

# Исследование процессов обработки

УДК 621.941

**Н. Е. Стахнив, Л. Н. Девин\*, А. А. Бочечка,  
А. А. Осадчий, С. Н. Назарчук, С. В. Рычев**

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

\**ldevin@ism.kiev.ua*

## **Исследование влияния фазового состава режущих пластин из нанокompозита алмаз– карбид вольфрама на процесс чистового точения сплавов алюминия и латуни**

*Исследовано влияние фазового состава режущих пластин из нанокompозита алмаз–карбид вольфрама на силы резания, коэффициент трения в зоне резания и сигнал акустической эмиссии в процессе чистового точения сплавов алюминия и латуни. Установлено, что содержание вольфрама в исходной смеси в количестве 30–40 % (по массе) обеспечивает спекания композита режущей пластины с наиболее благоприятным для точения сплавов алюминия и латуни фазовым составом.*

**Ключевые слова:** чистовое точение, акустическая эмиссия, сплав алюминия, латунь, режимы обработки, композит алмаз–карбид вольфрама, спекание при высоком давлении.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ**

Один из путей развития машиностроения – улучшение режущих свойств обрабатываемых инструментов. Решение поставленной задачи достигается за счет создания и совершенствования новых инструментальных материалов, применения различных методов упрочнения и оптимальной геометрии режущего инструмента.

Улучшение качества спекания алмазных порошков в поликристаллы сверхтвердых материалов достигается введением в исходную шихту добавок, которые при спекании образуют химические соединения с углеродом и таким образом связывают алмазные частицы. В Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины установлена принципиальная возможность реакционного спекания в условиях высоких давлений и температур нанопорошков алмаза и вольфрама [1]. В результате их взаимодействия при спекании в порах между алмазными наночастицами образуются частицы

карбида вольфрама, химически связанные с алмазными, что усиливает связь зерен полученного композита.

Добавление нанопорошка вольфрама в смесь более крупных алмазных порошков способом, описанным в [1], способствует улучшению физико-механических характеристик образцов спеченного композита по сравнению с образцами, полученными с применением механического смешивания. Образцы с максимальной твердостью имели и максимальную трещиностойкость [2]. Такое сочетание механических характеристик достигается за счет формирования структуры композита, для которой характерно равномерное распределение частиц образованного карбида вольфрама в промежутках между алмазными частицами. Образцы указанных композитов также обладали высокой термостабильностью ( $K_{тс} = 0,86$  при температуре 1100 °С) [3]. Следует заметить, что количество введенного в исходную смесь вольфрама будет влиять на фазовый состав композита спекаемой режущей пластины. А это обстоятельство, в свою очередь, оказывает существенное влияние на физико-механические характеристики и эксплуатационные показатели режущего материала.

Создание режущего материала с наилучшим фазовым составом позволит эффективно применить его для чистовых (финишных) операций при лезвийной обработке при массовом изготовлении деталей из цветных сплавов.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Известно, что введения специальных добавок в инструментальный материал приводит к повышению одних и к снижению других физико-механических характеристик и эксплуатационных показателей режущего инструмента [4, 5].

В режущей пластине из композита алмаз–карбид вольфрама соотношение фаз алмаз–карбид вольфрама зависит от количество вольфрама, введенного в исходную смесь. Как было показано в [6], формирование структуры композита, при которой сохраняется алмазный каркас, а поры максимально заполняются карбидом вольфрама при реакционном спекании, происходит при введении в исходную шихту оптимального количества вольфрама. Об уровне уплотнения композита при различном содержании добавки свидетельствуют зависимости от температуры спекания относительной плотности образцов, спеченных из смесей нанопорошков алмаза и металлического вольфрама различного состава (рис. 1).

Как видно на рис. 1, максимальная плотность достигается при температуре 1800 °С практически для всех исследованных вариантов концентрации вольфрама в исходной смеси, но для концентрации 21 % W\* существенное повышение плотности наблюдается уже при 1400 °С. Недостаточное (10 %), как и чрезмерное (47 %), содержание вольфрама в смеси снижает интенсивность уплотнения алмазного каркаса. Дальнейшее повышение температуры спекания мало меняет плотность композитов, тогда как плотность поликристаллов, спеченных из алмазного нанопорошка без добавки, максимальная при 1800 °С, уменьшается с повышением температуры спекания из-за графитизации (см. рис. 1).

Фазовый состав исследованных в настоящей работе образцов нанокompозита алмаз–карбид вольфрама, спеченных при начальном давлении 8 ГПа и температуре 1800 °С из смесей алмазного нанопорошка статического синтеза

---

\* Здесь и далее концентрация элементов приведена в % (по массе).

АСМ5 0,1/0 с различным количеством порошка металлического вольфрама, представлен в таблице. Основой для определения количества фаз являются данные рентгеновской дифрактометрии.

