

УДК 621.762: 621.904

**А. Ф. Ильющенко**, член-корр. НАН Беларуси;  
**А. А. Баран, С. В. Побережный, Е. В. Звонарев**, кандидаты технических наук

*Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии»  
г. Минск, Республика Беларусь*

### **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА НА СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ СВЯЗКИ Fe-Ni-Cu-Sn, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ДЛЯ РЕЗКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*The results and findings relating to the appropriate influence of fine disperse carbonyl iron powder on physical and mechanical features of Fe-Ni-Cu-Sn bonding composition for diamond tool are covered as well as these ones regarding the influence of wear resistant fillers and additional abrasives which are incorporated into matrix bonding material. The influence concerns the above-mentioned features. The operation cutting diamond tool parameters for a number of promising bonding systems are presented.*

Довольно широкий и устойчивый спрос в республике на алмазный инструмент для резания строительных материалов и дорожных покрытий удовлетворяется в основном за счет импорта из стран СНГ и дальнего зарубежья. Это обуславливает актуальность работ по совершенствованию как технических, так и экономических характеристик алмазного отрезного инструмента отечественного производства и обеспечение его конкурентоспособности на внутреннем рынке.

В последние годы значительное повышение цен на металлы на мировом рынке, в том числе на металлические порошки, привело к существенному увеличению доли затрат на материалы связок в себестоимости алмазного инструмента. Если ранее стоимость связки отрезного инструмента составляла 8–12 % общих затрат на материалы, в настоящее время ее доля увеличилась до 24–30 %. Особенно это отразилось на стоимости связок с большой долей никеля и кобальта, цена на порошки которых повысилась в 2–3 раза.

В этой связи все большее внимание уделяется разработке связок на основе более дешевых элементов, прежде всего железа и меди. Большие возможности в этом плане открываются при использовании в связках Fe-Ni-Cu-Sn железного карбонильного порошка фракции (4–12 мкм), с большей площадью удельной поверхности, у порошка распыленного железа.

Связки на основе железа для отрезного инструмента применяют довольно широко [1–3]. Однако физико-механические характеристики уступают, в частности, характеристикам связок на основе кобальта и твердых сплавов. Так, последние имеют прочность на изгиб  $\sigma_{и} = 1250\text{--}1300$  МПа при ударной вязкости  $KCU = 10\text{--}14$  Дж/см<sup>2</sup> и твердости 105–110 HRB, в то время как связка М6-14 имеет  $\sigma_{и} \leq 1030$  МПа,  $KCU = 6,2$  Дж/см<sup>2</sup>, HRB = 95–100 [1]. Близкая по составу М6-14 и разработанная в ГНУ ИПМ для резания бетона связка М6-ПМЗ, отличающаяся меньшей долей олова и большей долей никеля, при использовании в ней порошка распыленного железа обеспечивает  $\sigma_{и} = 1080\text{--}1120$  МПа,  $KCU = 8\text{--}10,5$  Дж/см<sup>2</sup>, HRB = 96–99. Еще более высокую твердость (102–108 HRB) и ударную вязкость (14–18 Дж/см<sup>2</sup>) имеет связка М6-ПМ7, изготовленная в ГНУ ИПМ на основе никеля. Вместе с тем в связке М6-ПМЗ был отмечен эффект повышения некоторых физико-механических свойств при использовании порошка железа марки ПЖРВ 2.200 более мелкой фракции, просеянного через сито с размером ячейки 63 мкм. Так, при близких значениях твердости ударная вязкость состава с отсеянным железным порошком повысилась до 10–11,8 Дж/см<sup>2</sup> (на 17–20 %), прочность на изгиб – до 1128–1215 МПа (на 6–8 %).

Таким образом, с использованием мелких порошков железа, прежде всего карбонильного, открываются новые возможности совершенствования связок на основе железных композиций.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния доли карбонильного железного порошка марки ВС фракции 8–12 мкм в железной составляющей базового состава Fe–Ni–Cu–Sn и аналогичных составов с долей никеля 6 и 12 %. Составы исследованных связующих композиций и полученные для них усредненные значения прочности на изгиб, ударной вязкости и твердости приведены в табл. 1, графическая интерпретация результатов – на рис. 1.

Установлено, что увеличением доли карбонильного порошка в железной составляющей композиции повышаются все исследуемые физико-механические характеристики. Так, для состава с долей никеля 6 % прочность на изгиб повысилась в 1,22 раза (с 953 до 1159 МПа), ударная вязкость – в 1,73 раза (с 9,2 до 15,9 Дж/см<sup>2</sup>). При доле никеля 9 и 12 масс. % прирост составил 7–9 %. При этом твердость композиций с долей никеля 6 % остается приблизительно такой же, а твердость композиций с долей никеля 9 и 12 % повышается на 7–8 HRB, что является достаточно существенным.

