1420	20	1-2	49	140
3	40 %	60 % стали состава: 8 % Mo, 4 % Cr, 2 % Ni, 0,7 % C, ост. Fe	1390	15	0-1	67	166
4	40 %	60 % стали состава: 8 % Cr, 1 % Mo, 0,7 % C, ост. Fe	1410	20	0-1	64	195
5	40 %	60 % стали состава: 15,5 % Cr, 13,5 % Ni, 3 % Ti, 0,67 % C, ост. Fe	1420	20	0,5-1,5	48	139
6	40 %	60 % стали состава: 19 % Cr, 3 % Mo, 0,7 % C, ост. Fe	1390	15	1-3	68	120

бидах хрома  $Cr_{23}C_6$  (это предельный случай, мало вероятно, что он достигается), то для сохранения в твердом растворе железа  $Cr \geq 8$  вес.% должен быть введен  $Cr \geq 19$  вес.%. Кроме того, часть хрома растворяется в карбидной фазе. По данным литературы [13], в карбиде титана после отжига твердого сплава обнаруживают до 44 вес.% и после закалки до 21 вес.% от хрома, вводимого в металлическую связку. Значит, если и не весь углерод будет связан в карбидах  $Cr_{23}C_6$ , а часть его будет связана в карбидах  $Cr_7C_3$ , все-таки 19 вес.% хрома не является преувеличенным количеством, учитывая растворимость хрома в карбиде титана.

Хром, растворенный в железе, имеет еще одно важное значение в связи с термостойкостью. Во-первых, хром, повышая температуру превращения  $Fe_\alpha \rightleftharpoons Fe_\gamma$  предотвращает в эксплуатации форсунок, когда возможны резкие температурные перепады от 800 до 100 °C, резкие изменения объема стали при переходе через температурную точку  $Ac_1$ . В связи с термостойкостью, хром полезен еще из-за того, что он уменьшает коэффициент линейного расширения [12].

В хромистую сталь вводился также молибден, который повышает точку  $Ac_1$ . Но по данным литературы при введении свыше 3 % Mo значительно ухудшается окалиностойкость стали [12]. Молибден вводят в твердые сплавы на основе карбида титана для улучшения смачиваемости карбида связкой [14]. Улучшение смачиваемости объясняют растворением молибдена в карбиде титана и образованием при спекании на поверхности между карбидом и расплавом окисла  $MoO_3$ , который легко улетучивается при температуре спекания. Химический анализ карбидных осадков сплава ферротитан показал, что в карбиде титана растворяется около 65 вес.% Mo [13].

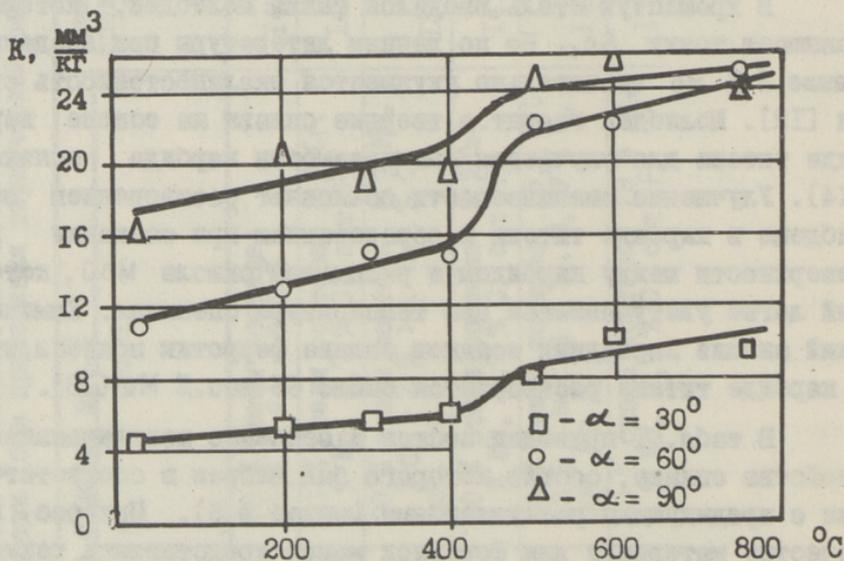
В табл. I приведен состав и основные механические свойства сплава, состав которого был выбран в соответствии с предыдущими рассуждениями (сплав № 6). Интерес в качестве материала для форсунок может представлять также сплав № 5, имеющий в качестве связки аустенитную сталь с 3 вес.% Ti для связывания углерода, вводимого карбидом и порошком нержавеющей стали в карбиды.

