

УДК 669.025.7:[621.791.3]

## **ВЛИЯНИЕ АБРАЗИВОСОДЕРЖАЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЛАТУНИ**

**М. И. МИХАЙЛОВ, Д. В. НИКИТЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**В. А. КУЗЕМЧЕНКО**

*Республиканское унитарное предприятие «Гомельский  
завод специального инструмента и технологической  
оснастки», Республика Беларусь*

### **Введение**

Пайка твердосплавного инструмента припоями на основе меди обычно обеспечивала необходимую прочность паяного соединения, поэтому долгое время считалось, что технология пайки не требует дальнейшего усовершенствования. Единственной причиной поломок твердосплавных пластин, припаянных к корпусу инструмента, считали недостаточную прочность используемого твердого сплава, однако позже было доказано, что решающую роль в этом играют свойства припоя.

До настоящего времени потери из-за поломок твердосплавных пластин инструмента весьма велики. В среднем 40–50 % металлорежущего инструмента, изготовляемого в соответствии с существующими стандартами, теряется непроизводительно из-за поломок твердого сплава. Из них 10–15 % инструмента идет в брак уже при его изготовлении из-за образования трещин в твердом сплаве и 30–35 % выходит из строя в результате поломок изделий из твердого сплава при эксплуатации [1].

Паяные соединения твердых сплавов со сталями характеризуются как несогласованные, обусловленные резким различием физико-механических свойств соединяемых материалов режущей части и корпуса. Модуль упругости твердых сплавов в 2,5–3 раза выше, чем у стали. Коэффициент линейного расширения приблизительно в два с половиной раза меньше, чем у стали. Сопротивление твердых сплавов разрушению в очень большой степени зависит от схемы напряженного состояния. Сопротивление растяжению составляет всего 0,3 сопротивления сжатию и 0,5–0,7 сопротивления изгибу [2]. Роль связующего звена между твердым сплавом и корпусом инструмента играет припой, от свойств которого и зависит напряженное состояние твердого сплава. Кроме того, припой является частью опорной зоны, обладающим меньшим модулем упругости и пределом текучести, чем стальная державка, что становится существенным под действием сил резания.

Разработано большое количество разнообразных припоев для пайки твердосплавного инструмента, но вопрос качества паяного инструмента остается открытым. Некоторые из припоев, например на основе серебра или биметаллические, позволяют выполнять качественную пайку твердосплавных пластин, но довольно дороги [3], [4].

Целью данного исследования является разработка состава композиционного материала с абразивосодержащим наполнителем, обладающим повышенной прочностью.

### Объекты и методики исследования

В качестве наполнителя использовались металлические частицы (быстрорежущая сталь Р6М5) – 43 %, порошок оксида алюминия  $Al_2O_3$  (смесь  $\alpha$  и  $\gamma - Al_2O_3$ ) – 57 %.

Значительную роль на работоспособность материала оказывают геометрические параметры и форма частиц наполнителя. Геометрия и форма абразивных зерен сложна из-за неправильной формы обломков кристаллов, полученных различными методами дробления. Для анализа таких зерен необходимо экспериментально изучить размеры, форму, геометрию их с целью замены в конечном итоге таких «неопределенных» зерен зернами эквивалентной формы, поддающимися математическому описанию.

Известны следующие случаи допущения [5]: абразивные зерна приводят к форме шара; абразивные зерна заменяют эллипсоидом вращения с постоянным соотношением полуосей; абразивные зерна заменяют эквивалентным кубом либо призмой. Известно также, что абразивные зерна имеют существенно различающиеся длину  $l$ , ширину  $b$  и высоту  $h$  (в среднем 1,4 : 1 : 0,7) [5].

Для определения количества абразивных частиц наполнителя рассчитывается коэффициент заполнения формы  $k$  на основе трех проб массой 10 г. Массу абразивного порошка определяли на аналитических весах с погрешностью 0,0002 г. Коэффициент заполнения формы, подсчитанный по формуле (1) составил 0,27, 0,25, 0,27 при количестве зерен 194, 209, 191 соответственно. Таким образом, зная коэффициент заполнения объема можно определить количество абразивных частиц в паяном шве.

$$k = \frac{P \cdot 10^9}{n \gamma d^3}, \quad (1)$$

где  $n$  – число зерен в пробе массой  $P$  (мг), определяется прямым подсчетом;  $\gamma$  – плотность электрокорунда белого марки 24А,  $\gamma = 3,9 \text{ г/см}^3$  [3];  $d$  – средний размер всей совокупности зерен порошка, мкм.

