

УДК 621.902

Д.В. Ромашов, Д.О. Федоренко,
В.А. Федорович, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУГОВ ДЛЯ АЛМАЗНОГО СВЕРХСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Дані дослідження присвячені теоретичному вивченню процесу виготовлення алмазно-абразивного інструменту для високошвидкісного алмазного шліфування за допомогою 3D моделювання напружено-деформованого стану компонентів алмазозносного шару круга. Проведено теоретичні дослідження процесу спікання алмазних шліфувальних кругів на металевих зв'язках з метою визначення умов збереження цілісності алмазних зерен при виготовленні інструменту.

Данные исследования посвящены теоретическому изучению процесса изготовления алмазно-абразивного инструмента для высокоскоростного алмазного шлифования посредством 3D моделирования напряженно-деформированного состояния компонентов алмазозносного слоя круга. Проведены теоретические исследования процесса спекания алмазных шлифовальных кругов на металлических связках с целью определения условий сохранения целостности алмазных зерен при изготовлении инструмента.

These studies focus on the theoretical study of the process of manufacturing diamond abrasive tools for high-speed diamond grinding through the 3D modeling of the stress-strain state of the components of the diamond layer of the circle. Contains theoretical research of the sintering process of diamond grinding wheels for metal bonds in order to determine the conditions for maintaining the integrity of the diamond grains in tools.

Введение

В современном машиностроении проблемы повышения стойкости, надежности и эффективности использования режущего инструмента являются одними из важнейших. Широкое применение на многих технологических операциях обработки деталей и материалов получил алмазный инструмент. Однако, существующие методы изготовления алмазного инструмента, имеют серьезные недостатки и ограничения, связанные как с нанесением алмазного слоя, так и с созданием корпусов инструмента [1]. К основным недостаткам существующих методов следует отнести: возможность графитизации алмаза, малую прочность (соответственно и низкий коэффициент использования алмазных зерен при обработке шлифованием) [1, 2, 3, 4] и недостаточную адгезию алмаза и связки, высокую энергоемкость и большие временные затраты на технологический процесс получения инструмента.

Наличие большого количества металлических включений в кристаллах

приводит к снижению их прочности и особенно термостойкости. Известно, что нагрев синтетических алмазов, начиная с температуры 850 °С может привести к снижению их прочности. Температура спекания алмазного слоя для инструментов, работающих в особо тяжелых условиях, составляет 1000–1220 °С. При таких температурах спекания может происходить резкое уменьшение исходной прочности алмазов и привести к снижению его работоспособности. [1, 5]

Образование трещин в кристаллах после нагрева связано с резким увеличением объема включений металлофазы. Следовательно, начальная температура появления трещин в кристаллах будет зависеть от величины термического расширения металлофазы. Начальная температура появления трещин будет также зависеть от объема включений и от характера и места его расположения.

Сегодня совершенствование технологий синтеза сверхтвердых материалов и решение материаловедческих задач, связанных с созданием более прочных, термо- и износостойких СТМ [3,4], а так же применение новых технологий при производстве инструмента частично решают данную проблему. В настоящее время нет таких материалов, которые удовлетворили бы полностью всем требованиям. В этой связи при синтезе и спекании сверхтвердых материалов используют ряд технологических приемов, которые в какой-либо степени способствуют выполнению большого количества требований. Например, применяются составные контейнеры, защитные экраны из тугоплавких материалов, выполняется предварительная термическая обработка материалов, передающих давление, и т.д. Так, для аппарата типа «белт» генерирование давления достигается за счет применения деформирующей прокладки из блочного пирофиллита. В аппаратах типа «чечевица» в качестве среды, передающей давление, используется кальцит (литографский камень). В этих аппаратах в качестве внутренней части может применяться втулка из смеси хлористого натрия с диоксидом циркония, что позволяет значительно улучшить теплоизоляционные свойства среды, передающей давление, температура на стенках матрицы снижается с 250 до 150 °С. [3, 4, 5, 6].

