

УДК 621.9

Клименко С.А.; Клименко С.Ан.; Копейкина М.Ю.; Манохин А.С.  
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНТАКТНОМ УЧАСТКЕ ИНСТРУМЕНТА ИЗ ПКНБ

Klimentko S., Klimentko S., Kopeykina M., Manohin A.

V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv (atmu@meta.ua)

### THEORETICAL STUDY OF TEMPERATURE IN THE CONTACT ZONE cBN CUTTING TOOL

Одной из современных мировых тенденций развития технологий лезвийной обработки является обработка материалов высокой твердостью инструментом, оснащенным ПКНБ. В то же время, с ростом режимов обработки и твердости обрабатываемого материала имеет место существенное увеличение температуры в зоне контакта, что влияет на стойкость и интенсивность изнашивания режущего инструмента и становится одним из факторов, ограничивающим производительность процесса резания. Снижение температуры на контактном участке инструмента минимизирует интенсивность взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в зоне резания, что способствует уменьшению износа инструмента.

*Ключевые слова:* температура на пятнах вспышки, покрытие, инструменты из ПКНБ, точение.

#### Введение

Исследованиями, проведенными в [1], установлено, что износ режущих инструментов, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе кубического нитрида бора (ПКНБ), при точении закаленных сталей с высокими скоростями резания, связан с протеканием химических реакций взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалом с образованием продуктов взаимодействия в виде жидкой фазы. Моделирование взаимодействия в системе cBN-(Fe-Ni-Cr) показало, что такое взаимодействие происходит в два этапа. На первом этапе (при температуре  $\sim 1380$  °C) имеют место химические реакции с образованием боридов типа  $(Fe, Ni, Cr)_x B_y$ . На втором этапе, при нагреве до температуры  $\sim 1177$  °C, происходит образование эвтектик типа Fe-Fe<sub>2</sub>B и, за счет контактного плавления, формируется жидкая фаза [1, 2].

Температура начала химического взаимодействия превышает температуру резания при точении сплавов на основе (Fe-Ni-Cr). Появление такой температуры объясняется тем, что на выступах микронеровностей на поверхности инструмента при контакте со стружкой (рис. 1) и изделием имеют место нагрузки, достаточные для интенсивной пластической деформации обрабатываемого материала, что сопровождается выделением значительного количества теплоты в микрообъемах.

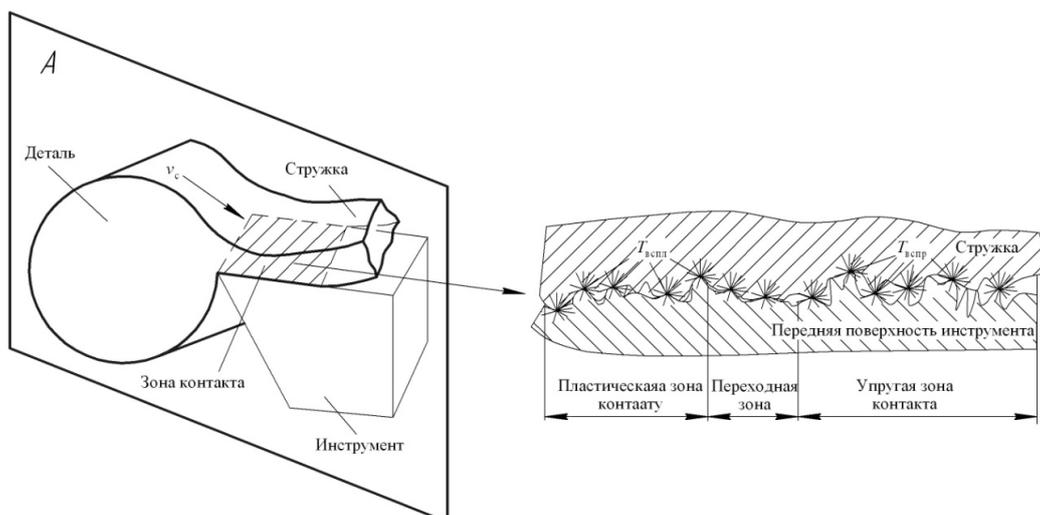


Рис. 1. Схема участка контакта инструмента со стружкой

Теплота, возникающая на контактных участках инструмента, локализуется на коротко существующих фактических пятнах, образуя систему тепловых импульсов (температурных вспышек).