Таблица 1. Зависимость физико-механических характеристик связки Fe–Ni–Cu–Sn при различном содержании карбонильного порошка в железной составляющей

Связка	Содержание элемента, %					Прочность на изгиб $\sigma_{и}$ , МПа	Ударная вязкость KCU, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость HRB
	Cu	Sn	Ni	Fe	в том числе Fe карб.			
ПМЗ-6-0	36,0	5,0	6,3	52,7		952,7	9,20	88,6
ПМЗ-6-33	36,0	5,0	6,3	52,7	33,3	1137,9	12,56	88,9
ПМЗ-6-66	36,0	5,0	6,3	52,7	66,7	1135,8	14,01	86,6
ПМЗ-6-100	36,0	5,0	6,3	52,7	100,0	1159,0	15,96	87,4
ПМЗ-9-0	33,0	5,0	9,3	52,7		1180,9	11,71	91,0
ПМЗ-9-33	33,0	5,0	9,3	52,7	33,3	1203,7	13,50	91,3
ПМЗ-9-66	33,0	5,0	9,3	52,7	66,7	1295,6	12,19	94,5
ПМЗ-9-100	33,0	5,0	9,3	52,7	100	1263,9	12,44	96,8
ПМЗ-12-0	30,0	5,0	12,3	52,7		1143,8	13,70	92,4
ПМЗ-12-33	30,0	5,0	12,3	52,7	33,3	1261,0	13,96	93,6
ПМЗ-12-66	30,0	5,0	12,3	52,7	66,7	1239,7	15,40	97,5
ПМЗ-12-100	30,0	5,0	12,3	52,7	100,0	1357,3	15,30	100,6

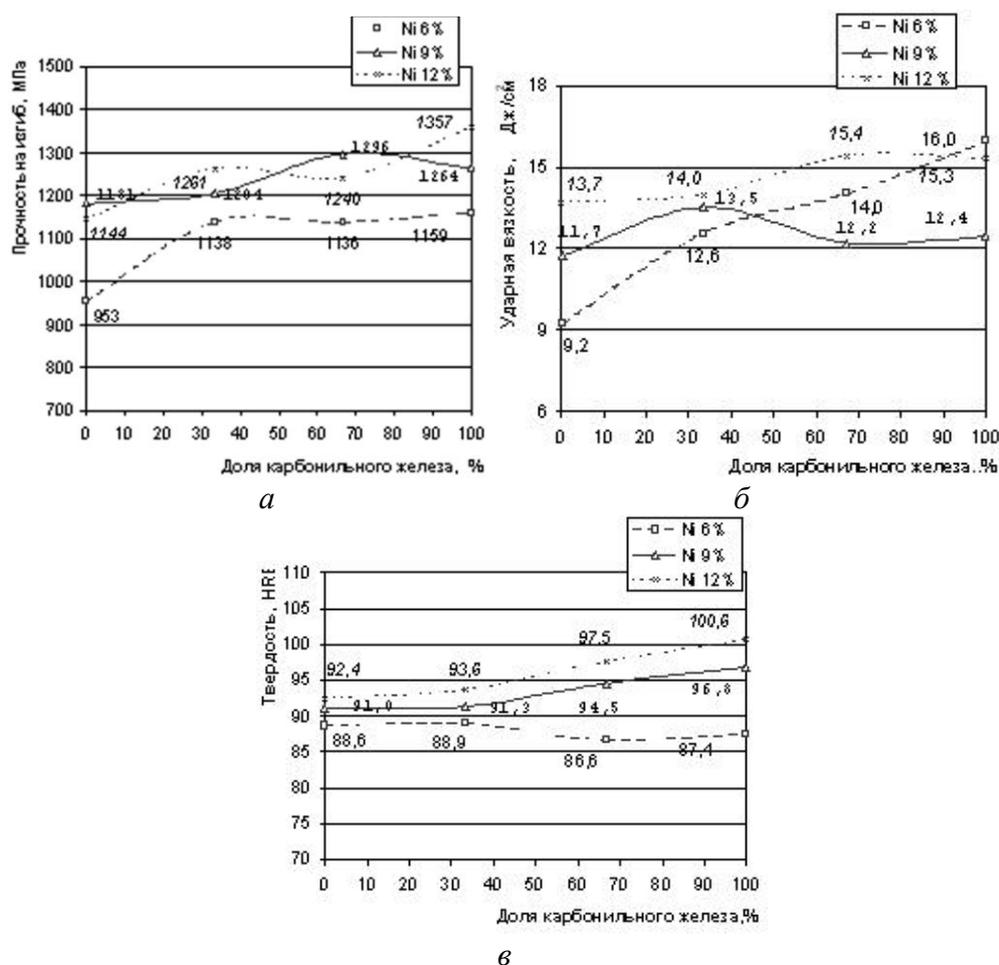


Рис. 1. Зависимости прочности на изгиб (а), ударной вязкости (б) и твердости (в) связующей композиции Fe–Ni–Cu–Sn от доли карбонильного порошка в железной составляющей (Fe – 52,7 масс.%)

Таким образом, с увеличением доли карбонильного железа в железной составляющей связки Fe–Ni–Cu–Sn существенно повышаются физико-механические свойства связки, что обуславливает перспективность их использования в алмазном инструменте для резания строительных материалов и дорожных покрытий.

