

УДК 621.762

В. П. Бондаренко, чл.-корр. НАН Украины

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины,
г. Киев, Украина*

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ В УКРАИНЕ

The state of the art of the hard alloy production in Ukraine and abroad has been analyzed. The main lines of scientific investigations into the development of new grades of hard alloys and technologies of their production have been substantiated.

Впервые твердые сплавы в Украине были использованы В. Н. Бакулем в 1933 г в буровых и камнеобрабатывающих инструментах. Это позволило повысить ресурс работы этих инструментов в 300–500 раз. Дальнейшая работа В. Н. Бакуля в содружестве с сотрудниками ВНИИТС (г. Москва) и Московского комбината твердых сплавов привела к созданию новых марок твердых сплавов и сотен высокоэффективных конструкций буровых, камнеобрабатывающих и металлообрабатывающих инструментов.

В 1980–1990 гг. предприятия Украины использовали за год до 2000 т изделий из твердых сплавов разных марок и форм в разных областях промышленности. В тот период в Украине вырабатывалось за год до 550 т твердых сплавов. Основными производителями были Светловодский комбинат твердых сплавов и тугоплавких металлов, Опытный завод Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, ГИЦТС «Светкермет» и несколько десятков твердосплавных участков ведущих машиностроительных предприятий Украины.

За годы развала СССР и перехода от плановых к рыночным отношениям использование твердых сплавов в Украине снизилось до 700 т, а годовое производство до 50 т. В настоящее время производство твердых сплавов базируется в основном на переработке лома твердых сплавов и импортном карбонильном никеле, который не всегда обеспечивает необходимый уровень их качества.

Основными производителями твердых сплавов в Украине являются ГНПП «Алкон-твердосплав» концерна АЛКОН НАН Украины, ДОНИКС, СКТС и ТМ, Харьковский физико-технический университет, ГИЦТС «Светкермет».

Научные коллективы, которые работают в области твердых сплавов, сохранились в ИСМ им. В. Н. Бакуля НАНУ, ИПМ им. И. М. Францевича НАНУ, НТУУ (КПИ), ГИЦТС «Светкермет». Благодаря их напряженной работе был разработан ряд технологий, использование которых в значительной степени позволило сохранить производство твердых сплавов.

За последние годы Межотраслевым советом по вопросам твердых сплавов при Отделении физико-технических проблем материаловедения НАНУ был предпринят ряд мероприятий по восстановлению и развитию твердых сплавов в Украине. Этой проблемой в настоящее время занимаются Кабмин Украины, СНБОУ, НАН Украины и Минпромполитики Украины. Уже наблюдаются достаточно хорошие перспективы. ГНПП «Алкон-твердосплав» разработал программу развития своего производства в объемах до 150 т за год. СКТС и ТМ подготовил бизнес-план восстановления своего производства до 220 т в год. Планируют также увеличить свое производство ДОНИКС, Харьковский физико-технический университет, ГИЦТС «Светкермет» и другие организации. Завершается работа по созданию ассоциации отечественных производителей твердых сплавов, идет активный поиск отечественных и зарубежных инвесторов.

Таким образом, можно констатировать, что в Украине начинается период возрождения и развития производства твердых сплавов. Поэтому активизация научных исследований, которые должны содействовать этому процессу, актуальна и не терпит промедления.

Зарубежный опыт в этом плане показывает, что для сплавов группы ВК основные исследования концентрируются на следующих направлениях: обеспечение двухфазного состояния твердых сплавов, полное исключение из структуры сплавов пористости, расширение диапазона размеров зерен WC.

Двухфазное состояние сплавов обеспечивается за счет жесткого регулирования содержания углерода в твердосплавной смеси. Контроль содержания углерода осуществляется после размола, а затем проводится дошихтовка необходимых компонентов. Чтобы содержание углерода в сплаве не изменилось, в качестве пластификатора используется парафин, который при выгорании не оставляет в сплаве свободного углерода. Использование в качестве пластификатора каучука, как это принято в Украине, приводит к появлению в сплаве до 0,1 % (по объему) свободного углерода. Поэтому переход к применению вместо каучука парафина может существенно улучшить структуру твердых сплавов, особенно с небольшим содержанием кобальта – до 15 % (по массе), так как в сплавах с большим содержанием кобальта ширина двухфазной области по содержанию углерода достаточно большая, чтобы исключить появление свободного углерода даже при использовании каучука. Технология введения парафина в твердосплавные смеси в промышленном масштабе в Украине не отработана и поэтому в этом направлении следует провести исследования, охватывающие не только физико-химические аспекты технологии, но и создание специального оборудования.