Температурные вспышки имеют место на вершинах контактирующих микронеровностей и кратковременно возникают на разных участках зоны контакта, обуславливая ее нагрев. Период существования температурных вспышек определяется размерами фактической зоны контакта, тепловыми и физико-механическими характеристиками материалов контактной пары и скоростью взаимного перемещения в паре трения. Размер, координаты размещения и время появления температурных вспышек имеет случайный характер, что затрудняет их экспериментальную оценку.

Кроме того, в процессе резания в зоне контакта инструмента со стружкой и изделием происходит адгезионное взаимодействие, результатом которого является появление на контактных участках инструмента мостиков схватывания, которые постоянно возникают и разрушаются в процессе взаимного перемещения в паре трения. Деформация и разрыв адгезионных мостиков приводит к появлению кратковременных, импульсных источников теплоты, которые также обуславливают наличие кратковременных температурных вспышек в зоне контакта.

Система высокотемпературных импульсов на контактных участках инструмента обуславливает температуру резания  $\sim 1000\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что достаточно для химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в микрообъемах [3]. Следствием такого взаимодействия является реализация на контактных участках эффекта контактного плавления, образование жидкой фазы и интенсификация износа инструмента.

Для повышения стойкости инструмента нужно создать условия, при которых уменьшается тепловыделение на фактических пятна контакта, что позволит уменьшить интенсивность образования соединений  $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Cr})_x \text{B}_y$  и дальнейшее формирование на их основе легкоплавких эвтектик.

Наиболее простым и эффективным методом, позволяющим уменьшить температуру в зоне контакта и интенсивность протекания химических реакций взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалами, является нанесение на рабочие поверхности инструмента защитного покрытия.

На основе анализа состава, свойств и опыта использования покрытий из оксидов, нитридов, карбидов различных тугоплавких металлов с нано-, поликристаллической структурой сделан вывод, что перспективным материалом покрытия является нитрид бора с аморфной структурой ( $\text{BN}_{\text{ам}}$ ).

В настоящей работе проведено теоретическое исследование величины температуры на пятнах вспышки на передней поверхности инструмента из ПКНБ без покрытия и с покрытием.

### Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальное определение температуры на пятнах вспышки в контактной зоне инструмента из ПКНБ в реальных условиях резания является крайне сложной задачей, учитывая малый размер контактных участков, большие значения нагрузок и быстротечность протекающих в зоне резания явлений.

Для теоретического определения температуры на пятнах вспышки предлагается использовать упрощенную схему контакта инструмента со стружкой. По рекомендациям [4], принимаем, что гребешки неровностей имеются только на поверхности режущего инструмента (образованные в результате обработки при изготовлении), а нижнюю поверхность стружки в начальный момент времени считаем абсолютно гладкой.

Для оценки температуры в зоне контакта воспользуемся формулой из [5]:

$$T_c = \frac{\sqrt{2} + 1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \cdot \frac{\mu \cdot P \cdot v_c \cdot d}{2 \cdot A_r \cdot \lambda_2},$$

где  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\mu$  – коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и трения соответственно;  $\rho$  – плотность;  $d$ ,  $A_r$  – диаметр пятна контакта и фактическая площадь контакта соответственно;  $b$  – активная длина режущей кромки;  $P$  – нагрузка на единичный выступ;  $v_c$  – скорость схода стружки; индекс 2 соответствует материалу с большей твердостью.

Исходными для расчета являются данные экспериментальных исследований размеров и топографии контактных участков, величина нагрузки.

Расчеты проводились для случая чистового точения закаленной стали ШХ15 (60 HRC) для инструмента без покрытия и с покрытием на основе нитрида бора с аморфной структурой. Результаты расчетов представлены на рис. 2 в зависимости от скорости резания.

Результаты расчета для инструментов из ПКНБ без покрытия показали, что изменение величины температуры на пятнах вспышки имеет экстремальный характер с максимумом  $2036\text{ }^{\circ}\text{C}$  на пластическом (рис. 2, а) и  $1044\text{ }^{\circ}\text{C}$  на упругом участках контакта (рис. 2, б).

