

УДК 621.9.029:620.19

А. С. Манохин, С. А. Клименко*, М. Ю. Копейкина,

С. Ан. Клименко (г. Киев)

В. В. Рощупкин, М. М. Ляховицкий (г. Москва)

**atmu@ism.kiev.ua*

Трибология процесса резания инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ

Рассмотрены механизмы контактного взаимодействия в зоне резания инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ, и показана их связь с условиями термобарического нагружения на инструмент – температурой резания и контактными напряжениями.

***Ключевые слова:** инструмент, кубический нитрид бора, резание, температура резания, контактные напряжения, изнашивание.*

ВВЕДЕНИЕ

Процесс изнашивания инструмента в зоне резания обусловлен, в большинстве случаев, абразивным, адгезионным, усталостным, коррозионным, химическим механизмами его контактного взаимодействия с обрабатываемым материалом, а также действием окружающей среды. Различные механизмы проявляются в зависимости от природы контактирующих материалов и условий термобарического нагружения инструмента в зоне обработки, обуславливая, в большинстве случаев, экстремальный характер зависимости стойкость инструмента–скорость резания.

Температура в зоне резания влияет на работоспособность инструмента, ограничивает производительность обработки, оказывает значительное влияние на структурное состояние и фазовый состав материала как поверхностного слоя изделий, так и материала режущего инструмента [1]. Учет температуры резания является необходимым условием при разработке высокоэффективных технологий обработки изделий из труднообрабатываемых материалов, например закаленных сталей, инструментами, оснащенными поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ).

Нормальные и тангенциальные напряжения на границе контакта инструмент–обрабатываемый материал при обработке резанием влияют на характер и интенсивность изнашивания инструментов с ПСТМ. С их ростом активизируется абразивный износ инструмента вследствие микрорезания поверхности инструмента твердыми включениями (в основном карбидами), входящими в обрабатываемый материал. Изнашивание инструмента за счет адгезионного механизма взаимодействия интенсифицируется из-за повышения прочности адгезионных связей в результате увеличения нормальных напряжений в соответствии с выражением [2]

$$\tau_a = \tau_0 + \beta p, \quad (1)$$

где τ_0 – сдвиговое сопротивление адгезионной связи; p – коэффициент упругости адгезионной связи под действием нормальных напряжений.

© А. С. МАНОХИН, С. А. КЛИМЕНКО, М. Ю. КОПЕЙКИНА, С. АН. КЛИМЕНКО, В. В. РОЩУПКИН,

М. М. ЛЯХОВИЦКИЙ, 2014

Механическая активация, в том числе за счет тангенциальных напряжений на контактных участках, способствует протеканию химических реакций взаимодействия ПСТМ с элементами, входящими в состав обрабатываемого материала и окружающей среды, что приводит к быстрому износу инструмента.

В настоящей работе предпринята попытка оценки параметров термобарического нагружения инструмента – температуры резания и контактных напряжений, соответствующих различным механизмам контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием в зоне резания.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки температуры резания использовали экспериментально-расчетную методику [3, 4], базирующуюся на экспериментальных данных о температуре резания, измеренной с помощью искусственных термопар, расположенных на опорной поверхности режущей пластины из ПСТМ, и численных расчетов температуры в контрольной точке инструмента методом конечных элементов. Эта методика позволила получить математическую модель, описывающую зависимость температуры в контрольной точке инструмента от условий обработки.

Износ инструмента в процессе обработки также влияет на температуру резания. Анализ экспериментальных данных [5], которые характеризуют зависимость температуры резания закаленных углеродистых сталей от ширины фаски износа по задней поверхности резца с ПСТМ на основе КНБ, позволил описать такую зависимость выражением $T = 618h_3 + T_0$ ($h_3 = 0,05-0,6$ мм), где T_0 – температура резания острым инструментом.

Для определения зависимости контактных напряжений от режимов обработки инструментом с ПСТМ на основе КНБ проведена серия экспериментов по изучению сил резания.

Составляющие силы резания измеряли универсальным динамометром УДМ-600 конструкции “ВНИИинструмент” (Россия) и фиксировали в режиме реального времени с помощью специального аппаратно-программного комплекса, оснащенного персональным компьютером.

Внешний вид рабочих участков режущего инструмента и их химический состав исследовали с помощью растрового электронного микроскопа CamScan 4DV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа Link 850. Исследовали инструменты, оснащенные ПСТМ, в состав которых входило 97 % КНБ.