Чтобы содержание углерода в прессовке после удаления пластификатора не изменилось, спекание осуществляют в вакуумных печах на специальных подкладках, исключающих непосредственный контакт с графитовой оснасткой. Применение вакуума вместо широко используемого в Украине водорода исключает перенос углерода через газовую фазу, что особенно вредно на жидкофазной стадии спекания, когда содержание углерода может выходить за пределы двухфазной области.

Беспористое состояние сплава обеспечивается за счет применения компрессионного спекания при давлениях до 100 атм. Газостаты с давлением до 2000 атм, использовавшиеся ранее, в настоящее время уже из-за их чрезмерной стоимости не используются. Компрессионное спекание проводится в модернизированных вакуумных печах, выдерживающих рабочее давление до 100 атм. Температурный режим в печах компрессионного спекания достаточно сложный и длительный, но зато обеспечиваются отсутствие в структуре твердых сплавов свободного углерода и пористости, а соответственно и значительно более высокие физико-механические и эксплуатационные свойства.

Влияние компрессионного спекания на состояние карбидного скелета изучено еще в недостаточной степени. Наши эксперименты, проведенные с Н. А. Юрчуком и Н. М. Прокопивым, показывают, что применение компрессионного спекания сплава ВК6 при температурах ниже температуры плавления эвтектики WC-Co, приводит к существенному повышению хрупкости твердого сплава. В связи с этим изучение влияния условий компрессионного спекания на карбидный скелет твердых сплавов остается актуальным. Это особенно важно для малокобальтовых и мелкозернистых твердых сплавов, когда карбидный скелет сильно развит. Приложение внешнего давления в этих случаях будет способствовать упрочнению и большей степени консолидации карбидного скелета, что, по данным В. Т. Головчана, должно приводить к существенному повышению хрупкости и снижению прочности твердых сплавов, содержащих меньше 11 % (по массе) кобальта.

Особенно много исследований проведено по влиянию размера зерна WC на свойства твердых сплавов. Учитывая вышеизложенное, большое значение имеют данные фирм, в которых решены проблемы по обеспечению отсутствия в структуре твердых сплавов свободного углерода и пористости. К таким фирмам относится и фирма «Sandvik Hard Materials». В проспектах этой фирмы наиболее четко размеры зерен WC указаны в пределах 5,0 мкм –

0,5 мкм (3,5–5,0; 2,1–3,4; 1,4–2,0; 1,0–1,3; 0,5–0,9 мкм). Границы зерен WC для сплавов типа «Ultrafine» и «Extra Coarse» не определены. Указывается, что размер зерна WC для первого типа составляет < 0,5 мкм, а для сплавов второй группы – > 5 мкм.

При этом в сплавы первой группы вводится от 0,6 до 1,0 % (по массе) добавок, состав которых не раскрывается. Вероятно это ингибиторы роста. При этом для сплавов с 3 % (по массе) Co достигаются очень высокая твердость (HRA > 94,9) при прочности при изгибе (на образцах типа В) 2500 МПа, прочности при сжатии 11500 МПа. Но K_{Ic} этих сплавов равен всего 5 МПа·м^{1/2}, что находится на уровне керамики среднего качества. Поэтому применение таких твердых сплавов в инструментах весьма ограничено. Более перспективными из этой группы могут быть сплавы с 8 % (по массе) Co, у которых HRA = 93,8, $\sigma_{изг} = 3150$ МПа, $\sigma_{сж} = 7700$ МПа, $K_{Ic} = 10$ МПа·м^{1/2}. На основании этого можно сделать вывод, что дальнейшее уменьшение (< 0,5 мкм) зерна WC должно сопровождаться увеличением содержания кобальта, чтобы поддерживать на приемлемом уровне величину K_{Ic} твердых сплавов. А это, в свою очередь, будет приводить к снижению твердости и прочности, как при сжатии, так и при изгибе.

Более перспективными с точки зрения практического применения являются твердые сплавы группы «Extrafine», в которых также используются специальные добавки от 0,5 до 0,7 % (по массе), а размер зерна WC составляет 0,5–0,9 мкм. При этом при содержании кобальта 3–15 % (по массе) твердость HRA находится в пределах 93,9–90,4, $\sigma_{изг} = 3300$ –3900 МПа, $\sigma_{сж} = 7800$ –5300, $K_{Ic} = 7$ –16 МПа·м^{1/2}.

