



**С.В. Яняк, И.И. Комиссарова**  
Вологодский государственный университет

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И АНАЛИЗ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА СО СТАЛЬНЫМИ СВЯЗКАМИ

Экспериментально установлен низкий уровень режущих свойств твердых сплавов на основе 70 % карбида титана со стальными связками. Свойства сталей (твердость, прочность, вязкость, износостойкость) не оказывают принципиального влияния на износ сплавов резанием. Стали карбидного класса (доэвтектоидные, заэвтектоидные, ледебуритные) и аустенитного класса не обеспечивают сплавам приемлемого уровня режущих свойств из-за недостаточной теплостойкости этих сталей. Установлены корреляционные связи между твердостью, прочностью при изгибе, износостойкостью сплавов, «горячей» твердостью стали, с одной стороны, и износом сплавов при резании – с другой.

Твердый сплав, карбид титана, сталь, твердость, прочность, износ, теплостойкость.

Экспериментальные работы показали, что твердые сплавы с железной связкой (30 %) на основе разных карбидов (70 % масс. – TiC, VC, NbC, TaC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Mo<sub>2</sub>C, WC) не обладают механическими и режущими свойствами, необходимыми для их промышленного применения [1–4]. Износ по задней поверхности резцов из этих сплавов оказался в 20–50 раз интенсивнее резца из классического сплава T15K6 [4]. Это объясняется недостаточным уровнем основных механических свойств сплавов (прочности и износостойкости) [2, 3] и низкой теплостойкостью железной связки. Вполне обоснованным является наше предложение: заменить железную связку на стальную с более высоким уровнем свойств.

Цель работы – установление закономерностей влияния химического состава (легирующих компонентов и углерода), структуры, свойств (прочности при растяжении и при изгибе, твердости, пластичности, ударной вязкости, теплостойкости) сталей на режущие свойства твердых сплавов TiC – сталь.

Информационный поиск показал, что работы по твердым сплавам и карбидостаям (с меньшим содержанием TiC) проводились разными исследователями (А. Киффер, Э. Эйманс, М. Эпнер, М. Кумар, С. Сайто, Т. Гибас – за границей, С.С. Кипарисов, М.С. Ковальченко, В.М. Слепцов, В.Н. Анциферов – в нашей стране). В качестве стальных связок использовались известные стали либо карбидного класса (P6M5, P18, X12M, X6B3M, X4H2M8), либо аустенитного класса (X18H9, X17H15). Приведены данные по механическим свойствам, испытания режущих свойств не опубликованы.

В качестве объекта для экспериментальной оценки и анализа свойств нами выбраны твердые сплавы на основе 70 % карбида титана с разными стальными связками. Карбид титана выбран как самое привлекательное для промышленного использования твердое соединение: недефицитен, имеет высокую микротвердость. Недостатком является его низкий уровень взаимодействия с железом при спекании: плохая сма-

чиваемость, слабые межфазовые границы, малая растворимость в феррите, т.е. незначительное упрочнение легированием железной связки. Высокое содержание в сплавах связки (30 %, не характерное для режущих сплавов) выбрано для усиления влияния связки, для оценки роли легирующих компонентов стали на свойства сплава.

В качестве связки выбраны стали разных структурных классов с разными легирующими компонентами и разными свойствами:

1. Сталь X23H28M3Д3Т (по данным химического анализа – X24H24M3Д3Т1) – высоколегированная сталь стабильного аустенитного класса. Механические свойства: высокая пластичность ( $\delta=40\text{--}45\%$ ,  $\psi=49\text{--}57\%$ ), твердость в отожженном состоянии HV160, после закалки – HV200, горячая твердость HV<sub>700</sub><sup>0</sup>180, предел прочности при растяжении  $\sigma_b=700$  МПа, высокая ударная вязкость  $\alpha_n=1900$  кДж/м<sup>2</sup>. Интерес представляет влияние на свойства сплава стабильной аустенитной структуры, высокого содержания хрома и никеля, высокой вязкости и пластичности стали.

2. Сталь X11H3Г9ДТЮ (X11H3Г10ДТ2Ю1) – высоколегированная сталь переходного аустенитомартенситного класса. Механические свойства: высокая пластичность ( $\delta=50\text{--}52\%$ ,  $\psi=60\text{--}65\%$ ), сопровождающаяся упрочнением, твердость HV180,  $\sigma_b=750$  МПа,  $\alpha_n=1400$  кДж/м<sup>2</sup>. Выясняется влияние хрома и марганца, переходной структуры, высокой вязкости стали.