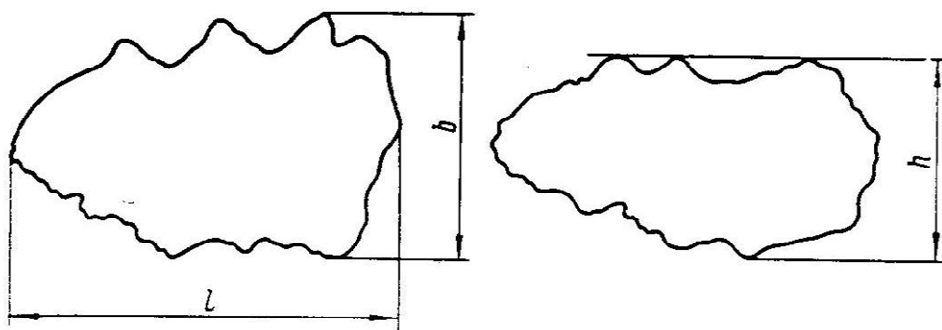


Рис. 1. Схема измерения линейных параметров зерна

### Результаты исследований и их анализ

Результаты измерения ширины, длины и высоты 250 абразивных зерен приведены в табл. 1, они разбиты на шестнадцать диапазонов для построения гистограмм распределения указанных параметров.

Полученные гистограммы исследуемых параметров согласуются с законом нормального распределения, параметры которого приведены в табл. 2.

Таблица 1

Сводная таблица обработки экспериментальных данных по установлению законов распределения параметров абразивных зерен

<i>l, b, h</i>	Значение параметра, мм	Эмпирические частоты	Теоретические частоты	Скорректированные эмпирические частоты	Скорректированные теоретические частоты	Критерий согласия Пирсона
Длина <i>l</i>	0,03	1	3,0	10	7,0	1,26
	0,08	9	4,1			
	0,13	4	7,9	4	7,9	1,94
	0,18	8	13,7	8	13,7	2,34
	0,23	18	20,8	18	20,8	0,37
	0,28	31	28,0	31	28,0	0,33
	0,33	37	33,3	37	33,3	0,41
	0,38	47	35,0	47	35,0	4,11
	0,43	36	32,5	36	32,5	0,37
	0,48	20	26,7	20	26,7	1,70
	0,53	21	19,4	21	19,4	0,13
	0,58	5	12,5	5	12,5	4,48
	0,63	5	7,1	5	7,1	0,61
	0,68	3	3,6	3	3,6	0,09
	0,73	3	1,6	3	1,6	1,29
0,78	2	0,9	2	0,9	1,27	
$\Sigma$	250	250,0	250	250,0	20,69	
Ширина <i>b</i>	0,016	1	4,1	10	8,7	0,19
	0,050	9	4,6			
	0,084	4	8,0	4	8,0	2,02
	0,118	6	12,8	6	12,8	3,64
	0,151	22	18,6	22	18,6	0,63
	0,185	29	24,4	29	24,4	0,88
	0,219	31	29,0	31	29,0	0,14
	0,253	38	31,2	38	31,2	1,47
	0,287	37	30,5	37	30,5	1,40
	0,321	24	26,9	24	26,9	0,32
	0,355	14	21,6	14	21,6	2,67
	0,389	11	15,7	11	15,7	1,40
	0,423	7	10,3	7	10,3	1,07
	0,457	7	6,2	7	6,2	0,12
	0,491	7	3,3	7	3,3	4,07
0,525	3	2,8	3	2,8	0,02	
$\Sigma$	250	250,0	250	250,0	20,03	
Высота <i>h</i>	0,03	4	12,5	17	23,5	1,78
	0,06	13	11,0			
	0,09	18	16,9	18	16,9	0,07
	0,11	27	23,3	27	23,3	0,58
	0,14	39	28,9	39	28,9	3,51
	0,17	40	32,2	40	32,2	1,88
	0,20	26	32,2	26	32,2	1,20
	0,23	23	29,0	23	29,0	1,23
	0,25	20	23,4	20	23,4	0,49
	0,28	12	17,0	12	17,0	1,45
	0,31	13	11,1	13	11,1	0,34