Возможно, в сплавах группы «Ultrafine» можно будет повысить K_{Ic} за счет устранения или уменьшения концентрации ингибиторов роста, но при этом придется использовать специальные, быстро протекающие процессы спекания, чтобы предотвратить рост зерен WC. С материаловедческой точки зрения эти сплавы интересны с том плане, что они близки к границе размеров частиц WC, когда принципиально изменяется механизм движения дислокаций в сплаве (от перерезания частиц WC до переползания через них). Поэтому исследование физических механизмов, обеспечивающих прочность и пластичность особо мелкозернистых твердых сплавов, является достаточно перспективным.

Сплавы группы «Extra-Coarse» ($d_{WC} > 5$ мкм) в фирме «Sandvik Hard Materials» исследованы пока не достаточно. Данные приведены только для сплавов с 6 и 10 % (по массе) кобальта. Для этих сплавов твердость HRA составляет 89,0–85,6, $\sigma_{изг} = 2300$ –3100 МПа, $\sigma_{сж} = 4300$ –3500 МПа, $K_{Ic} = 16$ –21 МПа·м^{1/2}. Высокие значения K_{Ic} (22–27 МПа·м^{1/2}) в этой фирме получены только для сплавов с 15–30 % (по массе) кобальта и размером зерна WC 1,4–3,4 мкм.

Влияние размера зерна WC на K_{Ic} детально исследовано в монографии [1] (рис. 1 и 2).

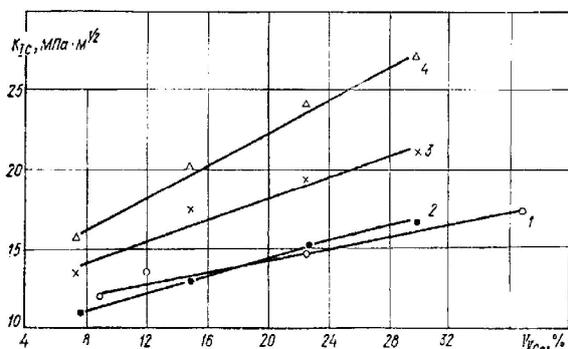


Рис. 1. Зависимость трещиностойкости от объемного содержания кобальта в сплаве: 1 – 1-я серия, $\bar{d}_{WC} = 2$ мкм; 2, 3, 4 – 2-я серия \bar{d}_{WC} – соответственно 2; 5 и 9 мкм.

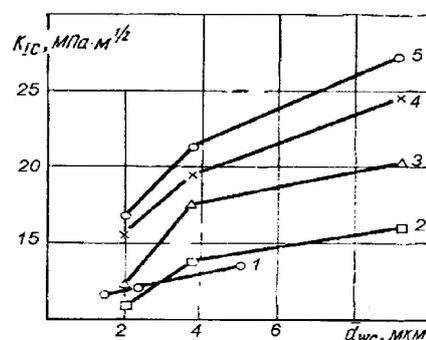


Рис. 2. Зависимость трещиностойкости разрушения от величины зерна WC: 1 – 1-я серия, $V_{Co} = 10$ %; 2, 3, 4, 5 – 2-я серия, соответственно 5, 10, 15 и 20 %.

Из них видно, что при увеличении d_{WC} до 9 мкм величина K_{Ic} существенно растет, причем с увеличением содержания кобальта интенсивность роста повышается. Поэтому сплавы с d_{WC} больше 9 мкм для обеспечения роста K_{Ic} являются весьма перспективными. Этот вывод подтверждается работами [2–5] для сплавов с $d_{WC} > 9$ мкм (табл. 1–4).

Таблица 1. Физико-механические свойства твердых сплавов с высоким содержанием кобальта [1, 2]

Свойства	Марка сплава			
	ВК20К	ВК15	ВК20	ВК25
Преобладающий размер зерен карбидной фазы, мкм	6–15	1–3	1–3	1–3
Предел прочности при изгибе, МПа	1500–1600	1800	1900	2000
Предел прочности при сжатии, МПа	2500	2840–3400	3600	2500–3300
Предел текучести (0,1 %), МПа	1000	1270–1400	1800	870–1600
Максимальная деформация до разрушения, %	9,5	2,0	3,0	4,5
Работа разрушением при одноосном сжатии, Дж/см ³	22	65	90	130