Наличие экстремума объясняется тем, что с увеличением скорости резания в диапазоне от 0,5 до 2,0 м/с высота микронеровностей на рабочих поверхностях инструмента растет более интенсивно, чем снижается нагрузка в зоне контакта. Увеличение скорости резания до 3,0 м/с приводит к незначительному росту высоты

микронеровностей на рабочей поверхности инструмента при одновременном снижении нагрузки, в результате чего уровень температуры на пятнах вспышки снижается.

Высота и радиус закругления микронеровностей на передней поверхности инструмента влияют по-разному на уровень локальной температуры в зоне контакта. С увеличением высоты и уменьшением радиуса закругления микронеровностей температура возрастает. Это связано с тем, что чем выше и острее микронеровности, тем меньше фактическая площадь контакта инструмента со стружкой, в результате чего на таких участках контакта растут локальные силы и напряжения, что ведет к увеличению интенсивности деформации материала и повышению температуры в контактной зоне.

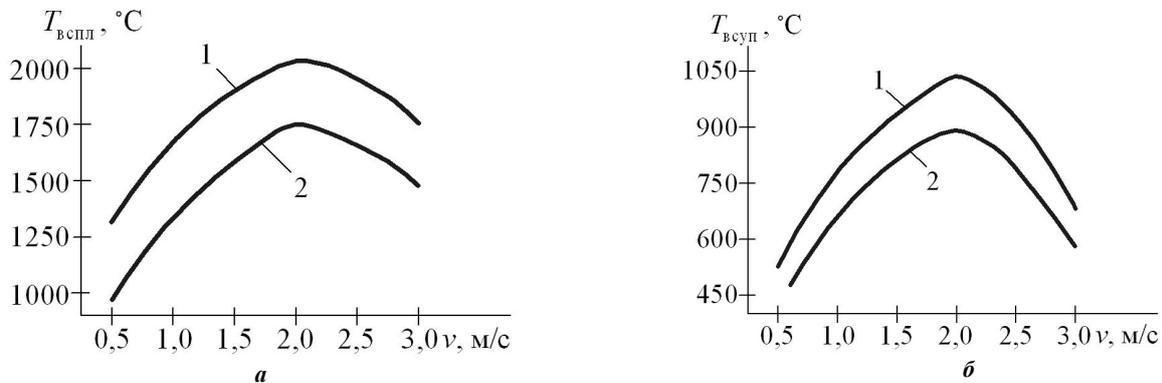


Рис. 2. Температура на пятнах вспышки на пластическом (а) и упругом участках контакта (б) со стружкой в зависимости от изменения скорости резания инструментом: 1 – без покрытия; 2 – с покрытием BN<sub>ам</sub> ( $S = 0,14$  мм/об;  $t = 0,2$  мм)

Уменьшение высоты микронеровностей и увеличение радиуса их закругления ведет к тому, что температура в зоне контакта снижается, так как увеличивается фактическая площадь контакта и уменьшается уровень контактных напряжений, имеющих место на отдельных микронеровностях на контактной поверхности инструмента.

Результаты проведенных расчетов показывают, что так же, как и при резании, алмазным резцом алюминиевых и титановых сплавов [6], при точении закаленной стали инструментом, оснащенным ПКНБ, температура на локальных участках в зоне контакта существенно превышает температуру резания. В некоторой степени это подтверждает магма-плазменную модель контакта Тиссена [7], согласно которой на пятнах контакта при трении локализуется значительная энергия, а вещество может находиться в виде плазмы.

Не смотря на то, что, в связи с краткосрочностью действия температурных вспышек, средняя температура резания составляет  $\sim 1000-1200$  °С, уровень температуры на пятнах вспышки обуславливает возможность химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в микрообъемах [3]. Следствием такого взаимодействия является реализация в зоне резания контактного плавления с образованием жидкой фазы и интенсификация износа инструмента.

Анализ результатов термодинамических исследований, приведенных в [1], показал, что с учетом наличия в контактной зоне инструмента со стружкой нормального давления до 5 ГПа, температура начала протекания химических реакций в системе сBN-(Fe-Ni-Cr) составляет 1700 °С (рис. 3).