3. Сталь У7А – углеродистая доэвтектоидная сталь. Механические свойства  $\delta=7\%$ ,  $\psi=10\%$ , после отжига HV170, горячая твердость HV<sub>700</sub><sup>0</sup>80,  $\sigma_b=550$  МПа,  $\alpha_n=250$  кДж/м<sup>2</sup>. Выясняется влияние перлитной структуры, углерода на структуру и свойства сплава.

4. Сталь 6Х4М2ФС – заэвтектоидная легированная высокопрочная штамповая сталь. Механические свойства:  $\delta=15\%$ ,  $\psi=20\%$ , твердость после отжига HV190,  $\sigma_b=900$  МПа; после закалки HRC60, прочность при изгибе  $\sigma_u=4200$  МПа,  $\alpha=1600$  кДж/м<sup>2</sup>, горячая твердость HV<sub>700</sub><sup>0</sup>100. Изучается влияние легированного перлита.

5. Сталь ХЗФ12 (Х4Ф12) – высоколегированная износостойкая штамповая сталь ледебуритного класса (по износостойкости превосходит сталь Х12М). Механические свойства:  $\delta=10\%$ ,  $\psi=16\%$ , после отжига твердость HV280, горячая твердость HV<sub>700</sub><sup>0</sup>180, после закалки HRC65,  $\sigma_{\text{н}}=2200$  МПа. Изучается влияние высокого содержания (до 35 % по объему в структуре) высокотвердого карбида ванадия в составе дисперсной ванадиевой эвтектики.

6. Сталь 60Х15Ф (60Х13Ф) – хромистая нержавеющая сталь феррито-карбидного класса. Механические свойства:  $\delta=12\%$ ,  $\psi=18\%$ , в отожженном состоянии HV200,  $\sigma_{\text{в}}=900$  МПа, после закалки HRC57,  $\sigma_{\text{н}}=2400$  МПа,  $\alpha_{\text{н}}=100$  кДж/м<sup>2</sup>, горячая твердость HV<sub>700</sub><sup>0</sup>140. Устанавливается влияние хрома в составе хромистого феррита и специальных карбидов стали на свойства сплава.

Результаты химического анализа порошковых сталей приведены в таблице 1.

Химический состав соответствует марочным обозначениям сталей: Х24Н24МЗДЗТ1, Х11НЗГ10ДТЮ1, У7А, 6Х4М2ФС1, Х4Ф12, 60Х13Ф.

Порошковые стали были изготовлены на Ново-Тульском металлургическом комбинате распылением в аргоне. Образцы и режущие пластины были изготовлены по технологии, включающей размол шихты (70 % TiC + сталь) в этиловом спирте, прессование, пластифицирование, спекание в вакуумных электропечах.

Износ абразивом 24А5 выполнен на оригинальной установке (внутри вращающегося барабана в течение 5 мин).

Материалы по экспериментальной оценке и анализу твердости, прочности при изгибе, износу абразивом сплавов TiC – железо с содержанием карбида титана 70–90 % и сплавов 70 % TiC – стальные связки опубликованы в наших работах [5–7].

Испытания резанием проведены при полуставном точении (скорость резания 100 м/мин, подача 0,15 мм/об, глубина 1 мм) стали 45 (HB140). Режущие пластины с размерами 12,7×12,7×4,7 мм (с четырьмя вершинами) устанавливались с механическим креплением в корпус реза. Элементы геометрии:  $\alpha=6^\circ$ ,  $\gamma=-6^\circ$ ,  $\phi=\phi_1=45^\circ$ ,  $r=0,8$  мм. Критерий износа  $h_3/T$  определялся по отношению ширины ленточки износа по задней поверхности к периоду стойкости реза [4, 8, 9].

Результаты экспериментальной оценки свойств сплавов приведены в таблице 2.