К существенным факторам при решении вопроса о выборе применяемого материала связки относятся его технологические свойства. Так, при применении в связке вместо электролитического никеля карбонильного существенно ухудшается уплотняемость: плотность прессовки с содержанием электролитического никеля 48,6 % при давлении прессования 500 МПа составляет 6,5 г/см<sup>3</sup>, карбонильного – 5,7 г/см<sup>3</sup>, что приводит к ухудшению формуемости либо при повышении давления прессования – к появлению расслоенных трещин. В то же время технологические свойства карбонильного железного порошка применительно к разрабатываемым связующим композициям оказались вполне приемлемыми. Так, насыпная плотность использованного карбонильного железного порошка составляет 2,05 г/см<sup>3</sup> против 2,34 г/см<sup>3</sup> для распыленного, что обуславливает снижение насыпной плотности связующих композиций. При этом уплотняемость (табл. 2) оказалась ниже прогнозируемой, что обусловило хорошую формуемость прессовок при давлении 500 МПа, применяемом для исходного технологического варианта с распыленным железным порошком.

Таблица 2. Влияние содержания карбонильного железного порошка на технологические свойства прессовок

Параметр	Значение			
Доля карбонильного порошка в железной составляющей связки, %	0	33,3	66,7	100
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	3,06	2,97	2,86	2,78
Средняя высота прессовки при давлении 500 МПа, мм	8,8	8,86	8,94	9,03
Плотность после прессования, г/см <sup>3</sup>	6,56	6,51	6,46	6,39

Таким образом, установлено, что с увеличением в связующей композиции Fe–Ni–Cu–Sn доли карбонильного порошка фракции 8–12 мкм в железной составляющей взамен порошка распыленного железа фракции 63 мкм повышаются прочность на изгиб, ударная вязкость и твердость связующей композиции. При этом наибольший прирост ударной вязкости (в 1,7 раза) отмечается для состава с содержанием никеля 6 %, а твердости (на 8 HRB) – для состава с содержанием никеля 12 %.

Известно, что стойкость алмазного инструмента для резания высокоабразивных материалов повышается при использовании в связках добавок износостойких соединений – оксидных, карбидных, нитридных, а также интерметаллидов с высокой микротвердостью. Однако помимо абразивного воздействия связка должна противостоять силовым нагрузкам в зоне резания, в том числе тепловым, а это, в свою очередь, требует обеспечения определенных физико-механических и теплофизических свойств. Эти требования удовлетворяются только в случае применения только металлической композиции матричной структуры: чем более высокие характеристики матричной композиции и лучше ее легкоплавкая составляющая при спекании смачивает износостойкий наполнитель, тем обеспечивается более высокая стойкость алмазного отрезного инструмента.

В этой связи на основании полученных результатов исследования в качестве такой матричной композиции приняли состав 49,7 % Fe; 12,3 % Ni; 33 % Cu и 5 % Sn, в котором используется порошок карбонильного железа марки ВС (фракция – 8–12 мкм).

В качестве износостойких наполнителей использовали недефицитные типовые соединения – карбид хрома (КХ), карбид вольфрама (в виде смеси ВК8) и измельченный до фракции менее 50 мкм литой карбид вольфрама в виде смеси соединений W<sub>2</sub>C и WC (релит). Эти материалы имеют высокую микротвердость и лучше, чем оксидные соединения, смачиваются расплавами на основе Cu–Sn [4].

Планом экспериментальных работ предусматривалось, чтобы состав матричной композиции Fe–Ni–Cu–Sn не изменялся и в нее вводили равное по объему содержание наполнителей с градацией 7, 14 и 21 об. % т. Такой подход позволил упростить сравнительный анализ влияния наполнителя на изменение физико-механических свойств связки.

Как видим (табл. 3), при введении всех трех наполнителей существенно снижаются прочность на изгиб (рис. 2) и ударная вязкость образцов, получаемых спеканием под давлением. Наиболее существенно прочность на изгиб снижается при использовании карбида хрома – с 861 МПа при 7 об. % до 495 МПа при 21 об. % (кривая снижения прочности на изгиб для измельченного релита менее пологая – с 955 МПа до 699 МПа), а при повышении содержания ВК8 с 7 до 21 об. % можно отметить значений прочность на изгиб относительно стабильна.