Однако решение данных проблем нельзя рассматривать вне связи с условиями обработки (обрабатываемый материал, режимы резания, геометрия инструмента), в значительной степени определяющими вероятность, способы и величину разрушения такого инструмента.

Особенно это касается режимов высокоскоростного шлифования. Поскольку при работе с такими режимами весомым фактором является безопасность инструмента (способность противостоять значительным разрывающим нагрузкам), а так же изменяется характер разрушения алмаза – это не истирание, а микроскалывание. На высоких скоростях (более 120 м/с) происходит образование режущих субмикроромок, которые обеспечивают

повышенную точность и значительное снижение сил резания при обработке. Обеспечить образование острых кромок должно условие целостности алмазов в композите после спекания данного круга. Для достижения таких условий обработки алмаз должен иметь высокую степень адгезии со связующим компонентом, алмазосносный слой должен обладать общей прочностью, способной противостоять высоким растягивающим усилиям, а так же число разрушенных алмазов в композите после спекания должно быть уменьшено.

Описание конечно-элементной модели процесса спекания

Все геометрические модели «связка-алмазные зерна-металлофазы-покрытия» построены с использованием коммерческого программного CAD обеспечения SolidWorks.

Основным допущением при моделировании процесса спекания было выделить фрагмент алмазосносного слоя в виде куба с некоторым количеством алмазных зерен, ограниченный со всех сторон [7, 8, 9], что в полной мере можно аппроксимировать на алмазный круг в целом (рисунок 1).

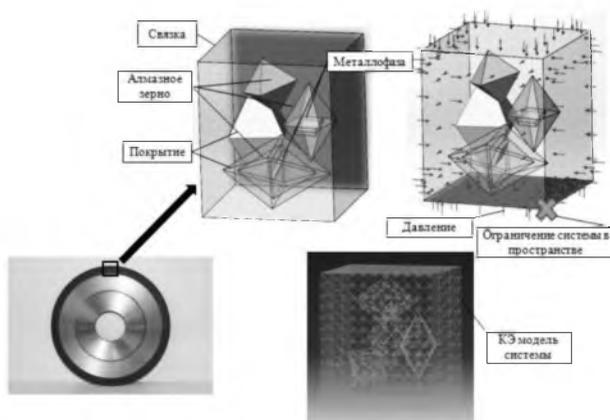


Рисунок 1 – Геометрическая модель, граничные условия и конечно элементная сетка системы «связка-алмазные зерна-металлофазы-покрытия»

В зависимости от рассматриваемой зернистости, размеры зерен варьировались от 50x30x30 до 500x300x300 мкм, зерна моделировались в виде октаэдров наиболее приближенной формой к реальному зерну [3-6]. Наличие металла-катализатора в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными пластинами, объемное содержание которых составляло от 5% до 20%. Рассматривалось наличие одной или двух металлофаз, расположенных на периферии зерна. Что касается связки, то она представлялась в виде кубического фрагмента с размерами от 0,5x0,5x0,5 до

3x3x3 мм в зависимости от размера и концентрации зерен, а так же для погашения влияния возникающих напряжений, вызванных граничными условиями (закрепление кубика связки в пространстве). Покрытие на алмазных зернах представлено в виде твердотельной оболочки, повторяющее форму зерна. При расчетах толщина покрытий варьировалась от 15 до 50 мкм.

Важнейшим компонентом для стабильной работы шлифовального круга на высокоскоростных режимах является связующий компонент. Связка, используемая в шлифовальных кругах, имеет несколько основных функций: удерживать абразивные зерна в процессе обработки; изнашиваться с необходимой скоростью по отношению к скорости износа зерна; противостоять центробежным силам, особенно на высокой скорости обработки. В современных условиях необходимо внедрение новых связующих компонентов, а так же системы их выбора для конкретных условий обработки.

На рисунке 2 показана зависимость скорости обработки и различных типов связок, как это определено в исследованиях Кенига (Konig) [10].