Все исследования производили при точении закаленной стали ШХ15 (60–62 HRC).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Графики зависимостей составляющих сил резания P_z , P_y от скорости резания (глубина резания – 0,2 мм, подача – 0,12 мм/об) представлены на рис. 1

В [6, 7] показано, что средняя удельная сила трения q_F при резании металлов является инвариантой и для широкого диапазона условий резания изменяется незначительно. При этом q_F определяется свойствами обрабатываемого материала и температурой резания: $q_{Fcp} = [1 - k_T 10^{-3}(\theta - 600^\circ)]S_B$ [6], где S_B – истинные напряжения в обрабатываемом материале в момент образования шейки при растяжении образца (для стали ШХ 15 твердостью 60–62 HRC $S_B = 1600$ МПа [8]). В данном случае коэффициент k_T принят 0,75, что наилучшим образом отображает влияние высоких температур на свойства материала при

обработке инструментом с ПСТМ и обеспечивает сходимость расчетных и экспериментальных значений составляющих силы резания.

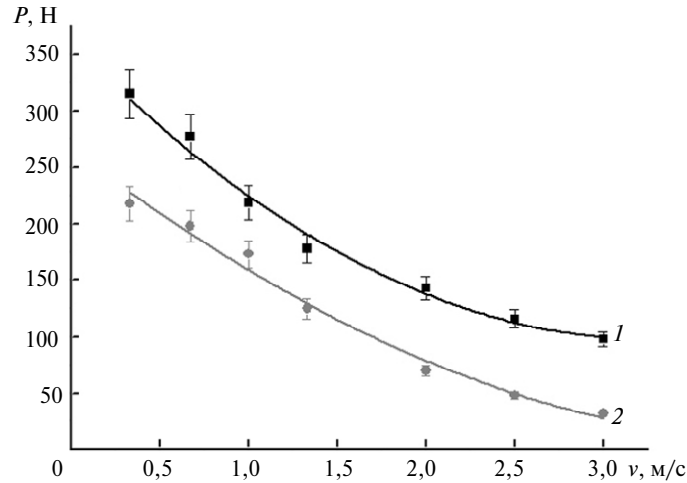


Рис. 1. Зависимость составляющих силы резания P_z (1), P_y (2) от скорости резания.

Нормальные напряжения находим из уравнения

$$P_y = N = q_N L b, \quad (2)$$

где $L = a_{cp} \xi^{0,1} \left(\xi(1 - \operatorname{tg}(\gamma)) + \frac{2}{\cos(\gamma)} \right)$ [9]; ξ – усадка стружки, которая при обработке стали ШХ15 (60–62 HRC) аппроксимируется экспериментально полученной зависимостью от скорости резания:

$$\xi(v) = \begin{cases} 0,79v^2 - 4,15v + 6,4 & \text{при } v \leq 1,4 \text{ м/с;} \\ 11,69e^{\frac{-v}{0,617}} + 3,48e^{\frac{-v}{0,043}} + 0,92. & \end{cases} \quad (3)$$

Максимальные значения контактных напряжений определяли, принимая во внимание эпюру их распределения вдоль передней поверхности инструмента:

$$q_N = \frac{\sigma_{Ncp} L_1}{\int_0^L \left(1 - \frac{x}{L}\right)^n dx}, \quad (4)$$

где L_1 – единичная длина; $n = 2,1$, откуда $q_N = 3,1q_{Ncp}$.

С учетом формы эпюры распределения тангенциальных контактных напряжений – $q_F = \frac{4}{3}q_{Fcp}$. При проверке соответствия рассчитанных составляющих силы резания их экспериментальным значениям рассматривали составляющие силы резания на задней поверхности инструмента, оцененные методом экстраполяции на нулевую толщину среза – при скорости резания 2,00 м/с они составляют $P_{z3} = 1,2$ Н и $P_{y3} = 71,3$ Н на единицу длины активного участка режущей кромки.

Графики зависимости максимальных контактных напряжений и температуры резания от скорости резания приведены на рис. 2. Как свидетельствуют результаты расчетов, при увеличении скорости резания до 3,0 м/с температура резания достигает значения 1250 °С.