Таблица 3. Состав и физико-механические свойства связующей композиции Fe–Ni–Cu–Sn, модифицированной наполнителями и дополнительными абразивными свойствами

Обозначение	Содержание элемента, %				Размер фракции Fe, мкм	Карбид	Содержание карбида, %		$\sigma_{\text{л}}$ , МПа	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	HRB <sub>ср</sub>
	Fe	Cu	Sn	Ni			масс.	об.			
ПМ3-12-100-С+КХ 0	49,7	33,0	5,0	12,3	10	КХ	-	-	1088,6	9,45	99,1
ПМ3-12-100-С+КХ7	46,82	31,09	4,71	11,59	10		5,8	7	860,9	7,23	93,1
ПМ3-12-100-С+КХ14	43,89	29,14	4,42	10,86	10		11,7	14	686,1	4,55	86,4
ПМ3-12-100-С+КХ21	40,85	27,13	4,11	10,11	10		17,8	21	494,6	2,01	82,9
ПМ3-12-100-С+ВК7	43,14	28,64	4,34	10,68	10	ВК8	13,2	7	894,5	2,97	105,4
ПМ3-12-100-С+ВК14	37,42	24,85	3,77	9,26	10		24,7	14	788,1	2,65	107,5
ПМ3-12-100-С+ВК21	32,4	21,52	3,26	8,02	10		34,8	21	860,1	2,73	111,3
ПМ3-12-100-С+МР7	43,14	28,64	4,34	10,68	10	Релит	13,2	7	954,6	8,95	83,3
ПМ3-12-100-С+МР14	37,42	24,85	3,77	9,26	10		24,7	14	827,0	4,93	93,8
ПМ3МР-12-100-С+МР21	32,35	21,48	3,26	8,01	10		34,9	21	699,5	2,29	112,0
ПМ3-12-100-С+АР7	43,14	28,64	4,34	10,68	10		13,2	7	807,5	5,43	97,8
ПМ3-12-100-С+АР14	37,42	24,85	3,77	9,26+	10		24,7	14	643,2	4,87	97,0
ПМ3-12-100-С+АР21	32,35	21,48	3,26	8,01	10		34,9	21	508,8	4,44	96,8
ПМ3-12-100-С+КО7	48,41	32,14	4,87	11,98	10	Корунд	2,6	7	798,0	5,93	107,0
ПМ3-12-100-С+КО14	46,97	31,19	4,73	11,62	10		5,5	14	602,0	3,82	91,0
ПМ3-12-100-С+КО21	45,4	30,15	4,57	11,24	10		8,65	21	480,5	2,81	83,8
ПМ3-12-100-С+КК7	48,29	32,07	4,86	11,95	10	Карбид кремния зеленый	2,83	7	768,4	7,03	93,5
ПМ3-12-100-С+КК14	46,77	31,05	4,71	11,57	10		5,9	14	642,5	5,83	94,0
ПМ3-12-100-С+КК21	45,08	29,93	4,54	11,16	10		9,3	21	526,4	3,71	98,0

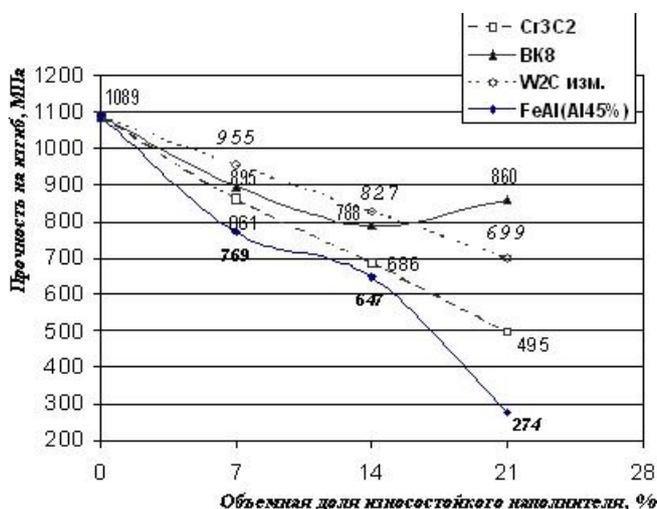


Рис. 2. Зависимости прочности на изгиб связующей композиции Fe–Ni–Cu–Sn от содержания износостойкого наполнителя

Следует отметить также резкое снижение ударной вязкости для всех приведенных составов с ВК8 до 2,65–2,97 МПа (рис. 3) и снижение КСУ с 7,3 до 2,0 Дж/см<sup>2</sup> (для Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) и с 8,9 до 2,3 Дж/см<sup>2</sup> (для мелкого релита).

Изменение твердости HRB (рис. 4) неоднозначно: для Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> характерно снижение HRB по мере увеличения его содержания в связке (до 83 HRB при 21 об. %), а введение ВК8 даже в количестве 7 об. % обуславливает повышение твердости композиции без наполнителей до 105 HRB с последующим ее ростом до 111 HRB при 21 об. % ВК8. Более однозначно влияние на

твердость объемной доли измельченного релита: при 7 об. % твердость связки существенно меньше матричной – 83 HRB, а при 21 об. % твердость повышается до 112 HRB.