Эти данные свидетельствуют о том, что особо крупнозернистые твердые сплавы должны быть эффективными в тех областях применения, когда напряжения существенно ниже предела текучести и прикладываются многократно (холодновысадочный инструмент, прокатные валки, штампы, детали пар трения, конструкционные детали мельниц, дробилок и т. п.). Такие сплавы представляют значительный интерес и с материаловедческой точки зрения, так как при этом можно получить много новых научных результатов. К ним можно отнести: установление экстремума на кривой $K_{Ic} = f(d_{WC}, \% Co)$; формирование скоплений дислокаций перед крупным зерном WC и механизмы их взаимодействия с зерном (перерезание, отслаивание связки, разрыв связки, отслаивание граничных слоев WC), обеспечение прочного карбидного каркаса и последующую его пропитку расплавами металлов, нанесение однослойных и многослойных пластичных или износостойких покрытий на зерна WC, объемное и поверхностное легирование участков кобальтовой фазы, частичная замена поверхностного слоя кобальтовой связки на другие металлы и сплавы, упрочнение связки термообработкой. Поэтому следует отметить, что как в практическом, так и в материаловедческом плане сплавы с размером зерна WC более 9 мкм представляют большой интерес. Их изучение может привести к получению весомых научных и практических результатов.

Исходя из вышеизложенного, на наш взгляд, наиболее перспективными являются исследования, которые могут дать новый толчок развитию отечественного твердосплавного производства в ближайшие 3–5 лет. К ним можно отнести следующее:

1. Разработка технологии изготовления твердых сплавов, стойких к высоким термодинамическим нагрузкам, со сверхкрупнозернистой и комбинированной структурой (прокатные валки, детали пар трения, аппараты высокого давления, зубки шарошечных долот, буровые инструменты, износоустойчивые детали мельниц и дробилок, штампы и т. п.).

2. Создание высокоэффективных энерго- и ресурсосберегающих технологий на основе термодинамических и кинетических исследований процессов диспергирования, восстановления, карбидизации тугоплавких металлов и соединений, а также спекания твердых сплавов с использованием закрытых реакторов, углеводно-водородных сред, электрофизических методов скоростного измельчения частиц порошков и спеченных изделий, печей с повышенным давлением газовой среды, действия неравномерных статических нагрузок, магнитных и электрических полей, плазменных и лазерных потоков.

Таблица 2. Эксплуатационные показатели инструмента (пуансон–матрица), оснащенного твердым сплавом, на операции высадки шариков [4, 5]

Размер шарика, дюйм	Стойкость стального инструмента, тыс. шт.	Стойкость инструмента из сплавов ВК15, ВК20, тыс. шт.	Стойкость инструмента из сплавов ВК10КС, ВК20КС, тыс. шт.	Коэффициент превышения стойкости инструмента из сплавов ВК10КС и ВК20КС относительно	
				стального	твердосплавного
2,5 мм	159,5	–	4920	31	–
1/8	270,0	–	8730	32	–
3/16	102,0	–	2620	25	–
7/32	42,2	–	930,0	22	–
15/64	82,5	–	1970	24	–
1/4	78,4	–	2130	25	–
9/32	66,6	–	1890	28	–
5/16	39,9	1732,6	1769,0	44,2	1,0
3/8	25,2	404,2	1112,7	44,2	2,7
7/16	–	254,0	828	–	3,3
31/64	46,0	–	750	16	–
1/2	23,0	308,4	517,5	22,5	1,7
7/8	11,2	39,9	203,4	18,0	5,1
19 мм	17,67	49,18	130,46	7,5	2,6

Таблица 3. Эксплуатационные показатели инструмента, оснащенного твердым сплавом, на операции высадки болтов [4, 5]

Наименование инструмента	Размер болта	Стойкость стального инструмента, кг	Стойкость сплава ВК20КС, кг	Стойкость инструмента из сплава ВК20КС, кг	Коэффициент превышения стойкости инструмента из сплава	
					ВК20КС относительно стального	ВК20КС относительно ВК20КС
Матрица (хол. выс.)	M6	1550	43260	-	27,8	-
То же	M8	1890	40610	-	21,4	-
То же	M10	1780	33480	-	18,8	-
То же	M12	1850	29200	-	15,7	-
То же	M16	2906	25800	60000	9,0	2,3
Матрица (гор. выс.)	M12	1100	-	25000	-	-

Таблица 4. Прочностные и эксплуатационные характеристики твердых сплавов ВК20 и ВК20К [1]

Марка сплава	V _{св.} , %	\bar{d} _{вс.} , мкм	$\sigma_{изл.}$, МПа	$\sigma_{сж.}$, МПа	$\alpha \cdot 10^{-4}$, Дж/м ²	W _p , Дж/см ³	Стойкость высадочного инструмента	
							Болт M16	Болт M20 Шарик 1/2"
ВК20	30	2,2	2360	3560	6,7	93	25	15
ВК20К	30	10,2	1470	2480	2,8	215	270	75

3. Повышение эффективности работы твердых сплавов за счет их легирования тугоплавкими соединениями и интерметаллидами.