Рисунок 2 – Применение различных типов связок для всего диапазона скоростей обработки при алмазном шлифовании

Данная работа рассматривает проблемы применения металлических связок для эксплуатации алмазных кругов в диапазонах скоростей 100-200 м/с. Такое решение основано на возможности применения широкого диапазона металлов (основного компонента связки) для режимов высокоскоростного шлифования, а так же, использование металлических связок одна из наиболее распространенных технологий при изготовлении алмазных кругов в Украине. При этом, применение металла, как основного

компонента связки является наилучшим вариантом с точки зрения сохранения целостности алмазных зерен в композите, поскольку температура спекания кругов соответствует 0,7 – 0,8 температуры плавления металла, как правило, 500 – 830 0С [11]. Такие условия оказывают значительное влияние на состояние металла-катализатора синтетического алмаза, вызывающего его растрескивание. Однако рассмотренную методологию возможно применять для прогнозирования состояния алмазов при использовании других видов связующего компонента.

Для исследований выбран широкий диапазон материалов системы «связка-алмазные зерна-металлофазы-покрытия». Основными входными факторами были приняты: коэффициент температурного расширения (КТР) металлофазы, прочностные свойства связки, свойства покрытия зерен, режимы спекания кругов.

В качестве уровней факторов для материалов связующего компонента, металлофазы и покрытий были использованы: легированная сталь, сплавы никеля, и сплавы меди. Такой выбор даст возможность изучить широкий диапазон наиболее подходящих материалов для данных целей при помощи одной 3D модели, без затрат времени на ее переопределение.

Поскольку при спекании кругов на металлических связках температура доходит практически до точки плавления металла, целесообразно учитывать пластические свойства компонентов спекаемой системы. На рисунке 3 показано пластическое поведение принятого для расчетов компонента системы на основе железа.

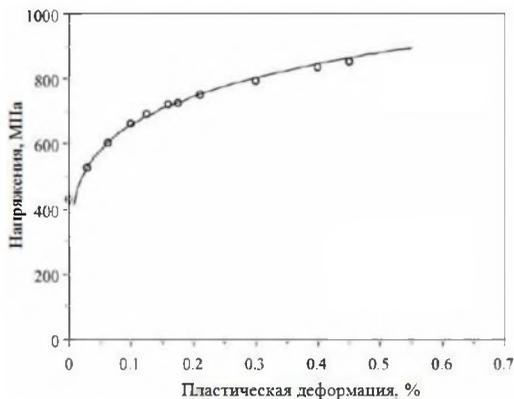


Рисунок 3 – Пластическое поведение принятого для расчетов компонента системы на основе железа.

Поскольку в данном исследовании интерес представляет распределение напряжений в алмазном зерне при воздействии высоких температур, значительное внимание уделялось внедрению в модель термо-физических свойств алмаза, что улучшило адекватность модельных экспериментов. Проведенные расчеты, с учетом термо-физических свойств и пластического поведения материалов системы, показали разницу 10-15 % по сравнению с предыдущими [6-8, 12, 13] модельными исследованиями в данной области.

Температурные зависимости колебательных свойств алмаза были получены используя квазигармоническое приближение (QHA) в работе Т.А. Ивановой, Б.Н. Маврина, Jing Guo [14] а так же, в работе Bin Wen, используя молекулярную динамику [15].

Коэффициент линейного теплового расширения $\alpha(T)$ был получен численным дифференцированием температурной зависимости параметра решетки a ($a = [4V(T)]^{1/3}$) согласно уравнению:

$$\alpha(T) = \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial T}, \quad (1)$$

где V – объем ячейки алмаза, T – температура и представлен на рисунке 4

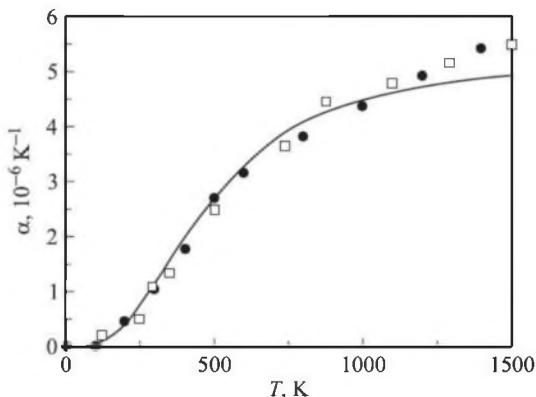


Рисунок 4 – Температурная зависимость коэффициента линейного теплового расширения алмаза