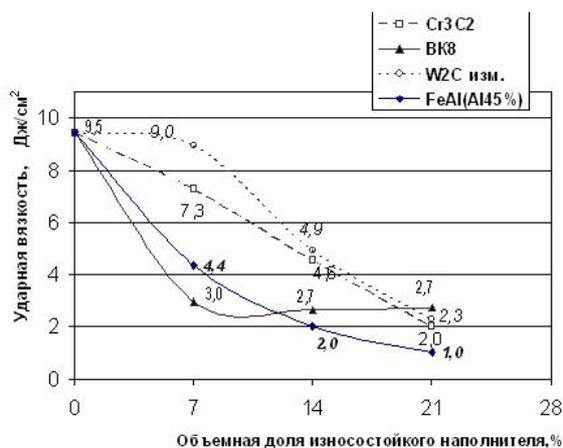


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости связующей композиции Fe–Ni–Cu–Sn от содержания объемного наполнителя

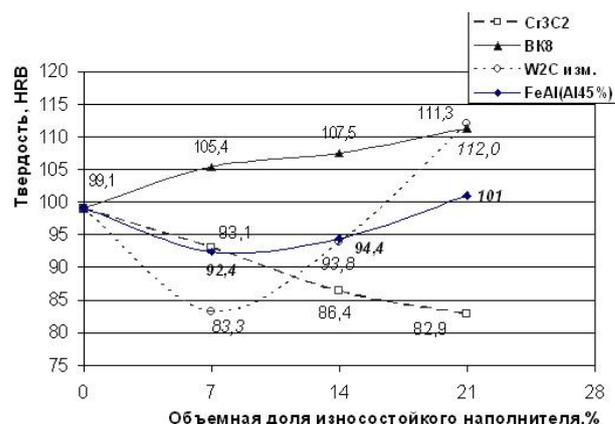


Рис. 4. Зависимость твердости связующей композиции Fe–Ni–Cu–Sn от содержания износоустойчивого наполнителя

При использовании в качестве модифицирующей добавки порошка композита FeAl, содержащего наноразмерные включения интерметаллида Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> [5] и имеющего высокую микротвердость (500–850 HV<sub>50</sub>), его влияние на физико-механические свойства исследуемого матричного материала связки Fe–Ni–Cu–Sn неоднозначно.

Оказалось, что вследствие наличия тонкой структуры такого интерметаллида [5] возможно повышение твердости и прочности матричного материала. С другой стороны наличие значительного по объему количества интерметаллида FeAl, имеющего высокую твердость, можно было ожидать снижение прочности и ударной вязкости вследствие наличия большого количества трудносмачиваемых компонентов.

Приведенные в табл. 4 физико-механические характеристики связок, содержащих добавки FeAl с содержанием алюминия 45 и 30 масс. %, позволяют говорить об их положительном влиянии на износоустойчивость композита при некотором снижении прочности на изгиб и ударной вязкости.

Как видим, более высокие значения HRB получены при использовании крупной фракции (80–120 мкм) синтезированного композита FeAl с содержанием алюминия 45 %. Вместе с тем по общим тенденциям изменения физико-механических свойств связки при ее легировании добавками FeAl последний в большей мере можно рассматривать как материал износоустойчивого наполнителя.

В целом снижение механических характеристик изучаемых композиционных связок с увеличением объемной доли износоустойчивых наполнителей обусловлено с уменьшением площади контактного сечения порошкового тела за счет остаточной пористости и неметаллических включений в виде добавок карбидов и интерметаллидов, объемное содержание которых в композите может составлять до 25 % при остаточной пористости в пределах 4 % и наполнителя 21 %.

В этом случае в соответствии с известным уравнением М. Ю. Бальшина [6] с использованием введенного им представления о контактном сечении пористого тела прочность описывается выражением

$$\sigma_{\text{пор.}} = \sigma_{\text{к}} (1 - \Theta)^m,$$

где  $\sigma_{\text{к}}$  – прочность беспористого материала;  $\Theta$  – пористость (в рассматриваемом случае в этот показатель включается также объемное содержание неметаллической компоненты);  $m$  –

коэффициент, учитывающий диапазон плотности порошкового тела, для малопористых материалов можно принять  $m = 2$ .