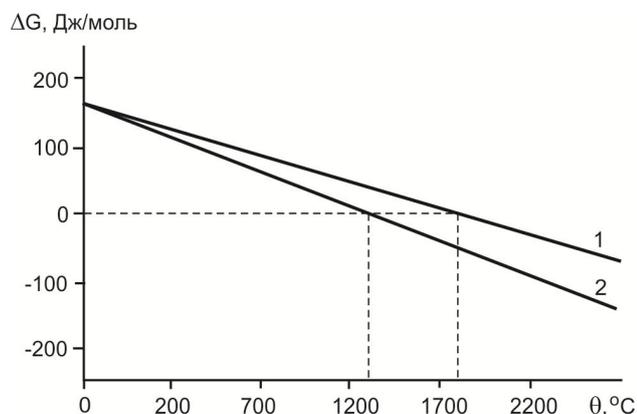


Рис. 3. Зависимость свободной энергии Гиббса от температуры: 1 – без учета давления в контакте; 2 – с учетом контактного давления 5 ГПа

На основе термодинамических исследований и расчета уровня температуры на пятнах вспышки в зоне контакта можно сделать вывод, что достаточный уровень температуры для протекания химических реакций взаимодействия и образования жидкой фазы имеется только на пластическом участке контакта инструмента. Наличие в системе эвтектической пары Fe-Fe<sub>2</sub>B обуславливает реализацию явления контактного плавления и формирование жидкой фазы на контактных участках инструмента со стружкой. Продукты химического взаимодействия выносятся стружкой, оседая как на упругом участке контакта, так и вне зоны контакта, образуя на них своеобразный налет. Часть продуктов, за счет кинетической энергии стружки, выбрасывается в окружающую зону резания среду. На упругом участке контакта протекания химических реакций взаимодействия не происходит (или характеризуется значительно меньшей интенсивностью) из-за недостаточного уровня контактных температур.

Проведенный расчет температуры на пятнах вспышки для инструмента с покрытием из нитрида бора в аморфном состоянии показали (см. рис. 2), что его применение позволяет снизить величину локальных температур, как на пластическом (1770 °C) так и на упругом (893 °C) участках контакта, хотя их уровень остается достаточным для реализации химического взаимодействия с образованием боридов железа. Влияние покрытия проявляется в уменьшении интенсивности протекания таких химических реакций.

Уменьшение температуры на пятнах вспышки объясняется высокими триботехническими свойствами покрытия, в первую очередь низким коэффициентом трения, что ведет к снижению нагрузки в контактной зоне инструмента и уменьшению высоты микронеровностей на участке контакта инструмента со стружкой и изделием.

### Выводы

С учетом того, что образование жидкой фазы имеет место в результате наличия высокой температуры в локальных зонах на контактных участках инструмента, экспериментальное исследование которых вызывает значительные трудности, связанные с малыми размерами, а также быстротечностью имеющих место процессов, предложена экспериментально-расчетная методика для оценки величины температуры на пятнах вспышки.

На основе экспериментальных данных о размерах пятен контакта, величине нагрузки и топографии контактного участка на передней поверхности инструмента проведен расчет величины температуры на пятнах вспышки, который показал, что при увеличении скорости резания имеет место экстремальный характер изменения температуры с максимумом 2036 °C на пластическом и 1044 °C на упругом участках контакта инструмента со стружкой. Установлено, что достаточный для протекания химических реакций взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалами уровень температуры реализуется в пластической области контакта.

Применение покрытия на основе нитрида бора в аморфном состоянии обеспечивает снижение температуры на пятнах вспышки до 1770 °C на пластическом и до 893 °C на упругом участках контакта, что обуславливает снижение интенсивности протекания химических реакций взаимодействия в зоне резания с образованием жидкой фазы, обуславливающей изнашивание инструмента.

### Анотація.

Однією з сучасних світових тенденцій розвитку технологій лезової обробки є обробка матеріалів високої твердості. У той же час, зі збільшенням режимів обробки та твердості оброблюваного матеріалу має місце суттєве збільшення температури в зоні контакту, що впливає на стійкість та зношування різального інструменту та стає одним із факторів, що обмежує продуктивність процесу різання. Зниження температури на контактних ділянках інструмента мінімізує інтенсивність взаємодії між інструментальним і оброблюваним матеріалами в зоні різання, що зменшує знос інструмента.

Ключові слова: Температура на плямах спалаху, покриття, інструменти із ПКНБ, точіння.

### Abstract.

The article is devoted to solving of actual scientific and technical task of increasing of tool life of the cutting tool equipped of cBN-Based PSHM while turning hardened steels.