## Износостойкость

Так как форсунки обычно работают при температурах 200–300° [15] и есть возможность ее кратковременного возрастания до 700 °С, представляет интерес изучить износостойкость материала после длительного нагрева (отпуска) при разных температурах. Для этого образцы из сплавов № 5 и 6 были закалены с 1100 °С в масло и затем отпущены при температурах от 200 до 750 °С в течение 3–4 часов. Износ материала после различных режимов термической обработки определили в струе кварцевого песка зернистостью 0,1–0,3 мм на центробежном ускорителе ЦУК–3М [16] со скоростью струи 80 м/с, при углах атаки 30, 60 и 90°. Данные, полученные при испытании на интенсивность изнашивания  $K, \text{мм}^3/\text{кг}$  и на относительную износостойкость

$$\varepsilon = \frac{K_{\text{эталон (сталь 45)}}}{K_{\text{испыт. мат.}}},$$

а также твердость образцов до испытания приведены в табл.2.

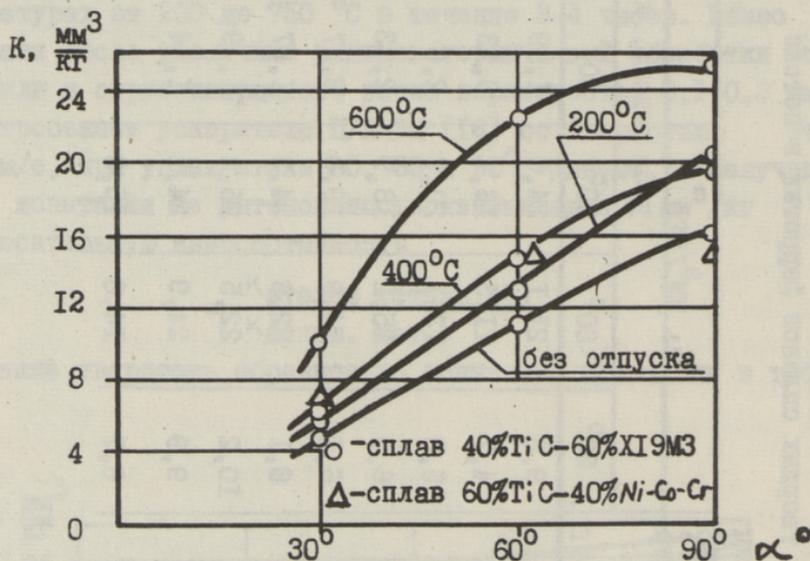


Фиг. 1. Зависимость интенсивности изнашивания от температуры отпуска при различных углах атаки потока сплава 40 % TiC - 60 % X1 9M3.

Результаты испытаний на изнашивание твердых сплавов ферритик в потоке абразивных частиц

№ п/п	Марка материала	Температура отпуска, °C	Твердость по Биккерсу, кг/мм <sup>2</sup>	K, мм <sup>3</sup> /кг			Угол атаки, α°			ε
				30°	60°	90°	30°	60°	90°	
				5	TiC - XI6H14T3	-	525	9,6	21,1	
6	TiC - XI9M3	-	1082	4,7	11,3	16,2	3,23	1,41	0,81	
6	TiC - XI9M3	200	1080	5,8	13,1	20,7	2,6	1,22	0,63	
6	TiC - XI9M3	300	1058	6,0	15,2	18,9	2,53	1,05	0,69	
6	TiC - XI9M3	400	1040	6,1	14,9	19,6	2,47	1,07	0,67	
6	TiC - XI9M3	500	746	9,1	22,3	24,3	1,87	0,72	0,54	
6	TiC - XI9M3	600	695	10,2	22,5	25,2	1,49	0,71	0,52	
6	TiC - XI9M3	750	670	9,9	24,9	24,1	1,54	0,64	0,54	
-	60 вес.% TiC - -Ni - Co - Cr		1143	6,7	14,8	15,6				

Твердость и интенсивность изнашивания мало изменяются после длительного отпуска при температурах 200, 300 и 400 °С (фиг. 1). Только после отпуска при 500 °С и выше интенсивность изнашивания значительно увеличивается. Материал, где в качестве связки использована сталь аустенитного класса Х16Н14Т3 (сплав № 5), имел примерно в 2 раза меньшую износостойкость по сравнению со сплавом № 6.



Фиг. 2. Зависимость интенсивности изнашивания от угла атаки потока при различных температурах отпуска.

На фиг. 2 сравниваются интенсивности изнашивания твердых сплавов ферротик (40 вес.% TiC - сталь Х19М3) с твердым сплавом 60 вес.% TiC - 40 вес. % Ni-Co-Cr.

Была проведена также серия испытаний на износ сплава № 6 в гидроабразивной смеси по схеме Штауффера [17].

Условия испытания: размеры образца, мм - 22x13,5x4... 4,5 (кварцевый песок зернистостью 0,1-0,3 мм); соотношение (по весу) воды и абразива - 20:1; скорость поверхности образца в абразивной смеси, м/с - 5,5; длительность испытания, мин. - 650; эталон - сталь марки 45 в состоянии поставки.