**Таблица 4. Состав и физико-механические свойства композиции Fe–Ni–Cu–Sn, легированной добавками FeAl**

Обозначение	Содержание элемента, %				Размер фракции Fe, мкм	Вид карбида	Содержание карбида, %		$\sigma_{и}$ , МПа	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	HRB сред.
	Fe	Cu	Sn	Ni			масс.	объем.			
ПМЗ-12-100-С+FeAl(45)-0	49,7	33,0	5	12,3	10	FeAl(45%)	-	-	1074,6	9,05	95,1
ПМЗ-12-100-С+FeAl(45)-3.5	48,81	32,41	4,91	12,08	10		1,8	3,5	842,3	5,96	92,0
ПМЗ-12-100-С+FeAl(45)-7	47,86	31,78	4,82	11,84	10		3,7	7	768,5	4,35	92,4
ПМЗ-12-100-С+FeAl(45)-14	45,9	30,48	4,62	11,36	10		7,65	14	646,9	2,02	94,4
ПМЗ-12-100-С+FeAl(45)-21	43,78	29,05	4,4	10,83	10		11,95	21	273,9	1,05	101,0
ПМЗ-12-100-С+FeAl(45)-7КФ	47,86	31,78	4,82	11,84	10		3,7	7	786,5	4,01	98,9
ПМЗ-12-100-С+FeAl(45)-14КФ	45,9	30,48	4,62	11,36	10		7,65	14	626,8	2,07	103,1
ПМЗ-12-100-С+FeAl(30)-7	47,54	31,56	4,78	11,76	10	FeAl(30%)	4,35	7	818,8	4,18	92,9
ПМЗ-12-100-С+FeAl(30)-14	45,25	30,05	4,55	11,2	10		8,95	14	592,8	2,6	91,6

В этом случае прочность связи Fe–Ni–Cu–Sn без наполнителя составляет 1100 МПа, а расчетная прочность связки с объемной долей наполнителя 21 % и пористости 4 % составит  $\sigma_{и} = 618$  МПа, что близко к полученным экспериментально значениям.

Одним из вариантов повышения стойкости и производительности отрезного инструмента является армирование связки дополнительным абразивом [7].

В качестве дополнительных абразивов рассмотрим добавки таких недефицитных материалов, как релит фракции 400/250 мкм, корунд фракции 400/200 мкм, карбид кремния зеленый фракции 400/315 мкм. Как и в предыдущих исследованиях, изготавливали образцы с равным объемным содержанием абразивов и оценивали изменение физико-механических характеристик получаемых композитов. Результаты приведены в табл. 3, а их графическая интерпретация – на рис. 5.

При этом прогнозировалось сохранить высокие значения прочности на изгиб, ударной вязкости и твердости получаемого материала, не уступающие матричному материалу. Однако из-за плохой смачиваемости расплавом Cu–Sn прочностные и упруго-вязкие характеристики связующих композиций по мере увеличения объема абразива снижаются. Снижение твердости по мере увеличения содержания абразива характерно только для корунда. Вместе с тем при содержании корунда 7 об. % все три физико-механические характеристики довольно высоки, в связи с чем такой состав перспективен для практического применения.