The concept of increasing of tool life of the PCBN cutting tools when turning hardened steel has been proposed, which is based on the reducing of temperature in the cutting zone. It was implemented by applying boron nitride coating with amorphous structure (BN<sub>am</sub>) on the working surfaces of the PCBN.

Based on experimental data on the size of the contact area, contact loads and the topography of the contact areas of tools, the calculation of the value of temperature flashes was conducted. It was found that the change in temperature has an extreme character with a maximum of 2036 °C and 1044 °C on the sticking and sliding zones of contact area respectively. Wherein, it was revealed that a sufficient level of temperature for chemical interaction between instrumental and processed materials can be realized only in the sticking zone. The use of BN<sub>am</sub> coating reduces the temperature to 1770 °C in the sticking and to 893 °C in the sliding contact zones, hence reducing the intensity of reaction of the chemical interaction in the sticking zone of the contact area.

On the basis of research and industrial tests of the obtained results it was found that exploitation of cBN tools coated with BN<sub>am</sub> allows one to increase the tool life of tool in comparison with the same tool without coating.

*Keywords:* cutting tools, polycrystalline cubic boron nitride, coating, the temperature in the cutting zone, tool life, turning.

#### Библиографический список использованной литературы

1. *Сверхтвердые материалы*. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.
2. *Increase in the efficiency of cutting tools with application of CBN-based polycrystalline superhard materials* / S.A. Klimentko, M.Yu. Kopeikina, Yu.A. Melniychuk et al. // *J. of Superhard Mat.* – 2003. – vol. 25, № 5. – P. 69–73.
3. *Turkevich V.Z.* Thermodynamics of the interaction in the cBN-base tool material – Fe(Ni) system / V.Z. Turkevich, S.A. Klimentko, O.G. Kulik // *Transactions saopstenja masinskog fakulteta.* – 1999. – Vol. XXVIII, №2. – P. 8–11.
4. *Рыжкин А.А.* О влиянии параметров температурного поля на трибологические характеристики пары трения // *Вестник ДГТУ «Трение и износ».* – 2005. – №2. – С. 460–472.
5. *Крагельский И.В.* Основы расчетов на трении и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. *Müller-Hummel P., Lathres M.* Temperature measurement on diamond-coated tools during machining / P. Müller-Hummel, M. Lathres // *Ind. Diam. Rev.* – 1995. – vol. 55, № 2. – P. 78–83.
7. *Клименко С.А.* Высокотемпературные явления при обработке материалов резанием / С.А. Клименко, А.С. Манохин // *Надійність інструменту і оптимізація технологічних систем.* Зб. наук. пр. – Краматорськ. – 2011. – № 28. – С. 61–65.

#### References

1. Novikov, N.V. (2006), *Superhard materials. Preparation and Use*, Klimentko, S.A. (ed.), YSM im. V.N. Bakulya. Kyiv, Ukraine.
2. Klimentko, S.A., Kopeikina, M.Yu. and Melniychuk, Yu.A. (ed.), (2003), Increase in the efficiency of cutting tools with application of CBN-based polycrystalline superhard materials, *J. of Superhard Mat.* Vol. 25 no 5, pp. 69–73.
3. Turkevich, V.Z., Klimentko, S.A. and Kulik, O.G. (1999), Thermodynamics of the interaction in the cBN-base tool material – Fe(Ni) system, *Transactions saopstenja masinskog fakulteta.* XXVIII, no 2, pp. 8–11.
4. Rizhkyn, A.A. (2005), The effect of temperature field parameters on tribological characteristics of friction pairs. *Vestnik DHTU «Trenie i iznos»*, no 2, pp. 460–472.
5. Krahel'skiy, Y.V., Dobychin, M.N. and Kombalov, V.S. (1977), *Basics of calculations for friction and wear.* Mashynostroeny, Moscow, Russia.
6. Müller-Hummel, P. and Lathres, M. (1995), Temperature measurement on diamond-coated tools during machining. *Ind. Diam. Rev.* vol.55, no 2, pp. 78–83.
7. Klymenko, S.A. and Manohin, A.S. (2011), High-temperature phenomena in cutting materials, *Nadiynist' instrumentu i optymizatsiya tekhnolohichnykh system, Zb. nauk. Pr.* no 28, pp. 61–65, Kramators'k, Ukraine.

Подана до редакції 27.05.2016