В сравнении со стандартным сплавом Т15К6 ( $h_3/T=0,02$  мм/мин) все экспериментальные сплавы показали низкий уровень режущих свойств ( $h_3/T=0,55-1,25$  мм/мин). Одна из причин – недостаточное содержание в сплаве твердой карбидной основы (70 % TiC), тогда как в режущем сплаве Т15К6 содержание карбидов – 94 % (TiWC+WC). Другие причины высокого уровня режущих свойств сплава Т15К6 связаны с высокой твердостью (HRA90), более высокой прочностью при изгибе (1250 МПа) и, главное, с высокой теплостойкостью (850 °С) сплава, которая обеспечена особым типом структуры кобальтовой связки с упрочнением дисперсными интерметаллидами типа Co<sub>6</sub>W<sub>5</sub>.

Таблица 1

Химический состав порошков сталей, % масс.

№ п/п	Марка стали	C	Cr	Ni	Mo	Mn	V	Cu	Ti	Si	Al
1	Х23Н28МЗДЗТ	0,01	24,03	24,1	3,11	0,06	-	2,62	0,54	0,32	-
2	Х11НЗГ9ДТЮ	0,03	11,43	3,12	-	9,75	-	1,22	2,07	0,26	1,2
3	У7А	0,72	-	-	-	0,30	-	-	-	0,35	-
4	6Х4М2ФС	0,82	3,80	-	2,17	-	0,88	-	-	0,76	-
5	ХЗФ12	3,25	4,41	-	-	-	11,94	-	-	0,22	-
6	60Х15Ф	0,60	12,85	-	-	-	0,05	-	-	0,31	-

Таблица 2

Режущие и механические свойства твердых сплавов на основе карбида титана со стальными связками

№ п/п	Состав сплава, % масс.	Износ резанием $h_3/T$ , мм/мин	Прочность при изгибе, МПа	Твердость HRA	Износ абразивом, мг
1	70 % TiC, 30 % Fe	0,78	790	86	20,2
2	70 % TiC, 30 % сталь Х23Н28МЗДЗТ	0,55	690	85,5	24,8
3	70 % TiC, 30 % сталь Х11НЗГ9ДТЮ	0,60	550	85,5	20,8
4	70 % TiC, 30 % сталь ХЗФ12	0,95	500	85	32,5
5	70 % TiC, 30 % сталь 60Х15Ф	1,15	460	84,5	-
6	70 % TiC, 30 % сталь 6Х4М2ФС	1,25	450	84	-
7	70 % TiC, 30 % сталь У7А	0,83	720	86	25,6

Корреляционные связи свойств позволяют определить пути повышения режущих свойств сплавов на основе карбида титана со стальной связкой.

Явная корреляция установлена между износом резанием и твердостью сплавов (рис. 1): с увеличением твердости износ резанием уменьшается. Повышение твердости сплава может быть достигнуто за счет увеличения содержания TiC до 85–90 % [5]. Как показано в наших работах [4, 8], у сплава 85 % TiC, 15 % Fe износ резанием  $h_3/T=0,25$  мм/мин при твердости HRA89,5. Повышение твердости может быть также достигнуто путем упрочнения связки и улучшения ее взаимодействия с карбидом титана.

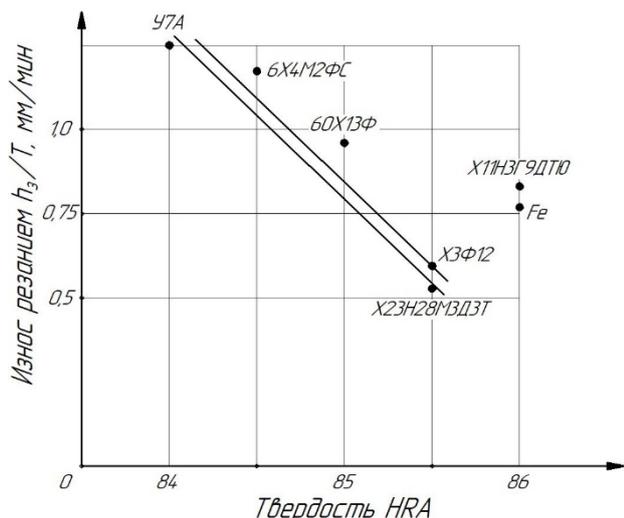


Рис. 1. Влияние твердости на износ резанием сплавов 70 % TiC – сталь

Как тенденция, хотя и с большим разбросом значений, обнаружена связь между износом резанием и прочностью сплавов (рис. 2). Повышение прочности способствует уменьшению выкрашивания режущей кромки и износа резанием. Повышение прочности (так же, как и твердости) сплавов достигается путем упрочнения связки и улучшения ее взаимодействия с карбидом титана.

