

УДК 666.233

**А. В. Ножкина**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, **В. И. Костиков**<sup>2</sup>, член-корр. РАН, **В. Б. Дудаков**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента» (ВНИИАЛМАЗ), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный институт стали и сплавов (МИСиС), Россия

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ**

*В результате анализа теоретических и экспериментальных исследований сделаны выводы относительно характера разрушения алмаза при обработке различных материалов.*

**Ключевые слова:** алмаз, механическая обработка, адгезионный износ, графитизация, карбидообразующий металл

Алмаз занимает особое место в ряду инструментальных материалов. Выдающиеся физико-механические свойства алмаза делают его незаменимым при обработке сверхтвердых материалов. Однако есть материалы, при обработке которых алмаз быстро теряет свои свойства, хотя их твердость во много раз меньше, чем у алмаза. Понять причину такого поведения алмаза пытались многие исследователи. Несмотря на многообразие концепций износа, фактически существует две точки зрения – теория механического разрушения и теория химического разрушения.

По мнению Толковского [1] алмазные кристаллы изнашиваются в результате механических сколов частиц. Причем интенсивность скола частиц пропорциональна нагрузке на алмаз и скорости перемещения обрабатываемого образца. Уилксы [2] развили эти представления и обнаружили, что сопротивляемость разрушению меняется в зависимости от направления скольжения алмаза по обрабатываемому материалу. По мнению авторов, такая зависимость возникает от различия в сопротивляемости сколу поверхностных частиц (микроплоскостей) вследствие особенностей геометрического расположения их на гранях кристалла. Сил [3], напротив, полагал, что износ может иметь место с одинаковым успехом при любом направлении. Причину износа автор усматривал в возникновении локальных температур, достаточных для графитизации. Боуден и Скотт [4] провели исследование износа алмаза при полировании стекла и установили, что износ алмаза не является абразивным. Был обнаружен графит. Авторы считают, что разрушение алмаза вызвано термическим окислением, приводящим к появлению аморфного слоя углерода и последующей его графитизацией. Однако многие последователи полагают, что износ алмаза в процессе шлифования и полирования определяется химическими реакциями в зоне контакта алмазного инструмента с обрабатываемым материалом [3–7].

Лоладзе Т. Н. и Бокучавой Г. В. [8, 9] изучен характер износа алмаза при шлифовании железа и железистых сплавов, W, Mo, Ti, Zn, Ta, Nb и других металлов. Авторы [8, 9] полагали, что износ алмазного инструмента при обработке различных материалов происходит главным образом из-за:

- 1) диффузионного растворения углерода алмаза в обрабатываемом материале (диффузионный износ);
- 2) адгезии и среза микрочастиц алмаза (адгезионный износ);
- 3) комбинированного износа (диффузионный и адгезионный), разрушения поверхностных слоев алмаза на отдельные блоки.

Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В. первыми в нашей стране заявили о химической природе износа алмазных инструментов, но они не учли метастабильность алмаза.

Впервые влияние метастабильности алмаза на процесс химического взаимодействия его со средой обнаружили Эванс и Фаал [10] при изучении окисления алмаза при нагреве его в вакуумной камере при парциальном давлении кислорода 533 Па. Авторами [10] показано, что процесс взаимодействия алмаза с кислородом проходит через стадию каталитического превращения алмаза в графит. Появление пленки аморфного углерода или графита определяется соотношением скоростей реакций аморфизации алмаза (R1) и реакцией окисления (R2) аморфного углерода или графита. При  $R1 > R2$  на поверхности алмаза появляется аморфный углерод (графит) поверхность алмаза темнеет. При  $R1 \leq R2$  на поверхности алмаза нет аморфного углерода или графита, алмаз остается светлым. Причем, в процессе химического взаимодействия четко проявляется анизотропия алмаза. При всех температурах, начиная с 650 °С плоскость алмаза (100) имеет слой графита меньший, чем плоскости (110) и (111). Интересно отметить, что величина свободной поверхностной энергии плоскости алмаза  $\sigma(100) > \sigma(110) > \sigma(111)$  (соответственно 9100 мДж/м<sup>2</sup>, 6500 мДж/м<sup>2</sup> и 5270 мДж/м<sup>2</sup>), т. е. чем больше величина поверхностной энергии плоскости алмаза, тем меньше скорость графитизации, что хорошо согласуется с данными по химическому травлению дефектных алмазов. По данным Эванса и Фаала. [10] энергия активации для процесса графитизации изменялась в пределах 44–55 ккал/моль.