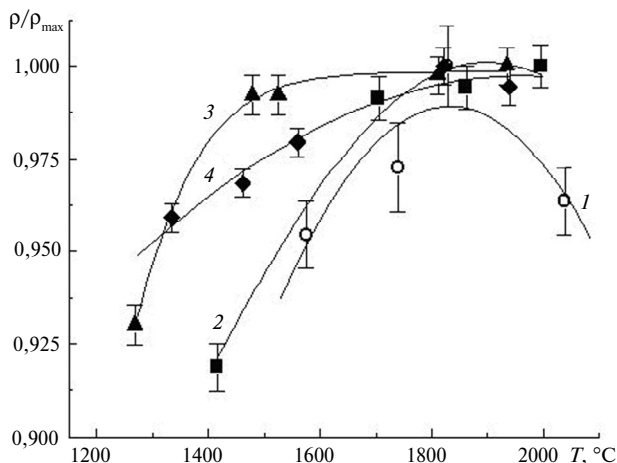


Рис. 1. Зависимости относительной плотности образцов, спеченных из смесей нанопорошков алмаза статического синтеза и металлического вольфрама от температуры спекания при содержании вольфрама в смеси 0 (1), 10 (2), 21 (3) и 47 (4) %.

### Фазовый состав образцов нанокompозита алмаз–карбид вольфрама

Содержание W в исходной смеси, % (по массе)	Содержание фаз							
	алмаз		WC		WO <sub>2</sub>		W	
	% (по массе)	% (мол.)	% (по массе)	% (мол.)	% (по массе)	% (мол.)	% (по массе)	% (мол.)
20	78,6	98,3	19,1	1,5	2,3	0,2	–	–
30	67,9	97,2	28,6	2,5	3,5	0,3	–	–
40	57,2	95,7	38,1	3,9	4,7	0,4	–	–
50	47,0	93,7	42,2	5,1	5,8	0,6	5,0	0,6

Целью настоящей работы было исследование влияния фазового состава режущих пластин из нанокompозитов алмаз–карбид вольфрама на силы резания, коэффициент трения в зоне резания и на сигнал акустической эмиссии (АЭ) при прецизионном точении сплавов алюминия и латуни.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работоспособность резцов из нанокompозита алмаз–карбид вольфрама изучали на автоматизированном стенде, в котором использовали токарный станок с ЧПУ мод. ТПК 125ВМ [7]. Экспериментальные исследования выполняли при чистовом точении образцов диаметром  $d = 60\text{--}65$  мм из латуни Л80 и сплава алюминия АК6. Режущие пластины из нанокompозита алмаз–карбид вольфрама, полученные реакционным спеканием с содержанием вольфрама 20, 30, 40, 50 % в исходной смеси, отличались фазовым составом. В последующем они были доведены по передней поверхности до шероховатости  $Ra = 0,05\text{--}0,08$  мкм. При доводке использовали метод свободного абразива с последовательным применением зерен АСМ 28/20, 20/12, 14/10, 10/7, 5/3 и 3/2. Резцы с механическим креплением круглой режущей пластины диаметром  $7\pm 0,025$  мм имели передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10^\circ$ .

Было выполнено несколько серий экспериментов с глубиной резания  $t$  от 0,1 до 0,3 мм. В каждой серии фиксировали величину подачи  $S = 0,1$  мм/об и дискретно изменяли скорость резания  $v = 1,0, 2,0, 3,0, 4,9, 5,9$  м/с.

Для исследования сил резания и вибраций в процессе чистового точения использовали информационно-измерительную систему исследования процесса резания [7]. Система (рис. 2) состоит из высокоточного токарного станка ТКП-125ВМ с ЧПУ Электроника CNC, динамометра УДМ-100, блока усилителей “Топаз”, акселерометра KD 35a фирмы “Metra Mess und Frequenztechnik” (Германия) с согласующим усилителем, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ADA 1406 фирмы “HOLIT Data Systems” и компьютера IBM.

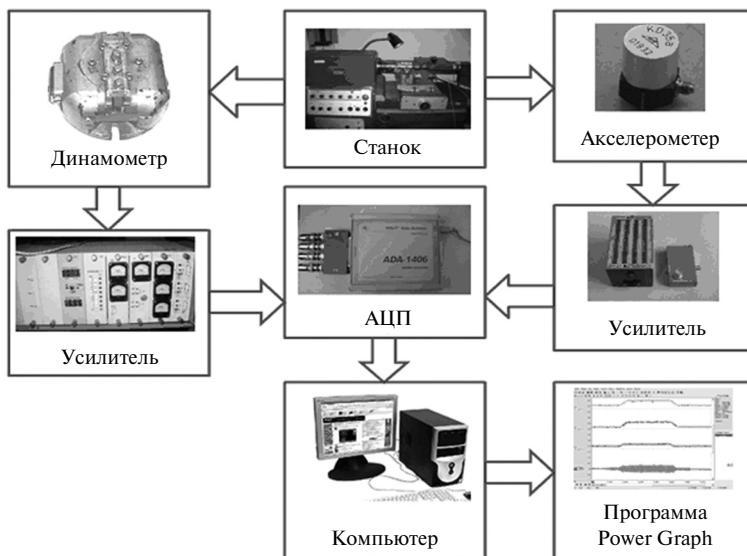


Рис. 2. Блок-схема системы исследования процесса резания.