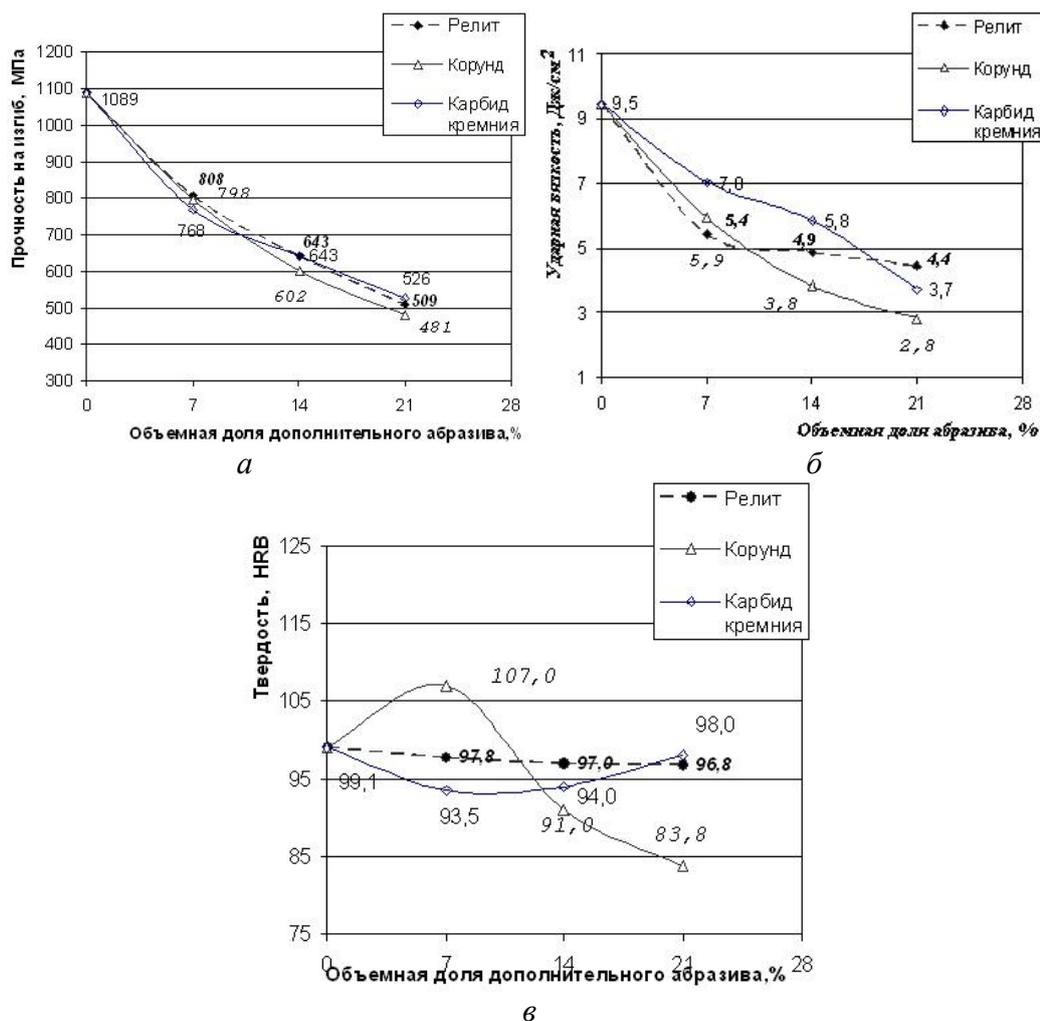


Рис. 5. Зависимости физико-механических характеристик (а – прочности на изгиб; б – ударной вязкости; в – твердости) связующей композиции Fe–Ni–Cu–Sn от содержания дополнительного абразива

На основании анализа результатов изменения физико-механических характеристик от массовой доли карбонильного железа и никеля, объемной доли износостойких наполнителей и дополнительных абразивов для изготовления сегментов алмазных отрезных кругов выбрали семь составов связующих (табл. 5).

Таблица 5. Состав и физико-механические свойства связок для изготовления экспериментальных образцов сегментов

Обозначение: ПМЗ-12-100-С +	Содержание элемента, %				Размер фракции Fe, мкм	Карбид	Содержание карбида, %		$\sigma_{изг.}$ , МПа	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	HRB <sub>ср</sub>
	Fe	Cu	Sn	Ni			масс.	об.			
<b>КХ0</b>	49,7	33,0	5,0	12,3	10	-	-	-	1167,8	9,45	99,1
<b>ВК7</b>	43,14	28,64	4,34	10,68	10	ВК8	13,2	7	959,6	2,97	105,4
<b>ВК21</b>	32,4	21,52	3,26	8,02	10	ВК8	34,8	21	922,6	2,73	111,3
<b>МР18,5</b>	34,89	23,17	3,52	8,63	10	Мелкий релит	29,8	18,5	783,1	3,61	103,0
<b>+FeAl(45)-10,5КФ</b>	46,9	31,13	4,72	11,5	10	FeAl(45%)	5,68	10,5	706,7	3,04	101,0
<b>КО7</b>	48,41	32,14	4,87	11,98	10	Корунд	2,6	7	856,1	5,93	107,0
<b>КК14</b>	46,77	31,05	4,71	11,57	10	Карбид кремния	5,9	14	689,2	5,83	94,0

Испытывали отрезные круги диаметром 350 мм с 21 сегментом (типоразмер 40×3,5×7 мм) на синтетических алмазах марки АС160 500/400, плакированных хромом (концентрация алмазов – 40 %). Экспериментальные образцы изготовили по типовой технологии прессования и последующего спекания под давлением. Результаты испытаний приведены в табл. 6.

**Таблица 6. Результаты испытаний экспериментальных образцов отрезных кругов на основе карбонильного железа**

Шифр образца	Состав связки	Армированный материал-добавка	Обрабатываемый материал					
			Бетон			Асфальтобетон		
			Производительность резания, см <sup>2</sup> /мин	Уд. расход, карат/м <sup>2</sup>	Расчетный ресурс, м <sup>2</sup>	Производительность резания, см <sup>2</sup> /мин	Уд. расход, карат/м <sup>2</sup>	Расчетный ресурс, м <sup>2</sup>
300-1	33%Cu – 5%Sn – 12,3%Ni – 49,7%Fe (карб.)	–	443,87	0,78	24,31	951,5	0,54	35,23
300-2	28,64%Cu – 4,34%Sn – 10,68%Ni – 43,14%Fe (карб.)	ВК8 – 13,2 % (7 об.%)	453,63	0,63	30,35	928,39	0,42	44,86
300-3	21,52%Cu – 3,26%Sn – 8,02%Ni – 32,4%Fe (карб.)	ВК8 – 34,8 % (21 об.%)	393,14	0,57	33,27	907,14	0,37	50,95
300-4	23,17%Cu – 3,51%Sn – 8,63%Ni – 34,89%Fe (карб.)	Релит – 16,7 % (18,5 об.%)	355,86	0,61	31,27	738,26	0,54	35,10
300-5	31,13%Cu – 4,72%Sn – 11,6%Ni – 46,88%Fe (карб.)	(FeAl45%) – 5,68 % (10,5 об.%)	430,0	0,79	23,95	823,09	0,57	33,12
300-6	32,14%Cu – 4,87%Sn – 11,98%Ni – 48,41%Fe (карб.)	Корунд – 2,6 % (7 об.%)	458,67	0,62	30,73	853,4	0,56	34,14
300-7	31,05%Cu – 4,71%Sn – 11,57%Ni – 46,77%Fe (карб.)	Карбид кремния – 5,9 % (14 об.%)	416,97	0,67	28,51	815,49	0,50	38,37
300-8	33%Cu – 5%Sn – 12,3%Ni – 49,7%Fe (ПЖР)	–	408,71	0,88	21,70	804,67	0,57	33,41