Окончание табл. 1

$l, b, h$	Значение параметра, мм	Эмпирические частоты	Теоретические частоты	Скорректированные эмпирические частоты	Скорректированные теоретические частоты	Критерий согласия Пирсона
Высота $h$	0,34	5	6,5	5	6,5	0,33
	0,37	6	3,4	6	3,4	1,98
	0,39	2	1,6	4	2,7	0,66
	0,42	1	0,7			
	0,45	1	0,4			
	$\Sigma$		250	250,0	250	250,0

Таблица 2

## Эмпирические параметры выборки

Наименование параметра	Высота	Длина	Ширина
Среднее	0,167	0,347	0,244
Стандартная ошибка	0,005	0,008	0,007
Медиана	0,150	0,337	0,243
Мода	0,140	0,332	0,022
Стандартное отклонение	0,079	0,134	0,103
Дисперсия выборки	0,006	0,018	0,011
Эксцесс	0,648	0,653	0,109
Асимметричность	0,993	0,228	0,267
Минимум	0,030	0,028	0,016
Максимум	0,450	0,778	0,524
Уровень надежности (95,0 %)	0,010	0,017	0,013

Кроме того, результаты измерений показали существование корреляционной связи между размерами  $l$ ,  $b$  и  $h$ . Для величин  $b$  и  $l$ ,  $h$  и  $l$  вычислены эмпирические значения коэффициентов корреляции, которые соответственно равны 0,745 и 0,812. Такое численное значение коэффициентов корреляции указывает на тесную связь перечисленных параметров. Обработка данных позволила получить уравнения регрессии, связывающие параметры  $b$  и  $l$ ,  $h$  и  $l$ :

$$b_l = 0,699 \cdot l, \quad h_l = 0,491 \cdot l. \quad (2)$$

Испытание паяных образцов на растяжение производили по методике, изложенной в ГОСТ 28830–90 «Соединения паяные. Методы испытания на растяжение и длительную прочность», с помощью программно-технического комплекса ИР 5143-200. Скорость нагружения паяного образца при испытаниях 1 мм/мин.

Образцы нагружались до полного разрушения паяного соединения. Программно-технический комплекс позволяет выводить графики изменения удлинения образца от силы (рис. 2) и протоколы испытания на компьютер для дальнейшей обработки.

Количество наполнителя варьировали на трех уровнях 5, 10 и 20 % от массы основы припоя. В качестве наполнителя использовали абразивные материалы из электрокорунда белого марок 25А, 23А, 15А с зернистостью 16, 25 и 40.

Для каждого состава припоя изготовили по три образца, таким образом было испытано 36 образцов с абразивосодержащим наполнителем. Еще три образца изготовили из базового припоя без наполнителя для сравнения механических свойств припоев.

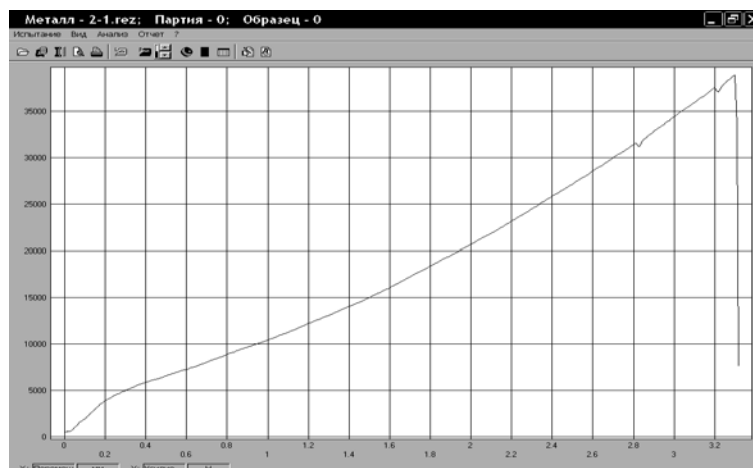


Рис. 2. График зависимости удлинения образца от силы

Результаты испытания паяных соединений на растяжение приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты испытания паяных соединений на растяжение**