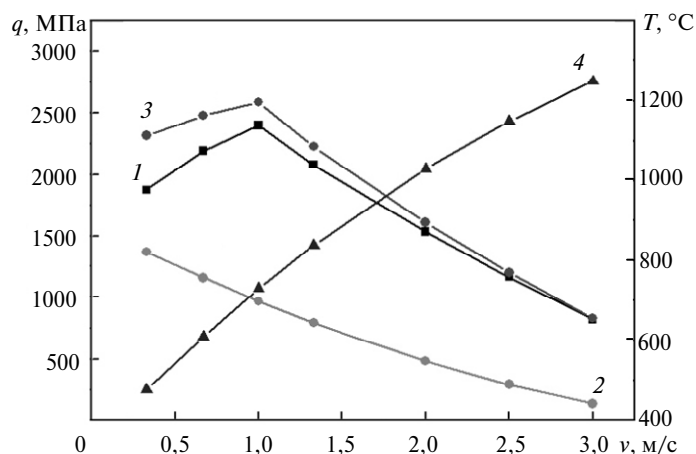


Рис. 2. Зависимость максимальных нормальных q_N (1), касательных q_F (2), эквивалентных $q_\Sigma = \sqrt{q_N^2 + q_F^2}$ (3) контактных напряжений и температуры резания (4) от скорости резания.

Зависимость нормальной составляющей максимальных контактных напряжений от скорости резания имеет экстремальный характер с максимумом 2,4 ГПа при $v = 1,0$ м/с. Наличие экстремума объясняется влиянием роста температуры резания, а также снижением усадки стружки и длины контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента в диапазоне скоростей резания до $v = 1,0$ м/с. Как следствие, площадь контакта в данных условиях уменьшается более интенсивно по сравнению с нормальной составляющей силы резания на передней поверхности резца, что и обуславливает рост q_N . Тангенциальная составляющая контактных напряжений монотонно снижается при увеличении скорости резания от 0,33 до 3,00 м/с и составляет при указанных скоростях 1,37 и 0,14 ГПа соответственно.

Анализ полученных результатов дает возможность оценить верхнее значение термобарической нагрузки на режущий инструмент с ПНТМ на основе КНБ в широком диапазоне режимов резания при обработке закаленной стали ШХ 15. В свою очередь, это позволяет установить механизм изнашивания инструмента, характерный для конкретного диапазона температур и напряжений на рабочих поверхностях инструмента.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ данных по морфологии изношенных поверхностей инструментов с ПСТМ, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии, данных рентгеновского микроанализа о химических соединениях на контактных участках инструмента и результатов моделирования термобарического нагружения инструмента позволяет установить соответствие между механизмом контактного взаимодействия, обуславливающим изнашивание режущего инструмента, и условиями реализации процесса резания. Сопоставление полученных результатов с данными, приведенными на рис. 2, позволяет устано-

вить связь между параметрами термобарического нагружения инструмента в контактной зоне и механизмом изнашивания инструмента. Это дает возможность конкретизировать требования, предъявляемые к свойствам инструментального композита, параметрам его структуры и химическому составу, с целью оптимизации работоспособности режущих инструментов в заданном диапазоне условий эксплуатации.

Абразивный механизм изнашивания

Абразивное изнашивание обусловлено тем, что твердые включения в материале изделия, внедряясь в инструмент на его контактных поверхностях, царапают их, действуя как микрорезцы. В связи с высокой твердостью частиц КНБ, абразивный износ инструмента зависит от количества связки в ПСТМ. Наиболее сильно абразивное изнашивание проявляется, если инструментальный композит характеризуется низким содержанием КНБ, а также используется мягкая связующая компонента или ее твердость снижается с ростом температуры интенсивнее, чем твердость абразивных включений в обрабатываемом материале.

Абразивное изнашивание инструмента может быть связано с явлением “самоизнашивания” [10]. Источником частиц, обуславливающих “самоизнашивание”, является закругленный участок режущей кромки инструмента, откуда частицы ПСТМ удаляются за счет усталостных явлений и адгезионного взаимодействия с материалом изделия и, попадая на контактные поверхности инструмента со стороны передней и задней поверхностей, формируют их волнистый рельеф (рис. 3). Вероятно, этим механизмом определяется износ инструмента при точении материалов, не имеющих твердых включений.