Составляющие силы резания  $P_x, P_y, P_z$  измеряли с помощью динамометра УДМ-100. Тензометрические датчики динамометра соединены по схеме моста Уитстона и являются частью измерительного усилителя блока “Топаз”. Сигналы, пропорциональные составляющим силы резания, поступали на АЦП. Каждый усилитель снабжен индикатором и переменными резисторами для балансировки моста Уитстона и для настройки уровня сигнала. Рабочий диапазон частот динамометра был 0–100 Гц.

Для измерения вибраций в процессе резания применяли акселерометр KD 35a с рабочим диапазоном частот от 10 до 10000 Гц. Акселерометр закрепляли в направлении составляющей силы резания  $P_z$  в нижней части резца максимально приближенно к зоне резания.

Сигналы от динамометра и акселерометра через усилители поступали на аналого-цифровой преобразователь ADA-1406, который соединяется с компьютером USB-кабелем. Управление АЦП ADA-1406 осуществлялось программой Power Graph. Частота опроса АЦП составляла 50 кГц. Обработка данных включала коррекцию данных (учет дрейфа нуля), статистические расчеты.

Для исследования процессов разрушения, пластического деформирования и трения в зоне резания были измерены сигналы АЭ. Для этого использовали мобильную автоматизированную систему (рис. 3).

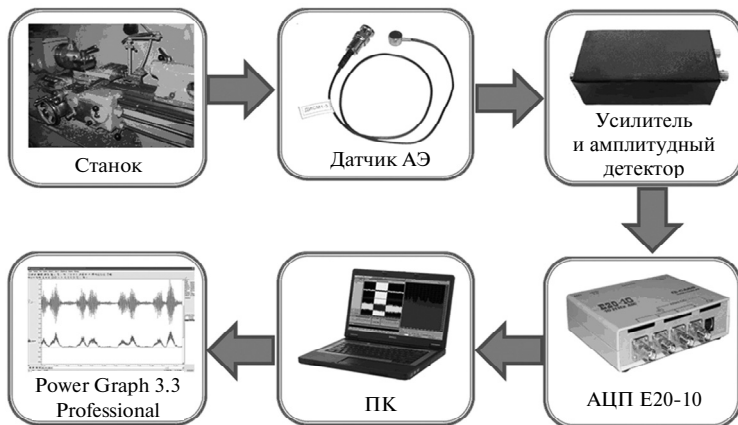


Рис. 3. Блок-схема автоматизированной системы для исследования сигнала АЭ при точении.

Основным элементом разработанной системы является широкополосный датчик АЭ оригинальной конструкции [8], который закрепляли у верхней части резца максимально близко к зоне резания.

Для соединения датчика АЭ с АЦП применяли предварительный усилитель с большим входным сопротивлением и малым выходным. Для записи с помощью компьютера сигнала АЭ в диапазоне от 100 кГц до 1 МГц использовали АЦП с частотой опроса 2 МГц. АЦП с такой частотой опроса весьма дорогие, а размеры файлов с данными эксперимента достигают сотни мегабайт. Поэтому для регистрации пиковых сигналов АЭ применили также амплитудный детектор, который измерял огибающую сигнала АЭ. Далее выходной и детектированный сигналы подавали на быстродействующий АЦП и компьютер. Управление АЦП выполнили программой PowerGraph [9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Получены зависимости средних значений  $R$  и среднеквадратического отклонения (СКО)  $\sigma_R$  равнодействующей силы резания от содержания вольфрама в исходной смеси для получения нанокompозита алмаз–карбид вольфрама при обработке сплава алюминия (рис. 4) и латуни (рис. 5).

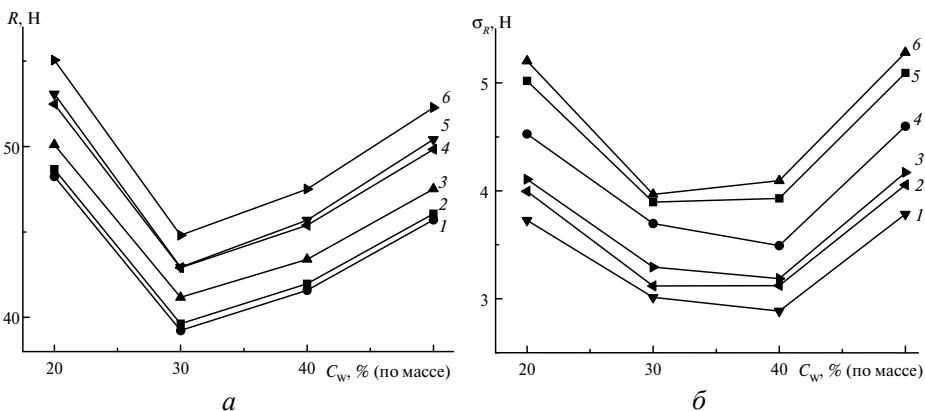


Рис. 4. Изменение средних значений  $R$  (а, б) и СКО  $\sigma_R$  (б, з) равнодействующей силы резания в зависимости от содержания вольфрама в исходной смеси режущей пластины для скоростей резания  $v = 1,0$  (1), 2,0 (2), 3,0 (3), 3,9 (4), 4,9 (5), 5,9 (6) м/с при точении сплава алюминия с глубиной резания  $t = 0,1$  (а, б) и 0,3 (в, з) мм.