Следует отметить, что в работе [11] показано, что при давлении 1,8 ГПа кристаллы алмаза, помещенные в графитовые образцы, не имеют следов графитизации при нагреве до 3800 К несмотря на то, что указанные режимы эксперимента соответствуют области метастабильности алмаза. Энергия активации процесса графитизации алмаза под действием температуры в инертной по отношению к углероду среде имеет величину порядка 114 ккал/моль. На основании многочисленных экспериментальных данных, полученных нами [12, 16] при изучении взаимодействия природных монокристаллов с тугоплавкими металлами, было впервые показано, что, подобно кислороду, на графитизацию алмаза оказывает влияние любая химически взаимодействующая с алмазом среда, в частности химически активные по отношению к углероду металлы такие как: Mn, Cr, Fe, Co, Ni, под действием которых свободная поверхностная энергия алмаза уменьшается [13, 14] (табл. 1.).

Таблица 1. Влияние металлов на графитизацию алмазов

Контактирующий металл	Межфазная энергия $\sigma_{Т-ж}$ , мДж/м <sup>2</sup>	Энергия связи $Q_{с-с(м)}$ , ккал/моль	Энергия графитизации $Q_{ГФ}$ , ккал/моль
Железо	7786	73,44	102,8
Кобальт	8155	76,16	106,6
Никель	8377	78,2	109,4
Титан	7700	71,9	100,6
Хром	7510	70,12	98,2
Кремний	8380	78,2	109,4
Марганец	8070	75,3	105,6
Алмаз	9100	85,0	114,3

Взаимодействие алмаза с переходными карбидообразующими непереходными металлами, в области его метастабильности проходит через стадию каталитического фазового превращения алмаза в графит (см. рис. 1, табл.1, 2) [12, 15, 16, 20].



Рис. 1. Графитизация алмаза и растворение алмазного углерода в железе при нагреве в вакууме при 1150 °С

Таблица 2. Влияние металла в присутствии кислорода на графитизацию алмаза

Металл	Si	Ti	Cr	W	Mn	Ni
Энергия активации графитизации, ккал/моль	40	22	17	20	13	26
Энергия активации диффузии углерода в MeC ккал/моль	92	37	36,7	96	-	-

Экспериментально также установлено [15], что на скорость графитизации алмаза при его взаимодействии с металлами большое влияние оказывает кислород. Энергия активации графитизации алмаза в контакте с Me и O<sub>2</sub> в этом случае оказывается существенно меньше (40–13 ккал/моль) (табл. 2), по сравнению с энергией активации процесса графитизации под действием кислорода (44–55 ккал/моль) и металла (100–109 ккал/моль) в отдельности (табл. 1).

Учитывая установленное нами экспериментально резкое увеличение каталитической активности переходных металлов в присутствии кислорода на процесс фазового превращения алмаза в графит [15] можно полагать, что износ алмазных резцов при течении черных металлов обусловлен главным образом, быстрым истиранием алмаза вследствие фазового превращения в контакте с обрабатываемым материалом. Поэтому диффузия углерода в обрабатываемый материал является вторичным процессом и не определяет износ резца. Подтверждением этой точки зрения служат полученные нами ранее во ВНИИАлмазе результаты исследования износа алмазных резцов при течении армко железа. [7] на токарном станке мод.1В616. Режимы течения приведены в табл. 3.