В качестве решателя (CAE программы) в данном случае использовались CosmosSimulation и Abaqus. При этом геометрическая модель импортировалась в Abaqus при помощи универсальных форматов файла

геометрии. Модельные эксперименты проводились в соответствии с теорией планирования эксперимента [16, 17]. Значения факторов кодируются путем линейного преобразования координат факторного пространства с переносом начала координат в нулевую точку и выбором масштабов по осям в единицах интервалов варьирования факторов. Условия проведения модельных экспериментов представлено в таблице.

Таблица – Матрица планирования эксперимента

№	КТР металлофазы при 400 ⁰ С, 1/К	Модуль упругости связки при 400 ⁰ С), Н/М ²	Модуль упругости покрытия при 400 ⁰ С, Н/М ²	Температура спекания, ⁰ С
1	3.16E-05	2.44E+11	2.44E+11	900
2	1.32E-05	2.44E+11	2.44E+11	900
3	3.16E-05	1,02E+11	2.44E+11	900
4	1.32E-06	1,02E+11	2.44E+11	900
5	3.16E-05	2.44E+11	1,02E+11	900
6	1.32E-05	2.44E+11	1,02E+11	900
7	3.16E-05	1,02E+11	1,02E+11	900
8	1.32E-05	1,02E+11	1,02E+11	900
9	3.16E-05	2.44E+11	2.44E+11	450
10	1.32E-05	2.44E+11	2.44E+11	450
11	3.16E-05	1,02E+11	2.44E+11	450
12	1.32E-05	1,02E+11	2.44E+11	450
13	3.16E-05	2.44E+11	1,02E+11	450
14	1.32E-06	2.44E+11	1,02E+11	450
15	3.16E-05	1,02E+11	1,02E+11	450
16	1.32E-05	1,02E+11	1,02E+11	450
17	3.16E-05	1.85E+11	1.85E+11	675
18	1.32E-05	1.85E+11	1.85E+11	675
19	1,81E-05	2.44E+11	1.85E+11	675
20	1,81E-05	1,02E+11	1.85E+11	675
21	1,81E-05	1.85E+11	2.44E+11	675
22	1,81E-05	1.85E+11	1,02E+11	675
23	1,81E-05	1.85E+11	1.85E+11	900
24	1,81E-05	1.85E+11	1.85E+11	450

Результаты и их обсуждение

Выбор критерия разрушения является чрезвычайно важным, поскольку будет значительно влиять на величины погрешностей при осуществлении модельных экспериментов. К настоящему времени на основе обобщения большого числа экспериментальных данных, специально поставленных исследований и сравнительного анализа критериев по типам материалов и НДС наиболее перспективным и обоснованным представляется критерий Писаренко-Лебедева в форме: деформации в разупрочнение материала, тогда как член $(1-x)$ характеризует ту долю растягивающих напряжений в НДС, которая ответственна за раскрытие микротрещин в поверхности разрушения. Критерий хорошо экспериментально обоснован. При значении $x=0$ (идеально хрупкий материал) он принимает вид, соответствующий критерию максимальных нормальных напряжений; при $x=1$ (идеально пластичный материал) соотношение для расчета напряжений преобразуется в уравнение энергетической теории Мизеса-Генки. Параметр x определяется по результату двух опытов, проведенных при разных НДС, например растяжении - сжатии, растяжении - чистом сдвиге и тд.

Критерий может быть применен для оценки прочности структурно-неоднородных материалов (графита, чугуна, хрупких терморезистивных пластмасс и тд.). Таким образом, к параметрам для расчета прочности и несущей способности необходимо добавить характеристики материала на сжатие или параметр x .