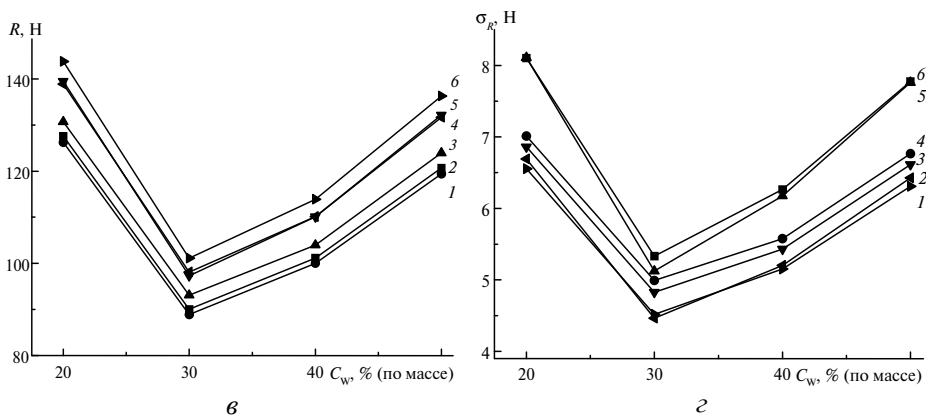


Рис. 4. Продолжение.

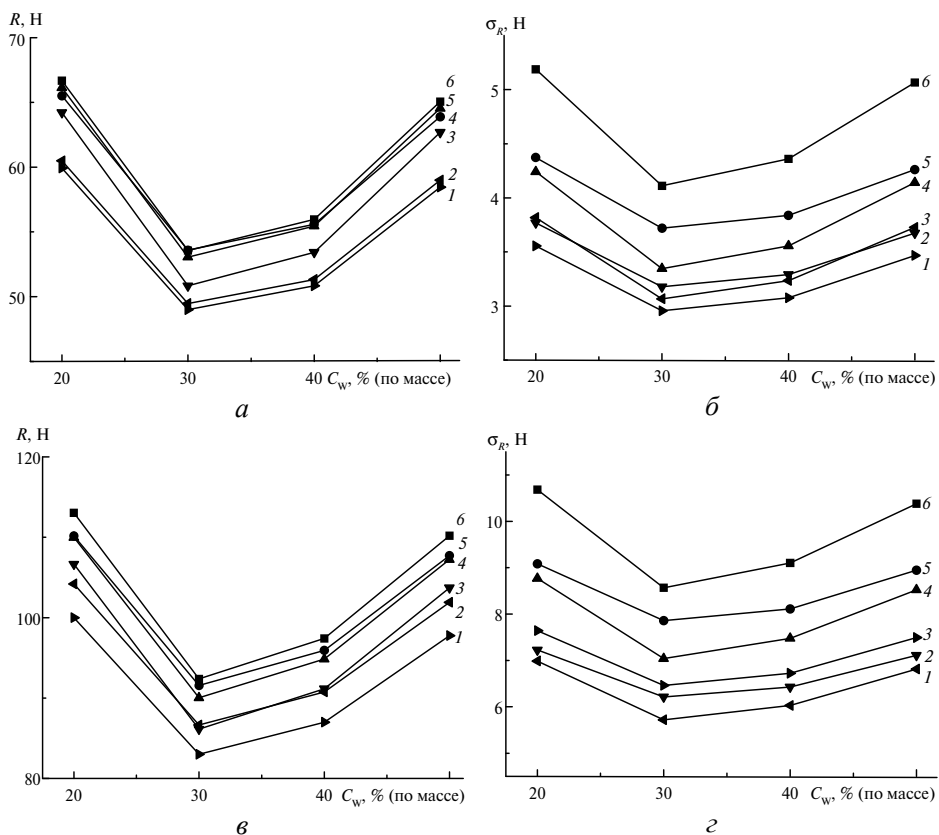


Рис. 5. Изменение средних значений  $R$  (а, в) и СКО  $\sigma_R$  (б, з) равнодействующей силы резания в зависимости от содержания вольфрама в исходной смеси режущей пластины для скоростей резания  $v = 1,0$  (1),  $2,0$  (2),  $3,0$  (3),  $3,9$  (4),  $4,9$  (5),  $5,9$  (6) м/с при точении латуни с глубиной резания  $t = 0,1$  (а, б) и  $0,3$  (в, з) мм.

Как видно на рис. 4, фазовый состав нанокompозита алмаз–карбид вольфрама режущей пластины существенно влияет на силы резания при точении алюминиевого сплава. При глубине резания  $t = 0,1$  мм изменение среднего значения  $R$  равнодействующей силы резания достигает 25 %, а СКО  $\sigma_R$  – 32 %. При глубине резания  $t = 0,3$  мм изменение  $R$  достигает 41 %, а СКО  $\sigma_R$  – 51 %.