Таблица 3. Режимы алмазного течения и износ алмазных резцов (опытный и расчетный)

$\tau_1$ , мин	$n_1$ , об/мин	$S_{\text{прод.}}$ , мм/об	$S_{\text{поп.}}$ , мм/об	$q \cdot 10^3$ , мм <sup>2</sup>	$\Delta m \cdot 10^8$ г	Потеря алмаза $\Delta m_{\text{расч.}} \cdot 10^8$ , г					
						Температура на режущей кромке алмаза, °С.					
						600	700	800	900	1000	1100
1	1250	0,01	0,01	2,6	7,7	0,2	0,16	0,48	0,9	1,2	2,6
				2,0	6,8	0,15	0,12	0,32	0,69	0,94	2,02
				2,67	10,1	0,26	0,17	0,42	0,93	1,26	2,7
1	1000	0,01	0,01	1,15	3,54	0,09	0,07	0,18	0,4	0,54	1,16
				0,9	2,95	0,07	0,057	0,15	0,3	0,42	0,9
				1,0	3,24	0,08	0,06	0,16	0,34	0,47	1,0

Для определения характера и интенсивности износа были сфотографированы плоскости износа под микроскопом (рис. 2).

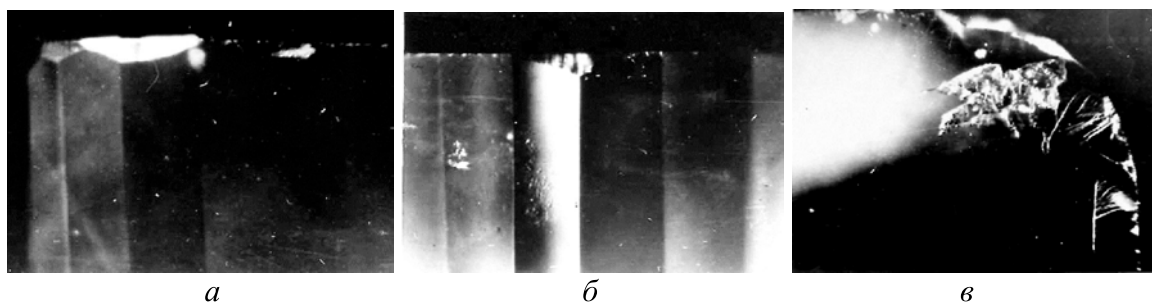


Рис. 2. Износ алмазного резца при точении армко-железа: а – время обработки 5 мин; б – износ по задней грани; в – износ по передней грани

По фотографиям измерялись размеры изношенной площадки ( $q$ ) и подсчитывались уменьшение объема и массы ( $\Delta m_{\text{расч}}$ ) алмазного резца по формуле:

$$\Delta m_{\text{расч}} = V \cdot \rho$$

где:  $\Delta m_{\text{расч}}$  – потеря массы алмаза, г;  $V$  – объем алмаза, мм<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность алмаза, равная 3,54 г/см<sup>3</sup>.

Площадки износа резца при равных режимах и времени работы имеют близкие величины. Рассмотрение плоскости износа алмазного резца под микроскопом указывает на химический характер разрушения, так как поверхности износа резца и плоскости контакта алмаза с армко-железом после отжига в вакууме аналогичны. Разрушение резца, характерное для исследуемых скоростей резания, не сопровождается сколами и вырывами, которые возникают в случае, если высота площадки износа по задней поверхности достигает размера, близкого к 0,1 мм (рис. 2.). На основании опытных результатов по твердофазному растворению алмаза в армко-железе при различных температурах нагрева в вакууме [5] было рассчитано количество углерода, продиффундировавшего из алмаза в обрабатываемый материал через фиксированную плоскость. Результаты экспериментальных и расчетных потерь массы алмаза приведены в табл. 4.