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Результаты испытаний на изнашивание твердого  
сплава ферротит по схеме Штауффера

Марка материала	Температура отпуска, °C	Твердость по Виккерсу, кг/мм <sup>2</sup>	Относительная износостойкость, ε
TiC - XI9M3	-	1082	8,0
TiC - XI9M3	200	1080	7,77
TiC - XI9M3	400	1040	8,46
TiC - XI9M3	500	746	6,91
TiC - XI9M3	750	695	6,84

Ввиду более легких условий изнашивания по методу Штауффера относительная износостойкость значительно повысилась по сравнению с данными в табл. 2. В этих условиях износостойкость образцов, отпущенных при 500 °C и выше, также понижается.

#### Исследование термостойкости

Был исследован сплав № 4 (см. табл. I), который имел наилучшие механические свойства. Из этого сплава были изготовлены форсунки, которые затем подогревали в муфельной печи до 820 °C и после 5-минутного прогрева охлаждали в воде с температурой 20 °C. Образцы выдержали до 65 циклов прогрева == охлаждение до появления различных глазом трещин на поверхности. Но исследования показали, что уже после 25 циклов образцы имели только 20-25 % от первоначальной прочности вследствие образования трещин (неразличимых глазом). Для сравнения была исследована стойкость стандартных форсунок из стали ХВГ. Образцы выдержали не более 3-4 циклов прогрева == охлаждение. Таким образом, можно сделать вывод, что твердый сплав карбид титана - сталь, связка которого имеет точку Ас<sub>1</sub> ниже 800 °C, имеет лучшую термостойкость, чем сталь ХВГ. Можно предположить, что твердый сплав, связка в котором имеет точку Ас<sub>1</sub> выше температуры, с которой производится быстрое охлаждение до комнатной температуры, имеет более высокую термостойкость, чем сплав № 4 (при таком же весовом соотношении карбида титана и металлической связки).

1. Первоначальные опыты при испытании твердых сплавов карбид титана - сталь показали, что если выбрать в качестве металлической связки твердого сплава высокохромистую (19 вес.%) закаленную сталь, то износостойкость закаленного материала не понижается даже после длительного нагрева при температурах 400 °С и ниже и находится примерно на таком же уровне, что и у сплава 60 вес.% TiC - 40 вес.% Ni-Co-Cr.

2. При повышении температуры нагрева выше 400 °С относительная износостойкость понижается в такой же степени, что и твердость закаливаемого сплава.

3. Твердый сплав ферротик с аустенитной связкой имеет небольшую износостойкость ввиду небольшой твердости сплава.

4. Твердый сплав карбид титана - сталь, связка которого имеет точку  $A_c$  ниже температуры, с которой производится быстрое охлаждение до комнатной температуры, имеет повышенную термостойкость по сравнению со сталью ХВГ.

5. Полученные данные показывают, что твердый сплав типа ферротик является весьма перспективным материалом, учитывая его износостойкость, термостойкость и прочность. По форме и качеству поверхности форсунок материал не уступает стандартному твердому сплаву BK15.

#### Л и т е р а т у р а

1. F r e h n, F. Härter - Techn. Mitt., 1973, Bd. 28, № 4, S. 349 - 351.

2. К и п а р и с о в С.С., Н а р в а В.К. Авт. свидетельство СССР № 305201, кл. C22c 29/00, C22c 27/00.

3. F r e h n, F. Deutsche Edelstahlwerke - Techn. Ber., 1968, Bd. 8, № 4, S. 257 - 263.

4. К и п а р и с о в С.С., Н а р в а В.К. Известия ВУЗов, серия "Цветная металлургия", № 3, 1969, с.135-139.

5. Л е с н и к Н.Д. "Порошковая металлургия", № 3, 1965.

6. Ковальченко М.С., Середа Н.Н. "Порошковая металлургия", № 9, 1971, с. 26-29.
7. Вальдма Л.Э., Квйтнер Р.А. О перспективности применения металлокерамики для центробежных форсунок. "Энергомашиностроение", № 1, 1975.
8. Кипарисов С.С., Паисов И.В., Нарва В.К. "Порошковая металлургия", № 9, 1969, с. 10-13.
9. Слепцов В.М., Кириленко С.Н., Науменко В.Я. "Порошковая металлургия", № 8, 1974, с. 45-49.
10. Патент США № 3809540, кл. 29-182.8 (C22c I/05).
11. Самсонов Г.В., Сергеев Н.И., Дзодзиев Г.Т., Витрянюк В.К., Латыева Л.В. Металлокерамические твердые сплавы на основе карбида титана. "Порошковая металлургия", № 9, 1971, с. 42-45.
12. Гудремон Э. Специальные стали. М., Металлургиздат, 1959.
13. Ернер, М., Греагогу, Е. Transactions of the metallurgical society of American Institut of Mechanical Engineers, 1960, v. 218, № 1, p. 117.
14. Варген, R. Internat. J. Powder Met., 1968, v. 4, № 1, p. 51-60.
15. Вальдма Л.Э., Пирсо Ю.Ю. Закономерности абразивного износа некоторых материалов мазутных форсунок. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", серия А, № 322, 1972.
16. Клейс И.Р. Центробежный ускоритель ЦУК-ЗМ для определения относительной износостойкости материалов при абразивной эрозии. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", серия А, № 294, 1970.
17. Stauffer, W.A. Verschleiss durch sandhaltiges Wasser in hydraulischen Anlagen - Schweizer Arch., 1958, 24, S. 218-223; 8, S. 248-263.