По результатам испытаний на сжатие σ_k [3.6, 3.26, 3.27,]:

$$\sigma_k = \frac{P}{d \cdot t}, \quad (2)$$

где σ_k – средняя по сечению прочность, определяемая при диаметральной сжатии образца диаметром d и высотой t разрушающим усилием P . Для перехода от σ_k к σ_p использовалось выражение вида:

$$\sigma_p = B \cdot \sigma_k, \quad (3)$$

где B – коэффициент, зависящий от выбора критерия прочности.

Учет этого критерия в выражении (3.4) привели к выражению:

$$\sigma_p = \frac{0,41 \cdot \sigma_k \cdot \sigma_c}{\sigma_c - 1,89 \cdot \sigma_k}, \quad (4)$$

где σ_c – предел прочности при одноосном сжатии.

На основе данных о прочности алмазных зерен при статическом сжатии вычислялись, прочности связок и свойств покрытий вычислялись σ_p для

исследуемых алмазных зерен, а так же напряжения в связующем компоненте, металлофазе и покрытии.

На рисунке 5 показана картина распределения напряжений в исследуемой системе для наилучшего и наихудшего вариантов сочетания свойств компонентов композиции. Наименьшие напряжения наблюдаются при использовании связки на основе никеля (модуль упругости $2.44E+11$ Н/м²), металлофазы на основе железа (КТР $1.32E-06$ 1/К), покрытия со свойствами, близкими к сплавам меди (модуль упругости $1,02E+11$ Н/м²).

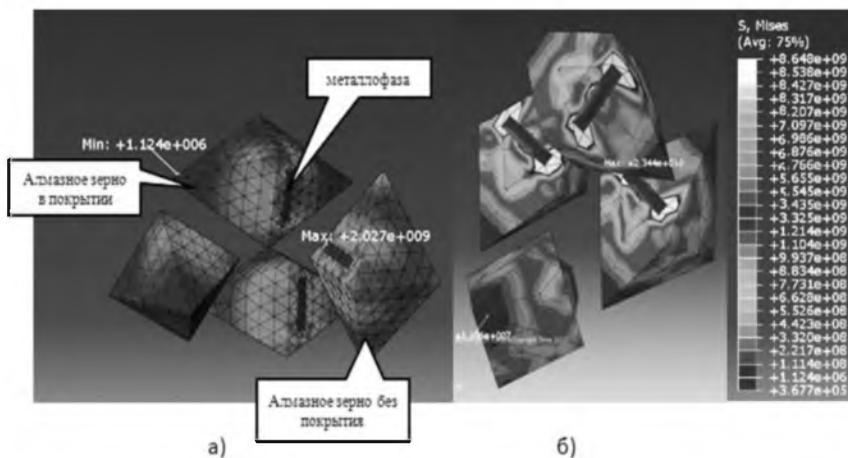


Рисунок 5 – Картина распределения напряжений в окрестности включений металлофаз в алмазном зерне: а – максимальные напряжения 2 ГПа, б – максимальные напряжения превышают предел прочности алмаза и составляют 8.2 ГПа

Напряжения, превышающие пределы прочности алмаза расположены на границах включений металлофазы вызывают развитие внутренних трещин в зерне, что подтверждает результаты в работах [7, 9, 11-13]. Установлено, что при повышении прочности связок действительно наблюдается рост объемов напряжений, на которые они распространяются [7, 11, 12]. Объяснением этому служат возросшие значения напряжений в связке, оказывающие усиливающее воздействие на напряжения в зерне [7, 11-13]. Однако в предыдущих работах не учитывалось пластическое поведение материала связующего компонента, что вносит значительные коррективы в данные выводы (рисунок 6).