Таблица 4. Содержание углерода в поверхностном слое обрабатываемого металла

Материал	Обработка	C, %
1 Железо-армко	выглаживание	0,3
2 Железо °	исходное	нет
3 Железо в Ag	выглаживание	0,2
1 Сталь	выглаживание	0,34
2 Сталь °	исходное	0,22
1 Титан	исходное	0,19
2 Титан в Ag	выглаживание	0,22
3 Титан	выглаживание	0,48

Сравнение экспериментальных данных с расчетными показывает, что даже при допущении, что температура на режущей кромке во время процесса составляет 1100 °С, износ алмазного резца более чем в три раза выше расчетного. Большую величину фактического износа алмазного резца по сравнению с расчетной можно объяснить прежде всего тем, что скорость процесса разрушения алмазного кристалла определяется скоростью фазового превращения алмаза в аморфный углерод или графит под действием железа и кислорода (R1) превышающей скорость диффузии углерода в железе (R2).

Растворение алмаза в обрабатываемом материале исследовали также для процесса выглаживания алмазным монокристаллом железа, стали, меди и титана. Выглаживание проводили по методике, отличной от стандартной. Для получения точных результатов

анализа анализируемые образцы должны быть плоскими. Поэтому выглаживание проводили не по образующей цилиндра, а по его торцу. Процесс проводили без смазочно-охлаждающих жидкостей. До проведения выглаживания образцы Fe, Ti и Cu анализировали с помощью микроанализатора с целью определения содержания в них углерода. Методика анализа стандартная. Эталонным образцом для определения углерода являлся алмаз с содержанием примесей ниже  $10^{-4}$  масс. %.

После проведения процесса выглаживания в течение 2-х часов из обработанных металлов вырезали образцы, размером  $10 \times 10 \times 8$  см и проводили анализ выглаженного участка с целью определения содержания в нем углерода. Результаты определения углерода в железе, меди и титане до и после выглаживания представлены в таблице.

Анализ полученных данных показывает, что после обработки алмазным индентором железа, стали и титана содержание углерода в обрабатываемом материале увеличивается. Причем для железа это увеличение выше, чем для титана на 0,3 и 0,27% (вес.) соответственно. Содержание углерода в стали после обработки увеличилось на 0,12% (вес.), т.е. увеличение меньше, чем у железа и титана. Этого следовало ожидать, так как исходное армо-железо не содержит углерода, а сталь – содержит 0,22% (вес.) углерода, следовательно для процесса растворения углерода в железе и стали  $\Delta \rho_{\text{с}}$  для железа  $>$   $\Delta \rho_{\text{с}}$  стали. Экспериментально установлено, что углерод в меди отсутствует до и после обработки.

Удаление кислорода из зоны обработки путем обработки в аргоне уменьшает скорость графитизации алмаза и, как следствие этого, диффузию углерода в железо.

Экспериментальные исследования взаимодействия алмаза с жидкими металлами, показали, что адгезия алмаза с некарбидообразующими металлами (медь, серебро, золото, олово, германий и др.) мала (примерно  $100\text{--}140$  эрг/см<sup>2</sup>) и не может быть причиной адгезионного разрушения кристалла алмаза. Адгезия алмаза с карбидообразующими металлами (железо, кобальт, никель, титан, цирконий, хром, ванадий, марганец и др.) значительно выше (примерно  $1500\text{--}3500$  эрг/см<sup>2</sup>) и может вызывать значительное разрушение инструмента. Следует отметить, что снижение межфазной энергии алмаза, характерное для процессов его взаимодействия с карбидообразующими металлами, приводит, в соответствии с теорией Гриффитса [18], к снижению прочности алмаза и износостойкости инструмента. Мерой склонности алмазного инструмента к адгезионному разрушению служит величина:

$$\varphi = \frac{W_{\text{адг}}}{\sigma_{\text{т-ж}}},$$

где  $W_{\text{адг}}$  – работа адгезии, мДж/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{\text{т-ж}}$  – поверхностная энергия алмаза на границе с металлом, мДж/м<sup>2</sup>.