Фазовый состав нанокompозита алмаз–карбид вольфрама режущей пластины существенно влияет на силы резания и при точении латуни. При глубине резания  $t = 0,1$  мм изменение среднего значения  $R$  равнодействующей силы резания достигает 24 %, а  $\sigma_R$  – 35 %. При глубине резания  $t = 0,3$  мм изменение  $R$  достигает 21 %, а  $\sigma_R$  – 30 %.

Таким образом, установлено, что при чистовом точении сплавов алюминия и латуни режущими пластинами из композита алмаз–карбид вольфрама с различным (20, 30, 40 и 50 %) содержанием вольфрама в исходной смеси средние значения  $R$  и СКО  $\sigma_R$  равнодействующей силы резания существенно отличались (см. рис. 4 и 5).

Проанализировав результаты исследования можно сделать вывод, что существует оптимальное количества вольфрама в исходной смеси для нанокompозита алмаз–карбид вольфрама, при котором спекаются режущие пластины с фазовым составом, который обеспечивает минимальное значение средних значений  $R$  равнодействующей силы резания. Оптимальное количество вольфрама в исходной шихте для нанокompозитов алмаз–карбид вольфрама составляет 30 %. Следует отметить, что минимальные значения СКО равнодействующей силы резания в большинстве случаев соответствовали режущим пластинам с 30 % W в исходной шихте. Только при точении сплава алюминия с глубиной резания  $t = 0,1$  мм и при скоростях  $v = 1,0, 3,0, 3,9$  м/с (см. рис. 3, б), минимальные значение СКО равнодействующей сил резания соответствовали режущим пластинам с 40 % W в исходной шихте. Причем разница СКО сил резания для режущих пластин с 30 и 40 % W меньше погрешности измерения (5 %). Учитывая вышесказанное, оптимального содержания вольфрама в исходной шихте соответствует 30 %, однако также неплохие результаты были получены при использовании режущих пластин с композитом, содержащим 40 % W.

Содержание вольфрама больше 40 % или меньше 30 % приводит к существенному увеличению среднего значения и СКО равнодействующей силы резания, что указывает на ухудшении процесса формообразования в зоне обработки. Изменение силы резания в зависимости от фазового состава указывает на то, что в зоне резания существенно изменялись условия разрушения, пластического деформирования и трения обрабатываемого материала с резцом. В соответствии с методикой [10, 11] был определен коэффициент трения по задней поверхности резца в зависимости от содержания вольфрама при чистовом точении.

Рассмотрим расчет коэффициента трения на примере чистового точения латуни резцом из нанокompозита алмаз–карбид вольфрама с содержанием вольфрама в исходной шихте 50 % при скорости резания  $v = 5,9$  м/с, подаче  $S = 0,1$  мм/об и глубинах резания  $t = 0,1–0,3$  мм. В соответствии с методикой [10, 11] использовали значения составляющих сил резания  $P_x, P_y, P_z$  при различных глубинах резания  $t$ . По значениям сил  $P_x$  и  $P_y$  находили  $R_{xy}$ :

$$R_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}.$$

Затем строили зависимости сил  $P_z$  и  $R_{xy}$  от глубины резания  $t$  (рис. 6), которые представляли собой прямые линии. Экстраполируя эти прямые на нулевую глубину резания, получали на осях отрезки, равные силам на задней поверхности при нулевой глубине резания  $F$  и  $N$ . Сила  $F$  соответствуют силе трения при нормальной нагрузке  $N$ . Коэффициент трения определяется зависимостью  $\mu = \frac{F}{N}$ .

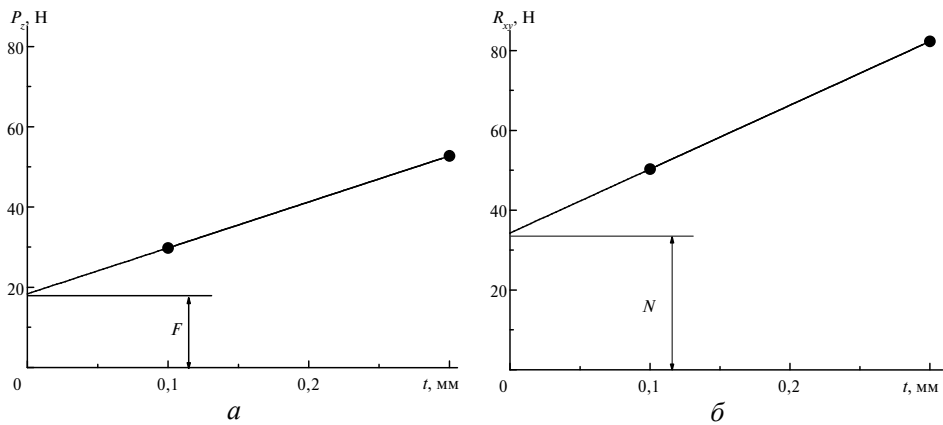


Рис. 6. Экстраполяция силовых зависимостей на нулевую глубину резания при определении силы трения  $F$  (а) и нормальной нагрузки  $N$  (б).