Марка материала наполнителя	Номер образца	Содержание наполнителя, %	Разрушающая сила, кН	Средняя разрушающая сила, кН	Напряжение растяжения, МПа		
25A25	10	5	49,0	48,1	280,3		
	11	10	52,0				
	12	20	43,4				
	25A25	13	5	40,9	38,6	224,8	
		14	10	33,4			
		15	20	41,5			
		25A25	16	5	27,4	33,8	196,8
			17	10	40,1		
18			20	33,9			
23A40	19	5	36,9	44,4	258,7		
	20	10	60,9				
	21	20	35,5				
	23A40	22	5	33,6	32,2	187,7	
		23	10	40,8			
		24	20	22,3			
		23A40	25	5	24,7	30,9	179,9
			26	10	44,1		
27			20	23,9			
15A40	28	5	54,9	50,4	293,3		
	29	10	48,3				
	30	20	47,9				
	15A40	31	5	38,9	33,0	192,3	
		32	10	15,8			
		33	20	44,4			

Окончание табл. 3

Марка материала наполнителя	Номер образца	Содержание наполнителя, %	Разрушающая сила, кН	Средняя разрушающая сила, кН	Напряжение растяжения, МПа
15A40	34	5	46,0	28,4	165,2
	35	10	19,5		
	36	20	19,6		
–	37	–	20,0	26,4	153,9
	38		36,4		
	39		22,9		

Средняя прочность паяного соединения при пайке припоём без наполнителя по результатам трех испытаний составляет 153,9 МПа. По результатам испытаний прочности паяных соединений на растяжение построена диаграмма (рис. 3) и графики (рис. 4–6).