При  $\varphi < 1$  адгезионного износа не наблюдается, при  $\varphi > 1$  происходит адгезионное разрушение алмазного кристалла. Следует отметить, что надежные методы экспериментального определения межфазной энергии в литературе отсутствуют. Наиболее распространенным до сих пор методом определения межфазной энергии являлся расчет этой величины из условий равновесия системы твердое тело – жидкая капля (уравнение Дюпре)

$$\sigma_{\text{т-ж}} = \sigma_{\text{т-г}} + \sigma_{\text{ж-г}} - W_{\text{адг}}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{адг}}$  – работа адгезии жидкости с твердой фазой, мДж/м<sup>2</sup>.

Рассчитанная таким образом межфазная энергия характеризует поверхностную энергию твердого тела на границе с жидким металлом в условиях истинного равновесия или псевдоравновесия. Эта величина является статической и характеризует только конечное состояние системы в определенный момент, и, взятая отдельно, не отражает динамики процесса. Расчеты показывают, что  $\sigma_{\text{т-ж}}$  статически изменяется в зависимости от

интенсивности химической реакции на границах раздела фаз. Гуменком М., Уэйленом Т. Дж. [19] показано, что  $\sigma_{т-ж}$  в системах «графит–железо» увеличивается с 400 до 2400 мДж/м<sup>2</sup> с ростом концентрации углерода в железе от 0 до 4,3%. Причины изменения межфазной энергии в указанных системах, по мнению авторов, заключается в диффузии. В том случае, когда жидкость находится в контакте с твердым телом, заметно растворяющимся в ней, на поверхности раздела устанавливается градиент диффузии и межфазная энергия изменяется по мере того, как изменяется состав жидкости.

Теми же авторами найдено, что значение межфазной энергии в системах Fe–C<sub>графит</sub>, Ni–C<sub>графит</sub> увеличивается с увеличенным содержанием углерода в сплавах. Эти данные показывают, что межфазная энергия системы, в которой протекает химическая реакция на границе раздела фаз, увеличивается от минимальной до максимальной, в ряде случаев превышающей свободную поверхностную энергию твердого тела на границе с газом, по мере приближения системы к равновесию.

В работе [20] сделана попытка провести количественное рассмотрение влияния химической реакции на межфазную энергию на границе твердое тело–жидкость с позиций равновесной термодинамики. Авторами получено следующее уравнение

$$\sigma_{т-ж}^д = \sigma_{т-г} - \sigma_{ж-г} + \Delta\sigma/S, \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma$  – парциальное изменение свободной энергии химической реакции ( $P$  и  $T = \text{const}$ );  $S$  – площадь одного моля жидкости, растянутого в молекулярную пленку;  $\sigma_{т-ж}^д$  – динамическая межфазная энергия, мДж/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{т-г}$  – поверхностная энергия твердого тела на границе с газом, мДж/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{ж-г}$  – поверхностное натяжение жидкости, мДж/м<sup>2</sup>.

По мере возрастания интенсивности взаимодействия увеличивается отрицательное значение  $\Delta\sigma$  и динамическая межфазная энергия уменьшается, а затем возрастает, при  $\Delta\sigma=0$  уравнение (2) переходит в уравнение (1). Из рассмотрения уравнения (2) следует, что в случае растекания жидкостей с высокой свободной поверхностной энергией по твердым телам в условиях интенсивного химического взаимодействия, можно ожидать в ряде случаев существования отрицательной межфазной энергии.

Результаты расчетов с использованием уравнения (2) для случаев растекания жидких окислов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и MoO<sub>3</sub> по тугоплавким металлам W, Mo, Ta, Nb при сопоставлении с экспериментом показали хорошее качественное, а в ряде случаев и количественное совпадение. Применение уравнения к описанию взаимодействия в системах жидкий тугоплавкий металл IV–VI группы – графит показывает, что в этом случае благодаря значительной активности металла, по-видимому, происходит отклонение от протекания реакции в монослой, как это предполагалось при выводе уравнения. В этом случае

$$\sigma_{т-ж}^д = \sigma_{т-г} - \sigma_{ж-г} + \Delta\sigma/kS, \text{ мДж/м}^2, \quad (3)$$

$k$  – кинетический коэффициент, для системы Ti – графит, как показали расчеты авторов,  $k = 3,54$ . Наибольший интерес представляет оценка  $\sigma_{т-ж}$  по уравнениям, опирающимся на экспериментальные значения краевых углов смачивания. В табл. 5 представлены результаты расчета величины поверхностной энергии алмаза на границе с жидкими металлами и динамической межфазной энергии, выполненные нами на основании исследования смачиваемости алмаза.