На рис. 7 приведены изменение коэффициента трения  $\mu$  по задней поверхности резца при чистовом точении сплава алюминия и латуни в зависимости от содержания вольфрама в исходной шихте.

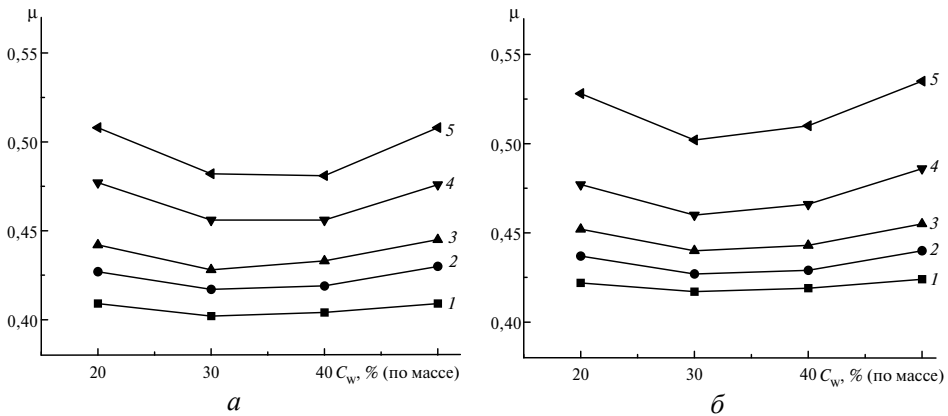


Рис. 7. Изменение коэффициента трения  $\mu$  при чистовом точении сплава алюминия (а) и латуни (б) в зависимости от содержания вольфрама в исходной смеси режущей пластины;  $v = 1,0$  (1),  $2,0$  (2),  $3,9$  (3),  $4,9$  (4),  $5,9$  (5) м/с.

Видно, что фазовый состав влияет на коэффициент трения  $\mu$ . Для режущей пластины, которой соответствовало содержанию вольфрама 30 %, коэффициент трения по задней поверхности резца был минимальным. Для подтверждения обнаруженного эффекта дополнительно исследовали сигналы АЭ из зоны резания. Как показано в [12], сигнал АЭ зависит от условий разрушения, пластического деформирования и трения в зоне резания.

Получены значения СКО сигнала АЭ до и после пикового детектора в зависимости от скорости резания и содержания вольфрама в композите алмаз-карбид вольфрама при обработке сплава алюминия (рис. 8) и латуни (рис. 9).

Установлено, что при чистовом точении сплавов алюминия и латуни режущими пластинами из композита алмаз-карбид вольфрама с разным фазовым составом амплитуды сигнала АЭ до и после пикового детектора существенно отличались (см. рис. 8 и 9).

Проанализировав результаты исследования (см. рис. 8 и 9), можно сделать вывод, что существует оптимальное количество вольфрама в исходной ших-



те, которое при спекании обеспечивает наилучший фазовый состав нанокompозита алмаз–карбид вольфрама для использования в режущих пластинах.