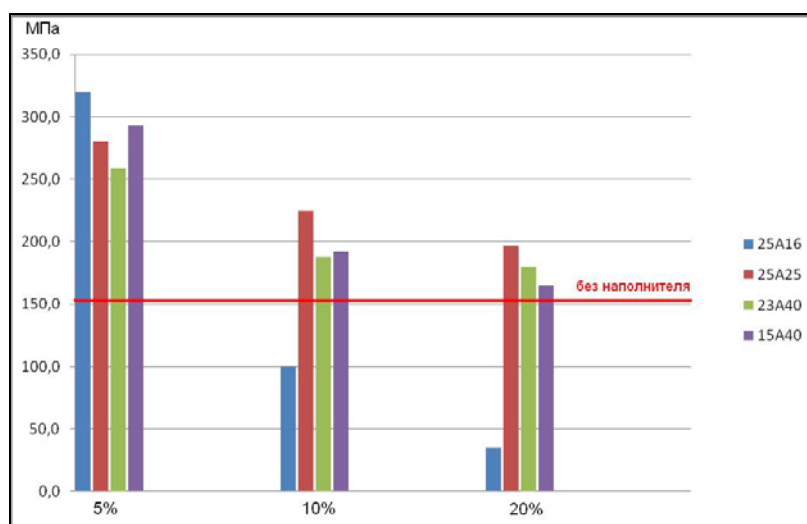


Рис. 3. Диаграмма результатов испытания паяных соединений на растяжение

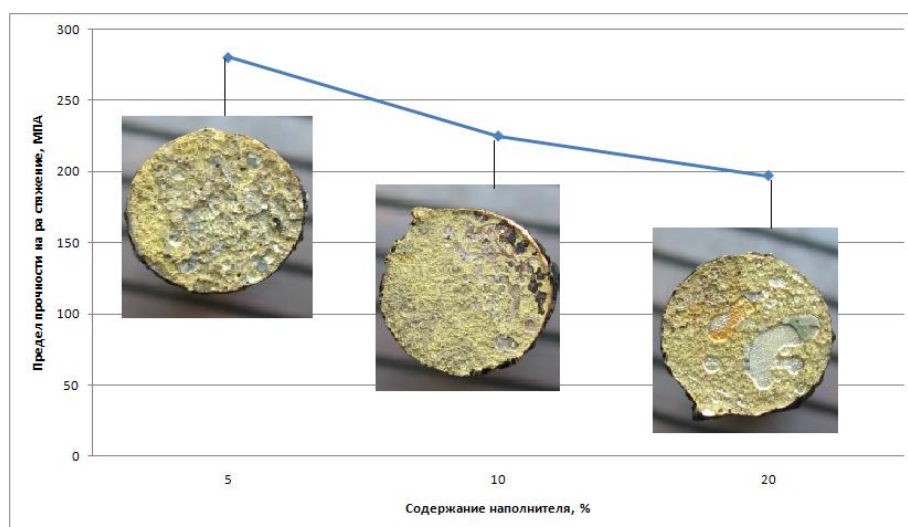


Рис. 4. График зависимости предела прочности при испытании на растяжение от содержания наполнителя марки 25A25

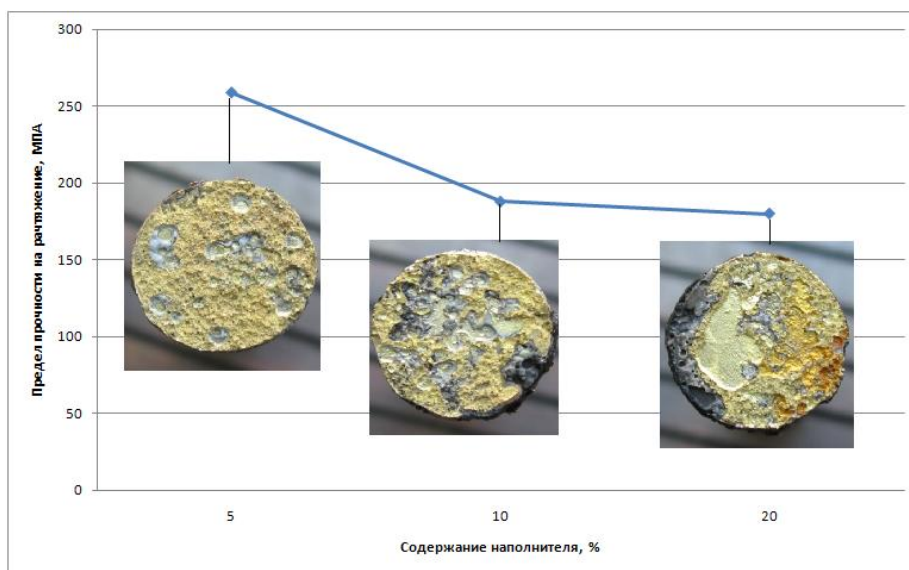


Рис. 5. График зависимости предела прочности при испытании на растяжение от содержания наполнителя марки 23A40