Таким образом, при оценке показателя склонности алмазного инструмента к адгезионному разрушению в процессе алмазной обработки в инертной к углероду среде следует учитывать величины динамической работы адгезии и динамической межфазной энергии. При обработке металлов и сплавов в химически активной к углероду среде необходимо учитывать совместное влияние металла и кислорода на графитизацию алмаза на межфазной границе. Следует отметить, что при алмазной обработке горных пород, камня, композиционных материалов, присутствие в их составе химически активных по отношению к алмазу элементов также приводит к снижению стойкости алмазных инструментов.

Таблица 5. Смачивание алмаза переходными металлами

Металлы	$\sigma_{ж-г}$ мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_{т-ж}^д$ мДж/м <sup>2</sup>		$\Delta\sigma$ , ккал/ моль	$\sigma_{т-ж}$ мДж/м <sup>2</sup> (100)	Краевой угол смачивания алмаза, $\theta$		$W_{адг}$ мДж/м <sup>2</sup> (100)	$W_{адг}^{дл}$ мДж/м <sup>2</sup> (100)
		(100)	(III)			(III)	(100)		
Титан	1400	6630	2800	-43,24	7700	0	0	2800	3870
Кремний	720	7980	4150	-12,27	8380	0	0	1440	1840
Ванадий	1790	6910	3989	-25,43	7310	0	0	3580	3980
Хром	1590	7010	3180	-26,45	7510	0	0	3180	3680
Марганец	1030	5890	289	-21,40	8070	0	0	2060	4240
Железо	1800	6359	2529	-7,55	7721	62	43	2950	3891
Кобальт	1890	5875	2045	-7,27	8155	63	54	2990	4325
Никель	1930	5468	1638	-7,0	8377	68	58	2845	4547

Теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы относительно характера разрушения алмаза при обработке различных материалов:

1. Преобладание механического (абразивного) износа (усталостного и хрупкого разрушения) имеет место, главным образом, при обработке некарбидообразующих металлов и их сплавов (медь, серебро, золото, олово, германий, свинец, цинк и др.), а так же карбидов металлов, если контактная температура процесса ниже 650 °С.

2. С повышением контактных температур в результате возрастания скоростей резания при обработке указанных металлов возможно разрушение алмаза вследствие его окисления кислородом воздуха, попадающим в зону резания.

3. При обработке черных металлов разрушение алмаза определяется процессом каталитического фазового превращения алмаза в графит.

4. Преобладание адгезионного износа характерно для карбидообразующих металлов, хорошо смачивающих алмаз, т. е. растекающихся по поверхности кристалла с краевыми углами смачивания, близкими к нулю, образующих прочные в термодинамическом отношении карбиды. Этим требованиям удовлетворяют ряд металлов (титан, кремний и др.).

5. Смешанный характер износа наблюдается для карбидообразующих металлов, обладающих средними коэффициентами диффузии углерода в них и достаточно высокой адгезией к алмазу (ванадий и др.).

6. На основании результатов исследования механизмов износа алмазных кристаллов в инструментах при обработке различных материалов во ВНИИалмазе разработаны методы углубленной сортировки природных алмазов, отличающихся по прочности, вязкости разрушения, составу примесей, предназначенные для применения в конкретных видах инструментов.