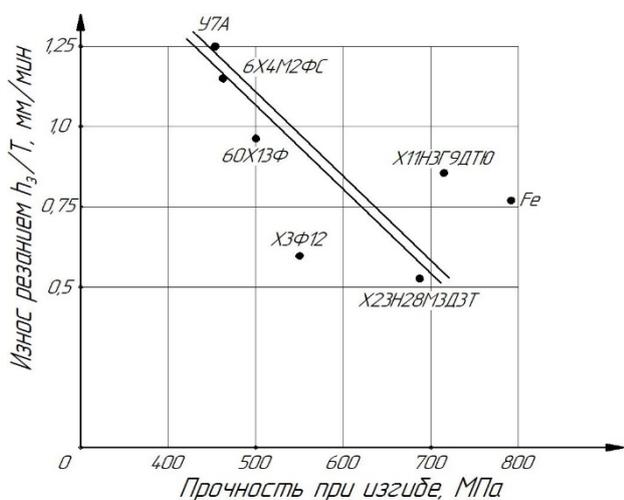


Рис. 2. Влияние прочности при изгибе на износ резанием сплавов 70 % TiC – сталь

Корреляционная связь просматривается между износом резанием и износом абразивом (рис. 3): с уменьшением износа абразивом износ резанием снижается. Это связано с примерно одинаковым характером разрушения режущей кромки и поверхности трения образца путем выкрашивания карбидных зерен [3, 4]. Снижение абразивного износа достигается путем увеличения содержания карбидов [5, 6], упрочнения связки, улучшения ее взаимодействия с карбидом титана, а также за счет оптимизации размеров карбидных зерен [3].

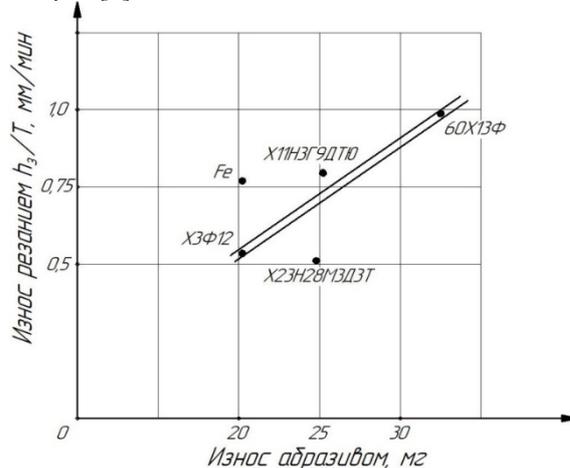


Рис. 3. Влияние износа абразивом на износ резанием сплавов 70 % TiC – сталь

Наиболее важной, на наш взгляд, является корреляционная связь износа резанием с «горячей» твердостью (рис. 4). С минимальным разбросом в одну линию выстроились экспериментальные точки всех сплавов со стальными связками. Удаление точки сплава с железной связкой от общей линии, возможно, вызвано оценкой «горячей» твердости чистого железа, тогда как в сплаве с карбидом титана в феррите растворяется от 1 до 2 % титана, что может существенно повысить «горячую» твердость железной связки. Можно уверенно утверждать, что с повышением «горячей» твердости (теплостойкости) связки износ резанием монотонно снижается, особенно при более высокой скорости резания.

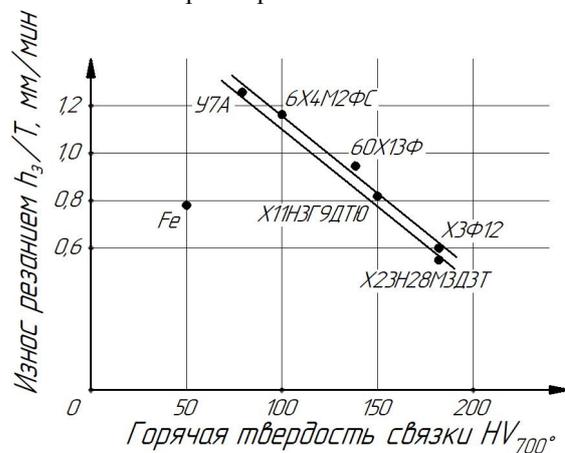


Рис. 4. Влияние теплостойкости (горячей твердости) стальной связки на износ резанием сплавов 70 % TiC – сталь