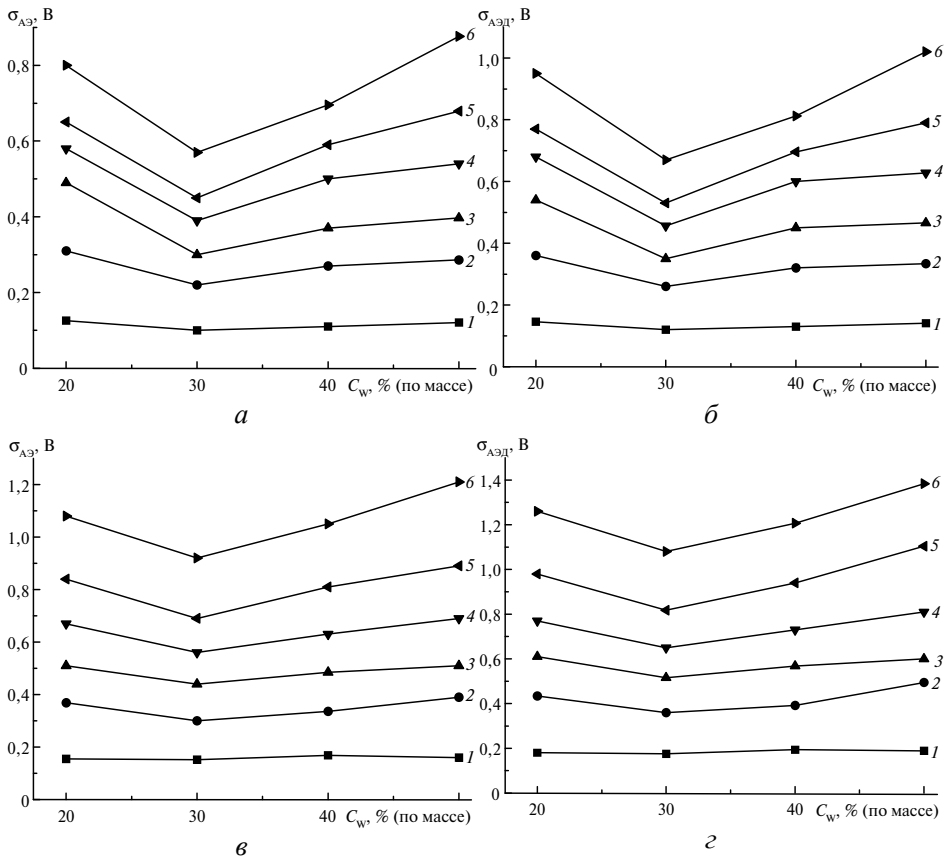


Рис. 8. Изменение СКО сигнала АЭ до (*а, в*) и после (*б, г*) пикового детектора от содержания вольфрама в исходной смеси режущей пластины при точении алюминиевого сплава с глубиной резания  $t = 0,1$  (*а, б*),  $0,3$  (*в, г*) мм;  $v = 1,0$  (*1*),  $2,0$  (*2*),  $3,0$  (*3*),  $3,9$  (*4*),  $4,9$  (*5*),  $5,9$  (*6*) м/с.

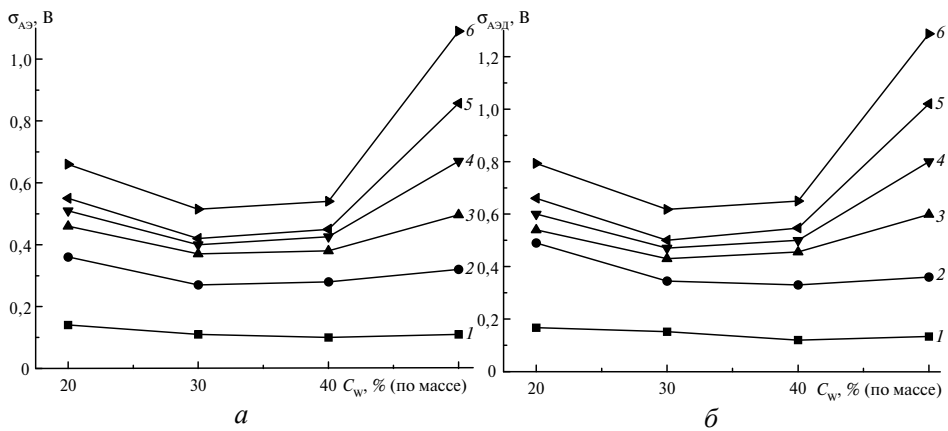


Рис. 9. Изменение СКО сигнала АЭ до (*а, в*) и после (*б, г*) пикового детектора от содержания вольфрама в исходной смеси режущей пластины при точении латуни с глубиной резания  $t = 0,1$  (*а, б*) и  $0,3$  (*в, г*) мм;  $v = 1,0$  (*1*),  $2,0$  (*2*),  $3,0$  (*3*),  $3,9$  (*4*),  $4,9$  (*5*),  $5,9$  (*6*) м/с.

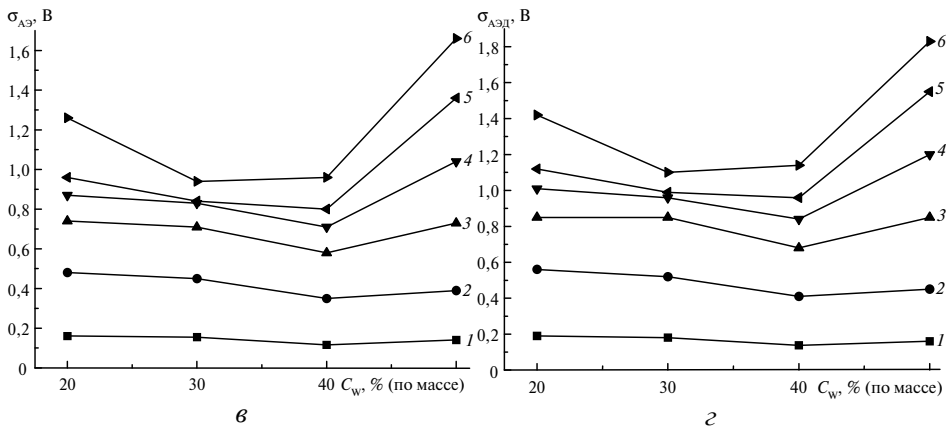


Рис. 9. Продолжение.

Анализ зависимостей на рис. 8 показывает, что при точении сплавов алюминия сигналы АЭ до и после пикового детектора имеют минимальные значения при использовании режущих пластин из нанокompозита алмаз–карбид вольфрама, полученных спеканием исходной смеси с 30 % W, независимо от глубины и скорости резания. При точении латуни (см. рис. 9) сигналы АЭ до и после пикового детектора имеют минимальные значения при 30–40 % вольфрама в исходной смеси и зависят от глубины и скорости резания.