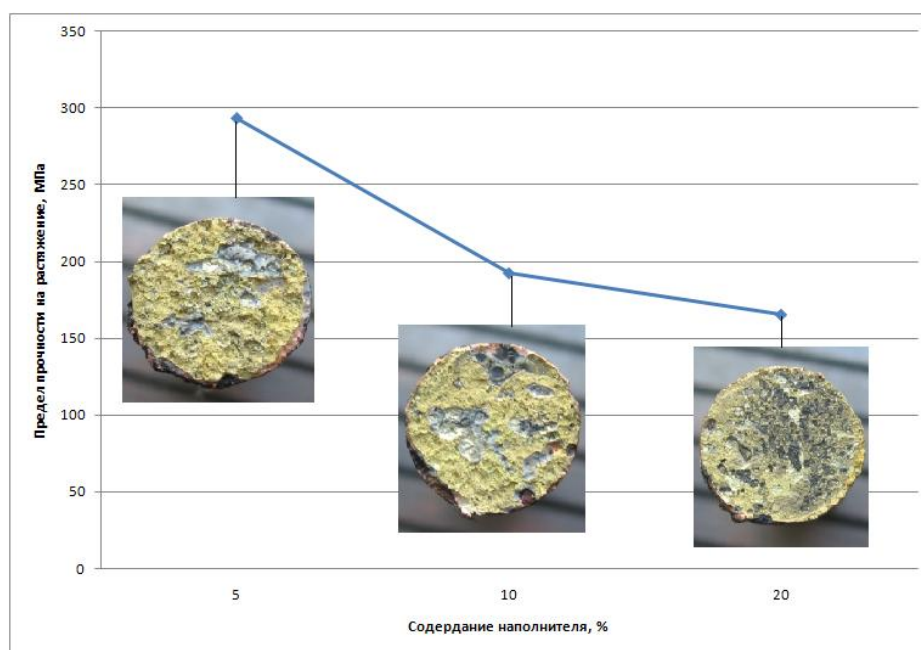


Рис. 6. График зависимости предела прочности при испытании на растяжение от содержания наполнителя марки 15A40

В среднем добавка абразивосодержащего наполнителя повышает прочность паяного соединения. Увеличение содержания наполнителя свыше 5 % разветвляет и увеличивает систему капилляров, не успевающую смачиваться легкоплавкой частью припоя, что приводит к ухудшению паяльных свойств композиционного припоя. Однако снижение прочности при испытании на растяжение происходит нелинейно и даже при содержании наполнителя в 20 % прочность припоя с наполнителем выше чем прочность припоя без наполнителя. На рис. 4–6 показаны графики зависимости предела прочности на растяжение. К каждой точке графика сопоставлен наиболее характерный излом паяных образцов. Анализируя указанные графики можно сделать вывод о том что добавка наполнителя увеличивает прочность припоя наиболее зна-

чительно при его содержании около 5 %. С увеличением содержания наполнителя прочность припоя падает нелинейно и при содержании наполнителя в 10 и 20 % различия в прочности не так велики, как при 5 и 10 %, несмотря на то что площадь паяного шва, занимаемая латуной, значительно меньше. Это позволяет заключить, что при добавке наполнителя образуется новое химическое соединение, кроме того наполнитель влияет на кристаллизацию паяного шва, так как зерна наполнителя являются центрами кристаллизации. Добавка в припой абразивосодержащего наполнителя повышает прочность припоя на растяжение до двух раз.

### **Заключение**

Припой, свойства которого исследовались в данной работе, повышает прочность паяного соединения. Добавка абразивосодержащего наполнителя существенно увеличивает толщину паяного шва и уменьшает деформацию припоя при остывании и эксплуатации паяного соединения. Металлические частицы наполнителя не расплавляются в процессе пайки, а лишь, смачиваясь легкоплавкой частью припоя матрицы, армируют его и образуют при кристаллизации упрочненный каркас, позволяющий повысить динамическую прочность паяного соединения и стойкость паяного инструмента в процессе эксплуатации при повышенных температурах. Однако увеличение содержания наполнителя свыше 5–10 % недопустимо разветвляет и увеличивает систему капилляров, не успевающую смачиваться легкоплавкой частью припоя, что приводит к ухудшению паяльных свойств композиционного припоя. Паяный шов увеличенной толщины в большей степени, чем тонкий, компенсирует разность в коэффициентах линейного расширения стали и твердого сплава, что приводит к уменьшению остаточных паяных напряжений в твердом сплаве.

### **Литература**

1. Ключко, Н. А. Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента / Н. А. Ключко. – М. : Металлургия, 1981. – 200 с.
2. Креймер, Г. С. Прочность твердых сплавов / Г. С. Креймер. – М. : Металлургия, 1971. – 247 с.
3. Brazing of Cemented Carbides // Umicore AG & Co. KG – BrazeTec [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.technicalmaterials.umicore.com/de/bt/Service/downloads/downloads.htm>. – Date of access: 6.06.2011.
4. Filler Metals and Fluxes for Brazing Tungsten Carbide / J. Willingham // Johnson Matthey Metal Joining [Electronic resource]. – 2008. – Mode of access: <http://www.jm-metaljoining.com/technical-pages.asp?parentid=7&sectionid=1>. – Date of access: 6.06.2011.
5. Ящерицын, П. И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. – Минск : Наука и техника, 1972. – 480 с.

*Получено 11.09.2012 г.*