Perspectiveness of Utilizing Sintered Steel Bonded  
Titanium Carbide Hard-facing Alloys for Producing  
Fuel Oil Sprayers

Summary

The possibility of producing fuel oil sprayers from steel bonded titanium carbides is investigated. The material consisting of 40 % (mass) titanium carbide and 60 % (mass) steel (19 % Cr, 3 % Mo, 0,73 % C, 72,27 % Fe), satisfies the main operating requirements of the sprayers material: abrasion resistance in the stream of abrasive particles, scale-resistance, thermal shock resistance, sufficient resilience and strength.

Since the operating temperature of the sprayers is from 200 to 300 °C (sometimes up to 700°C for a short period) the abrasion resistance has been investigated in the stream of abrasive particles after hardening and subsequent tempering at the temperatures from 200 up to 750 °C. The abrasion resistance does not decrease after long-duration tempering at the temperatures  $\leq 400$  °C.

П О Р О Ш К О В А Я   М Е Т А Л Л У Р Г И Я

СБОРНИК СТАТЕЙ

I

УДК 621.762:620.193.1

Эффективность применения безвольфрамовых спеченных твердых сплавов в гидроабразивной среде. Вальдма Л.Э. "Труды Таллинского политехнического института", №407, 1976, с. 3-15.

В статье приводятся данные об эффективности применения карбидтитановых и карбидхромовых твердых сплавов в гидроабразивной среде. Эффект проявляется при мягком абразиве (окись железа). Износостойкость в этом случае в 15-30 раз больше, чем у сталей. При испытании в кварцевом песке эффекта нет. Часто решающими факторами являются технологические, которые могут изменить износостойкость безвольфрамовых твердых сплавов в 5-10 раз.

Таблиц - 4, фигур - 7, библиографических названий - 15.

УДК 621.762:620.193.1

Влияние механических свойств на гидроабразивный износ спеченных сплавов TiC-Ni-Co-Cr. Каллас П.К., Вальдма Л.Э. "Труды Таллинского политехнического института", № 407, 1976, с. 17-23.

Определена интенсивность изнашивания 16 спеченных твердых сплавов типа TiC-Ni-Co-Cr в струе воды плюс 1% окислы со скоростью 80 м/с при углах атаки 30, 60 и 90°. Изучена связь между механическими свойствами и износом сплавов. Значимая корреляция получена между интенсивностью изнашивания и твердостью, прочностью на изгиб, величиной карбидного зерна материала.

Таблиц - 2, фигур - 1, библиографических названий - 7.

УДК 621.762

Легирование спеченного твердого сплава TiC-Ni-Co-Cr  
Кудрявцев В.А., Вальдма Л.Э. "Труды Таллинского  
политехнического института", № 407, 1976, с. 25-32.

С помощью математического планирования экспериментов исследовалось влияние добавок карбида молибдена и карбида ниобия на предел прочности при изгибе, твердость, модуль упругости, окалиностойкость, термостойкость.

Указано, что карбид молибдена в количестве до 20 вес.% повышает твердость и прочность сплава при изгибе, однако снижает его термостойкость.

Таблиц - 2, фигур - 2, библиографических названий - 7.

УДК 621.762

Перспективность использования спеченного твердого сплава типа карбид титана - сталь для форсунок жидкого топлива. Кюбарсепп Я.П., Вальдма Л.Э.  
"Труды Таллинского политехнического института",  
№ 407, 1976, с. 33-44.

Исследовалась возможность изготовления форсунок жидкого топлива из твердого сплава карбид титана - сталь. Материал состава: 40 вес.% карбида титана, 60 вес.% стали (19 вес.% хрома, 3 вес.% молибдена, 0,7 вес.% углерода, ост. железа) соответствовал требованиям прочности, износостойкости и термостойкости предъявляемых к материалу форсунок.

Таблиц - 3, фигур - 2, библиографических названий - 17.





Ep.6.7

620

Taklinna Polütehnik  
Instituut

Toimetised

N 407

1976

84

Цена 24 коп.