Содержание вольфрама больше 40 % или меньше 30 % приводит к существенному увеличению амплитуды сигнала АЭ, что указывает на ухудшении процесса формообразования в зоне обработки.

Обобщение результатов, полученных при исследовании сил резания и сигнала АЭ, показывает, что оптимальное количество вольфрама в исходной смеси составляет 30 %.

## ВЫВОДЫ

В режущей пластине из нанокompозита алмаз–карбид вольфрама соотношение фаз зависит от количества вольфрама, введенного в исходную смесь, и оказывает влияние на средние значения и СКО равнодействующей силы резания.

В зависимости от соотношения фаз нанокompозита алмаз–карбид вольфрама, используемого для режущей пластины, изменяются условия резания в зоне контакта инструмента и детали, о чем свидетельствуют изменения коэффициента трения и сигнала АЭ.

Средние значения и СКО силы резания, коэффициент трения и сигнал АЭ будут минимальны для режущих пластин из нанокompозита алмаз–карбид вольфрама, полученного при реакционном спекании исходной шихты с добавлением 30 % вольфрама (для обработки сплава алюминия) и 30–40 % вольфрама (для обработки латуни).

*Досліджено вплив фазового складу ріжучих пластин з нанокompозиту алмаз–карбід вольфраму на сили різання, коефіцієнт тертя в зоні різання і сигнал акустичної емісії в процесі чистового точіння сплавів алюмінію і латуні. Встановлено, що вміст вольфраму в вихідній суміші у кількості 30–40 % (за масою) забезпечує спікання композиту ріжучої пластини з найбільш сприятливим для точіння сплавів алюмінію і латуні фазовим складом.*

**Ключові слова:** чистове точіння, акустична емісія, сплав алюмінію, латунь, режими обробки, композит алмаз–карбід вольфраму, спікання при високому тиску.

*The results of the investigation of the effect of the phase composition of cutting inserts from the nanocomposite diamond–tungsten carbide on cutting forces, the friction coefficient in the cutting zone, and the acoustic emission signal during the finish turning of aluminum and brass alloys are presented. It was established that 30–40 % of tungsten content in the initial mixture provides sintering of the composite of the cutting insert with the most favorable phase composition for turning aluminum and brass alloys.*

**Keywords:** finish turning, acoustic emission, aluminum alloy, brass, tungsten carbide diamond composite, high pressure sintering.

1. Пат. на винахід 93803 Україна, МПК В24D 3/02, В22F 3/14. Спосіб отримання алмазного композиційного матеріалу / М. В. Новіков, О. О. Бочечка, С. М. Назарчук, В. С. Гаврилова, Г. С. Олейник, Л. О. Романко, І. А. Свешніков, С. Д. Заболотний. – Заявл. 30.12.09; Опубл. 10.03.11, Бюл. № 5.
2. Назарчук С. Н., Бочечка А. А., Гаврилова В. С., Романко Л. А., Белявина Н. Н., Александрова Л. И., Ткач В. Н., Кузьменко Е. Ф., Заболотный С. Д. Поликристаллический композиционный материал алмаз–карбид вольфрама // Сверхтв. материалы. – 2011. – № 1. – С. 3–17.
3. Бочечка О. О., Свешніков І. А., Назарчук С. М., Заболотний С. Д., Гаврилова В. С., Боженко В. М., Луцак Е. М., Романко Л. О., Ільницька Г. Д., Смекаленков С. В. Алмазний полікристалічний композиційний матеріал алмаз–карбід вольфраму для бурового інструменту // Інструментальний світ. – 2011. – № 1–2. – С. 50–52.
4. Васин С. А. Верецака А. С. Кушнер В. С. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. для техн. вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.
5. Даниленко Б. Д., Студенников Г. В., Фоматов В. Т. Материалы режущих инструментов: Учеб. пос. – Курган: Изд-во КГУ, 1999. – 70 с.
6. Nazarchuk S., Bochechka O., Gierlotka S., Dziecielewski I., Gadzyra M. Diamond-tungsten carbide nanocomposite // Nano and Advanced Materials Workshop and Fair NAMF 2013, Warsaw, Poland, 16–19 Sept., 2013: Book abstr. – P. 39–40.
7. Девин Л. Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. – К.: Наук. думка, 1992. – 131 с.
8. Девин Л. Н., Новиков Н. В. Широкополосные датчики акустической эмиссии для диагностики состояния режущих инструментов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 81–85.
9. Девин Л. Н., Сулима А. Г. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания // Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПиКАД). – 2008. – № 3. – С. 24–26.
10. Розенберг А. М. Еремин А. Н. Элементы теории процесса резания металлов. – М.–Свердловск: Машгиз, 1956. – 319 с.
11. Розенберг Ю. А. Резание материалов: Учеб. для техн. вузов. – Курган: Изд-во ОАО “Полиграфический комбинат “Зауралье”, 2007. – 294 с.
12. Подураев В. Н. Барзов А. А. Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.

Поступила 14.03.17