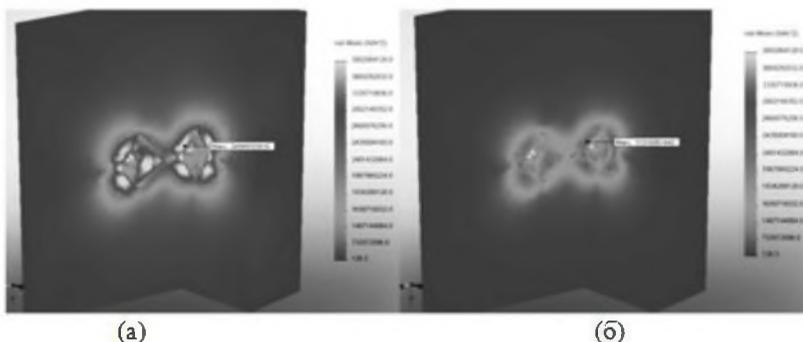


Рисунок 6– Поля приведенных напряжений в системе «алмазные зерна-металлофазы – связка». Вариант расположения зерен при концентрации 100%. а – спекание в системе: модуль упругости связки $2.44E+11$ Н/м², КТР металлофазы $3.16E-05$ 1/К; б – спекание в системе: модуль упругости связки $1.85E+11$ Н/м², КТР металлофазы $1.32E-05$ 1/К

Поскольку при спекании кругов на металлических связках температура достигает 0.7-0.8 температуры плавления металла, учет пластичности в расчетах показал значительное уменьшение напряжений, действующих на зерна внутри композита. Так же эти напряжения (максимальные значения не превышают 2 ГПа) носят сжимающий характер и не приближаются к пределу прочности алмаза, что говорит о возможности изготовления алмазонасного слоя для высокоскоростного шлифования с большей концентрацией алмазных зерен при минимальном количестве поврежденных зерен на рассматриваемых прочных металлических связках.

По проведению значительного числа модельных экспериментов были установлены математические зависимости между основными влияющими факторами свойств компонентов алмазонасного слоя (рисунок 7, 8).

Расчетным путем установлено, что оптимальными температурами спекания является диапазон от 300 до 500 °С. Однако при использовании металлофазы на основе железа (с КТР близким к $1.32E-06$ 1/К) и покрытий на основе сплавов меди (модуль упругости близкий к $1.02E+11$ Н/м²) разрушающих напряжений в зерне не возникает до значений температур в 800 °С.

Наиболее оптимальным сочетанием алмазно-металлической композиции является использование связки на основе сплавов никеля (модуль упругости близкий к $2.44E+11$ Н/м²) при предварительно нанесенном покрытии на зерна на основе сплавов меди (модуль упругости близкий к $1.02E+11$ Н/м²). При

этом возможно использование зерен с большим количеством включений металлофазы. (АС2, АС4, АС6, АС15).

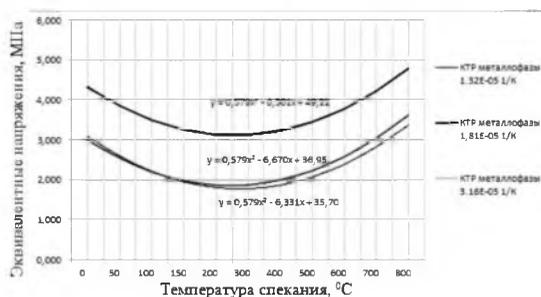


Рисунок 7– Зависимость приведенных напряжений от температуры спекания при варьировании термомеханических свойств металлофазы

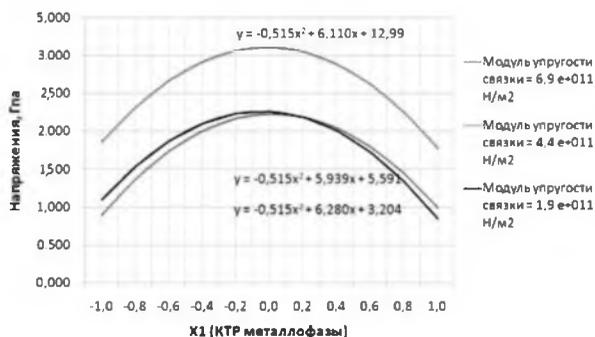


Рисунок 8– Зависимость приведенных напряжений от термомеханических свойств металлофазы при варьировании термомеханических свойств связки

Выводы

Разработана 3D методология определения оптимальных свойств спекаемых алмазно-металлических композиций алмазных кругов для высокоскоростного шлифования.