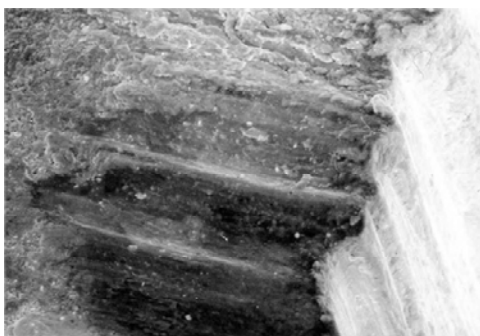


Рис. 3. Рабочий участок инструмента со следами “самоизнашивания”.

Изучение снимков изношенных поверхностей инструмента (в том числе представленных на рис. 4) показывает, что механизм абразивного изнашивания наиболее интенсивно влияет на структуру и морфологию контактных рабочих поверхностей инструмента с ПСТМ на основе КНБ в диапазоне скоростей резания до $\sim 1,25$ м/с. С дальнейшим ростом скорости резания количество следов износа – канавок и царапин, расположенных вдоль направления вектора скорости резания на задней поверхности и направления схода стружки на передней поверхности, значительно снижается.

Учитывая полученные выше данные о значениях напряжений и температур резания, можно сделать вывод о том, что абразивный механизм наиболее интенсивно влияет на состояние контактных поверхностей инструмента с ПСТМ на основе КНБ в диапазоне температур резания до 930 °С и контактных напряжениях $q_N \approx 1,85\text{--}2,40$ ГПа; $q_F \approx 1,40\text{--}0,85$ ГПа, $q_\Sigma \approx 2,3\text{--}2,6$ ГПа.

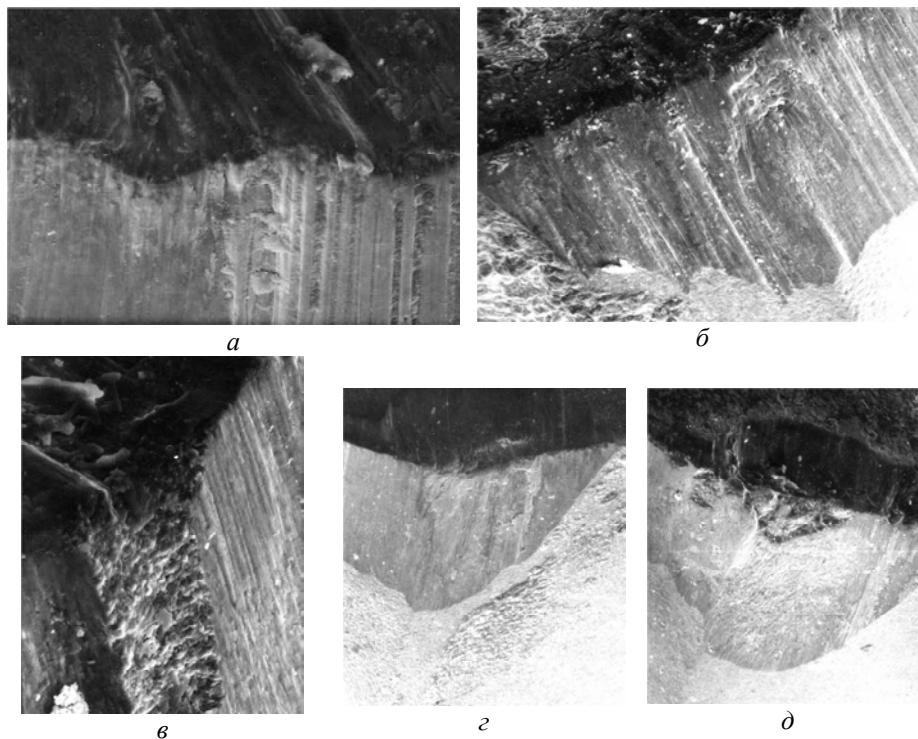


Рис. 4. Изношенные участки инструмента с ПСТМ на основе КНБ при скоростях резания $v = 0,50$ (а), $0,83$ (б), $1,25$ (в), $1,67$ (г), $2,10$ (д) м/с (износ по задней поверхности инструмента $h_3 = 0,24$ мм).

Адгезионный механизм изнашивания

Высокие давления в зоне резания приводят к микросхватыванию (прилипание, молекулярное сцепление) на участках контактных поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом, т. е. к образованию “мостиков адгезии”. Движение стружки приводит к образованию в них напряжений сдвига, а разрушение сопровождается вырыванием отдельных фрагментов материала инструмента (рис. 5, [11]) и, как следствие, имеет место адгезионное изнашивание инструмента.