*В результаті аналізу теоретичних і експериментальних досліджень зроблені висновки щодо характеру руйнування алмазу при обробці різних матеріалів.*

**Ключові слова:** алмаз, механічна обробка, адгезійний знос, графітизація, карбідостворюючий метал.

*The conclusions about the nature of the destruction of the diamond in the processing of different materials based on analysis of theoretical and experimental research were made.*

**Key words:** diamond machining, adhesive wear, graphitization, the metal carbide former.

### Литература

1. Tolkovskiy M. Research on the abrading, grinding or polishing of diamond: DSc thesis (Eng.). – City and Guild College, University of London, 1920.
2. Wilks E. M., Wilks J. The resistance of diamond to abrasion // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1972. – **5**. – N 10. – P. 1902–1920.
3. Seal M. Proceedings of the Conference on Lubrication and Wear. – London: Instn. Mech. Engrs, 1957.
4. Bowden F. P. & Scott H. G. The Polishing, Surface Flow and Wear of Diamond and Glass // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1958. – **248**. N 1254. – P. 368–378.
5. Ножкина А. В., Костиков В. И., Маурах М. А. Сущность взаимодействия алмаза с металлами // Теория и практика алмазной обработки. – М.: НИИШШ, 1969. – С. 19–25.
6. Маслов Е. Д., Ножкина А. В. О сущности алмазного точения // V всесоюзная научно-техническая документация по прогрессивным методам абразивной и алмазной обработке материалов. – Москва, 1979.
7. Иоффе М. М., Маурах М. А., Ножкина А. В. К вопросу о взаимодействии алмаза с некоторыми металлами // Внедрение алмазов в промышленность. – М.: НИИМАШ, 1967. – С. 55–62.
8. Лоладзе Т. Н. Износ режущего инструмента. – М.: Машгиз, 1958. – 356 с.
9. Лоладзе Т. Н., Бокучаева Г. В. Исследование износа алмазного абразивного инструмента // Труды ТПИ. – 1965. – № 3.
10. Evans T. and Phaal C. Imperfections in Type I and Type II Diamonds // Proc. R. Soc. Lond. A – 1962. – **270**. –N 1343. – P. 538–552.
11. Diamond – graphite Equilibrium Line from growth and Graphitization of diamond / F. P. Bundy, H. P. Bovenkerk, H. M. Strong, and R. H. Wentorf, jun. // J. Chem. Phys. – 1961. – **35**. – N 2. – P. 383–391.
12. Ножкина А. В. Влияние металлов на фазовое превращение алмаза в графит // Труды ВНИИАЛМАЗ. – 1982. – № 4.
13. Костиков В. И. Маурах М. А. Ножкина А. В. Смачивание алмаза и графита сплавами железа с титаном // Порошковая металлургия – 1970. – № 1.
14. Ножкина А. В. Костиков В. И. Смачивание алмаза сплавами переходных металлов // Труды всесоюзной конференции «Новое в теории и практике создания и применения синтетических сверхтвердых материалов в народном хозяйстве». – К.: ИСМ АН УССР, 1977. – С. 166–177.
15. Ножкина А. В. Взаимодействие алмаза с металлами при спекании порошков // Тр. ВНИИАлмаз – 1981. № 4.
16. Ножкина А.В. Взаимодействие алмаза с металлами и сплавами // Сб «В.П. Елютин» издательский дом «Руда и металлы» –М.: МИСиС, 2005.
17. Отопков П. П. Ножкина А. В. Влияние металлов на прочность алмазов // Алмазы. – 1971. – № 7. – С. 5–7.
18. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – К.: Наук. думка, 1968. – 246 с.
19. Костиков В. И., Ножкина А. В., Дудаков В. Б. Свободная поверхностная энергия алмаза на границе с жидкими металлами // Тр. конф. «Участие молодых ученых в фундаментальных поисковых и прикладных исследованиях по созданию новых углеродных и наноуглеродных материалов. – Пермь, 2011.
20. Ножкина А. В., Костиков В. И., Дудаков В. Б. Графитизация природных и синтетических алмазов // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология. Конструкционные и функциональные материалы (в том числе наноматериалы) и технологии их производства. Владимир, 17-19 ноября 2010 г.: Материалы седьмой международной конференции. – Владимир, 2010. – С. 255–259.

*Поступила 10.07.12*