Таким образом, установлено, что с повышением в связующей композиции Fe–Ni–Cu–Sn доли карбонильного порошка фракции 8–12 мкм в железной составляющей взамен порошка распыленного железа фракции менее 63 мкм повышаются прочность на изгиб, ударная вязкость и твердость связующей композиции. При этом наибольший прирост ударной вязкости (в 1,7 раза) отмечается для состава с содержанием 6 % никеля, твердости (на 8 HRB) – для состава с содержанием 12 % никеля.

В результате исследований установлено, что введение твердосплавной добавки ВК8 характеризуется повышением твердости связки Fe–Ni–Cu–Sn до 105–111 HRB при относительно низкой ударной вязкости (2,7–3,0 Дж/см<sup>2</sup>) во всем рассматриваемом диапазоне содержания ВК8 (7–21 об. %).

Также показано, что при введении в качестве дополнительных абразивов релита, корунда и карбида кремния фракций 400/250 мкм снижаются прочность и вязкость связки, но в меньшей степени, чем при применении износостойких наполнителей. Так, при использовании корунда твердость композиций с увеличением его объемной доли снижается до 84 HRB (для 7 об. % – 107 HRB), для релита и карбида кремния изменяется в пределах 2–4 HRB.

Результаты испытаний показали, что наилучшие для обработки бетона составы Fe–Ni–Cu–Sn с добавкой ВК8 и корунда в количестве 7 об. %. Аналогичная картина наблюдается и при обработке асфальтобетона.

### Литература

1. Кизиков Э. Д., Верник Е. Б. Алмазно-металлические композиции. – К.: Техника, 1988. – 133 с.
2. Галицкий В. Н. Алмазно-абразивный инструмент на металлических связках для обработки твердого сплава и стали. – К.: Наук. думка, 1986. – 250 с.
3. Методика и устройство для измерения теплопроводности композиционных алмазосодержащих материалов на металлической связке / С. А. Иванов, А. Л. Ветров, А. Л. Майстренко, В. И. Куш // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 2. – С 44–49.
4. Лисовский А. Ф. Миграция расплавов металлов в спеченных композиционных телах. – Киев: Наук. думка, 1984. – 255 с.
5. Лецко А. И. Получение порошка на основе алюминидов железа методом механоактивируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для нанесения газотермических покрытий, стойких к износу и воздействию высокотемпературной коррозии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06; Утв. 27.05. 08 – Минск: Изл-во ГНУ ИПМ, 2008. – 23 с.
6. Тер-Азарян Г. И., Апоян Г. С. Новые методы формирования инструмента из металлоалмазных композиций и их эффективность – Ереван, 1991. – 148 с.

Поступила 06.07.10

УДК 621.921. 34-4.19.004.12:536.4

Т. М. Дудá<sup>1</sup>, канд. техн. наук; А. А. Шульженко<sup>1</sup>, член.-кор. НАН Украины;  
В. Г. Гаргин<sup>1</sup>, канд. техн. наук; В. Н. Ткач<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук; В. В. Шатохин<sup>1</sup>,  
Н. Н. Белявина<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, г. Киев

## СПЕКАНИЕ АЛМАЗНОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В СИСТЕМЕ C<sub>АЛМ.</sub> –Si –Pd

*The influence of rare-earth element activation agent (palladium) on structure deformation and polycrystal composite, syntered in system C-Si is established. The influence of syntered palladium oxide on phase structure and composite's properties is showed.*

### Введение

Успешное развитие техники и ведущих отраслей промышленности неразрывно связано с применением композиционных материалов на основе металло-алмазных гетерогенных структур инструментального назначения. Поликристаллические сверхтвердые материалы (ПСТМ), полученные методом жидкофазного спекания на основе алмазных порошков различной дисперсности, относятся к такой группе композитов и характеризуются высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Изыскание технологических возможностей получения ПСТМ с новыми свойствами является актуальной задачей экспериментальных научных разработок. В реализации таких свойств поликристаллических композиционных материалов, как химическая инертность к обрабатываемому материалу, термостойкость, коррозионная стойкость, теплопроводность, трещиностойкость ведущую роль играют добавки активизирующих веществ.

Известно, что для повышения коррозионной стойкости и теплопроводности используют добавки редкоземельных элементов, таких как палладий и рутений [1].