4. Совершенствование способов управления состоянием карбидного скелета в твердых сплавах.

5. Разработка методов очистки твердых сплавов от содержания свободного углерода, кислорода и азота.

6. Реализация способов укрепления твердых сплавов термообработкой и обработкой расплавами металлов.

К разработкам, которые необходимы для более далекой перспективы (15–20 лет), можно отнести:

1. Создание способов обеспечения необходимого качества межфазных границ за счет легирования связки, покрытия частичек тугоплавкой составляющей нано- и микрослоями ингибиторов и промоторов роста, рафинаторов поверхности частиц, активаторов и дезактиваторов собирательной рекристаллизации.

2. Создание новых марок твердых сплавов на основе отечественного сырья (титана, железа, ферроникеля) с целью исключения или существенного уменьшения использования дефицитных для Украины и мира вольфрама, кобальта и никеля.

3. Разработка новых способов получения углеводородов из угля с целью замены ими природного газа в технологиях карбидизации.

4. Исследование процессов регулирования тонкой кристаллической структуры тугоплавких составляющих путем облучения спеченных твердых сплавов высокоэнергетическими частичками (электронами, протонами, нейтронами, фотонами) в сочетании с закалкой, отжигом, ядерным легированием и т.п.).

5. Разработка способов изготовления микро- и нанослоистых частичек тугоплавких составляющих с заданным распределением слоев для обеспечения необходимого уровня механического и адгезионного взаимодействия твердых сплавов с обрабатываемыми материалами и контртелами пар трения.

6. Совершенствование эффективных способов изготовления комбинированных материалов с наиболее рациональным распределением по их объему структурных составляющих, однородных и неоднородных слоев для обеспечения необходимого распределения состава, структуры и механических напряжений в изделиях конкретного назначения.

7. Разработка динамических методов спекания изделий из твердых сплавов с целью обеспечения максимального диспергирования тугоплавких составляющих в связке.

8. Разработка эффективных способов замены и модифицирования поверхностных слоев связки твердого сплава с целью повышения коррозионной, износо- и ударной стойкости и снижения адгезионного взаимодействия поверхностей твердосплавных изделий.

Этот далеко не исчерпывающий перечень научных, технических и технологических проблем, решение которых будет способствовать возрождению и развитию твердых сплавов в Украине, что требует решения ряда организационных, финансовых, информационных вопросов, объединения усилий ученых, научно-исследовательских, проектно-конструкторских организаций, министерств, ведомств, ведущих промышленных предприятий, структурной перестройки существующих организаций, создания новых структурных ассоциаций, объединений, солидной идеологической и финансовой поддержки государства.

В результате в Украине будет создано эффективное твердосплавное производство, ликвидирована зависимость машиностроительной, горнодобывающей, оборонной отраслей промышленности Украины от государств – ведущих производителей твердых сплавов, значительно снижена зависимость от исчерпания мировых запасов остродефицитных вольфрама, кобальта и никеля, обеспечено интенсивное развитие материаловедения в Украине, создано большое количество новых рабочих мест.

Литература.

1. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 328 с.
2. Технологические рекомендации по изготовлению твердосплавного инструмента для высадки крупногабаритного крепежа /Под ред. В. С. Самойлова – М: СПТБ «Орг-примтвёрдосплав», 1972. – 20 с.
3. О сопротивлении твердых сплавов разрушению при ударе / Ивенсен В. А., Гольдберг З. А., Эйдук О. Н. и др.// Твердые сплавы. – 1965. – № 6. – С. 199–208.
4. Фальковский В. А. Твердые сплавы для обработки металлов давлением. – М.: НИИ-Маш, 1978. – 44 с.
5. Фальковский В. А. Теоретические основы разработки и исследования твердых сплавов для бесстружковой обработки металлов. Автореф. дис. ... докт. техн. наук.– М.: МИСиС, 1997. – 35 с.

Поступила 22.06.2006 г.