Методика 3D моделирования напряженно-деформированного состояния алмазосодного слоя круга позволила проанализировать НДС системы «алмазные зерна–металлофазы–покрытие–связка» с учетом термомеханических свойств компонентов спекаемой композиции.

Расчетным путем установлены математические зависимости влияния основных факторов (свойства связки, покрытия, металлофазы, прочностные

свойства зерен и режимы спекания) на целостность алмазных зерен в композиции.

Определено, что пластическое поведение материалов связок имеет значительное влияние на НДС зоны спекания вокруг алмазных зерен в композите. При этом установлено, что при спекании композиции на металлических связках возможно применение большего диапазона концентраций алмазных зерен (до 30% при использовании зерен АС4 и АС6), по сравнению с рекомендациями, данными в прошлых исследованиях.

Список использованных источников: 1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6 томах. Под общей ред. Н. В. Новикова — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003—2007 гг. 2. *Бакуль В.Н., Цытин Н.В., Гаргин В.Г.* Взаимодействие алмаза с расплавами металлов в условиях изготовления инструментов. – В кн.: Адгезия расплавов. – К.: Наук. думка. – 1974. – С. 134-136. 3. Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора / Под ред. Н.В. Новикова. – К.: Наук. думка, 1993. – 255 с. 4. *Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 220 с. 5. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.6: Алмазно-абразивные инструменты в технологических механообработке / Под ред. А.А. Шепелева. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 340 с. 6. *Иванов С.А., Переяслов В.П., Майстренко А.Л.* Физико-механические и функциональные свойства композиционных алмазосодержащих материалов, полученных методом интенсивного электроспекания // Техника машиностроения, - 2006, №2. - С.21-27. 7. *Федорович В.А.* Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2002. – 466 с. 8. *Козакова Н.В., Наконечный Н.Ф., Федорович В.А.* 3D моделирование при определении оптимальных характеристик алмазных кругов // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – Вип. 1(8). – С. 81-86. 9. *Федорович В.А., Островерх Е.В., Козакова Н.В.* Обеспечение надежности лезвийного инструмента из сверхтвердых материалов на стадии его изготовления // Резание и инструмент в технологических системах. – 2002. – Вып. 62. – С. 158-161. 10. *König, W., Klocke, F., and Stiff, D., 1997, High Speed Grinding with cBN Wheels – Boundary Conditions, Applications and Prospects of a Future Oriented Technology, 1st French and German Conf. on High Speed Machining, Metz, June, p 207-218.* 11. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента: Учебное пособие для техникумов / Под общ. ред. Ю.М. Ковальчука. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с. 12. *Козакова Н.В., Островерх Е.В., Хавин Г.Л.* Методика расчета температуры хрупкого разрушения системы «алмазный кристаллит–металлофаза» // Резание и инструмент в технологических системах. – 2001. – Вып. 59. – С. 124-128. 13. *Козакова Н.В., Федорович В.А.* Влияние прочностных свойств элементов системы «круг–деталь» на оптимальную концентрацию алмазных зерен // Резание и инструмент в технологических системах. – 2003. – Вып. 64. – С. 133-140. 14. *Иванова Т.А., Маврин Б.Н.,* Температурная зависимость теплового расширения и частотного сдвига оптических фононов в алмазе из первых принципов, Физика твердого тела, 2013, том 55, вып. 1. 15. *Jing Guo, Bin Wen, Roderick Melnik, Shan Yao, Tingju Li.* Molecular dynamics study on diamond nanowires mechanical properties: Strain rate, temperature and size dependent effects. 16. *Красовский Г.И., Фицаретов Г.Ф.* Планирование эксперимента. — Минск: изд-во БГУ, 1982. — 302 с. 17. *Кацев П.Г.* Статистические методы исследования режущего инструмента. Изд. 2е, перераб. и доп., М. «Машиностроение», 1974. – 231 с.

Поступила в редколлегию 03.07.2013