Влияние легирующих компонентов стали на режущие свойства сплавов на основе карбида титана однозначно не установлено. Хром, марганец, никель (даже в больших количествах) не улучшают взаимодействие между карбидом титана и сталью (если судить по уровню механических свойств сплавов). Однако эти и другие компоненты через образование того или иного типа структуры влияют на теплостойкость сплава, а значит, на его режущие свойства. Общая тенденция: с увеличением содержания легирующих компонентов в стали износ резания сплава уменьшается. Тип структуры стали должен обеспечить ей наибольшую теплостойкость.

Что касается таких собственных свойств сталей, как: прочность, пластичность, вязкость – они себя никак не проявили. Можно сделать осторожный вывод, что эти свойства не влияют напрямую на режущую способность сплавов TiC – сталь. Прочность и вязкость связки должны поддерживать сопротивление разрушению режущего клина в условиях динамического нагружения при резании. Пластичность связки как эксплуатационное свойство противопоказана твердым сплавам, так как снижает сопротивление сплава пластической деформации, то есть его твердость.

В эффективном режущем твердом сплаве должно быть достаточно высокое содержание карбидной основы (~80–90 % масс.) и стальная связка с высокой теплостойкостью, упрочненная легированием, с повышенным взаимодействием с карбидной основой на базе карбида титана.

#### Литература

1. Исследование показателей, определяющих режущие свойства инструментальных твердых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов / В. В. Постнов, С. Х. Хадиуллин, Е. Н. Малахов, С. В. Старовойтов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16, № 8 (53). – С. 118–125.
2. Учкин, П. Г. Использование порошков с добавлением карбида вольфрама для плазменной наплавки рабочих органов глубокорыхлителей / П. Г. Учкин, В. А. Шахов // Известия Оренбургского государст-

венного аграрного университета. – 2017. – № 6 (68). – С. 92–96.

3. Никифоров, В. Технология металлов и других конструкционных материалов / В. Никифоров. – Санкт-Петербург: Политехника, 2015. – 382 с.

4. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов на основе карбида титана со стальными связками / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства. Материалы национальной научно-практической конференции (Пенза, 28–29 марта 2018 г.). Часть 4: Технические науки / Пензенский ГУАиС. – Пенза, 2018. – С. 204–209

5. Яняк, С. В. Влияние содержания карбида титана на свойства твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства. Сборник докладов Национальной научно-практической конференции (Пенза, 28–29 марта 2018 г.). – Пенза, 2018. – Ч. 4. – С. 210–214.

6. Комиссарова, И. И. Экспериментальная оценка и анализ износостойкости материалов / И. И. Комиссарова, С. В. Яняк, И. О. Берсенев // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 2 (2). – С. 6–10.

7. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов на основе карбида титана со стальными связками / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства. Сборник докладов Национальной научно-практической конференции (Пенза, 28–29 марта 2018 г.). – Пенза, 2018. – Ч. 4. – С. 204–209.

8. Яняк, С. В. Режущие свойства твердых сплавов на основе карбида титана с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3 (5). – С. 78–81.

9. Яняк, С. В. Методика и результаты экспериментальной оценки режущих свойств твердых сплавов TiC – железо / С. В. Яняк, В. Ю. Яблокова // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XIV Международной научно-технической конференции. – Вологда, 2020. – С. 117–123.

*S.V. Ianiak, I.I. Komissarova*  
*Vologda State University*

#### EXPERIMENTAL ESTIMATION AND ANALYSIS OF CUTTING PROPERTIES OF TITANIUM CARBIDE-BASED HARD ALLOYS WITH STEEL BONDS

A low level of cutting properties of hard alloys based on 70% titanium carbide with steel bonds was experimentally established. The properties of steels (hardness, strength, toughness, wear resistance) do not fundamentally affect the wear of alloys by cutting. Steels of the carbide class (hypereutectoid, ledeburite) and austenitic class do not provide alloys with an acceptable level of cutting properties due to the insufficient heat resistance of these steels. Correlations have been established between the hardness, bending strength, wear resistance of alloys, "hot" hardness of steel, on the one hand, and wear of alloys during cutting, on the other.

Carbide, titanium carbide, steel, hardness, strength, wear, heat resistance.