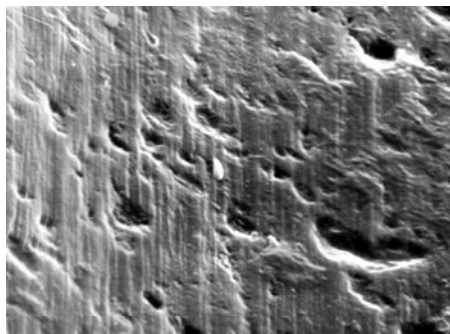


Рис. 5. Характерный вид контактной поверхности инструмента после адгезионного изнашивания (обработка стали 48–52 HRC инструментом из ПСТМ гексанит-Р).

Для оценки роли адгезионного взаимодействия в процессах трения и изнашивания на рабочих поверхностях инструмента проведены специальные модельные исследования [2], в которых определяли сдвиговую прочность

адгезионной связи при контактных давлениях и температурах, близких к имеющим место в зоне резания. Закономерность ее изменения при фрикционном взаимодействии описывается уравнением (1).

Указанные параметры являются функциями контактной температуры [2]. Сдвиговое сопротивление адгезионной связи в диапазоне температур 200–1000 °С увеличивается, достигая максимума при 600–700 °С, что обусловлено противоположным влиянием двух причин: термической активацией адгезионного взаимодействия и снижением прочности мостиков схватывания под действием температуры на контактных участках. Коэффициент упрочнения адгезионной связи с увеличением температуры до 1000 °С снижается в 1,1–1,3 раза. Для закаленной стали его значение составляет 0,05–0,06.

На рис. 6 [2] приведена зависимость коэффициента адгезии ($n = \tau_a/R_{p0,2}$, где $R_{p0,2}$ – предел текучести материала при непропорциональном удлинении) от температуры для случаев контакта ПСТМ на основе КНБ с углеродистой сталью ($HB = 2,0$ ГПа) и серым чугуном ($HB = 1,7–2,2$ ГПа).

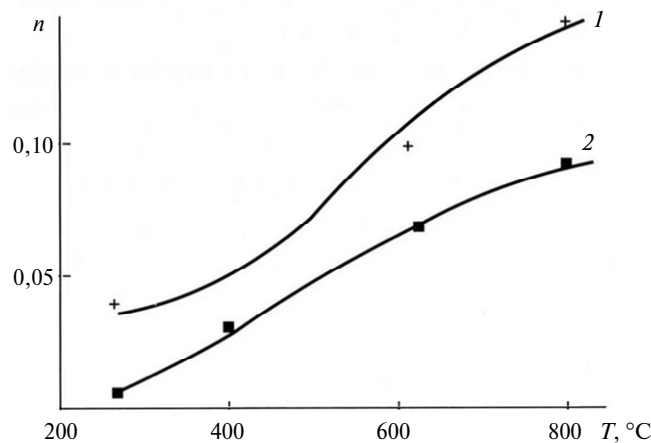


Рис. 6. Зависимость коэффициента адгезии от температуры при взаимодействии ПСТМ на основе КНБ с углеродистой сталью (1) и серым чугуном (2).

Видно, что адгезия с ростом температуры на контактных участках возрастает, при этом коэффициент адгезии для стали в 1,5–2,0 раза выше, чем для чугуна. Коэффициент упрочнения адгезионной связи не столь существенно меняется от температуры (в 1,1–1,3 раза при изменении температуры от 200 до 900 °С). Для закаленной стали он в 3–4 раза ниже, чем для “сырой”. Оценка сил адгезии на задней поверхности инструмента с ПСТМ по приведенной выше зависимости показала, что при фрезеровании незакаленной стали процесс трения в значительной степени обуславливается адгезией контактирующих материалов – сила адгезии достигает 70 % от суммарной силы трения. При обработке закаленной стали и серого чугуна доля сил адгезии составляет менее 20–30 % от суммарной силы трения.

Несмотря на относительно небольшой вклад адгезионного взаимодействия контактирующих материалов в изнашивание инструмента при обработке закаленной стали и серого чугуна, данный механизм в значительной степени интенсифицирует абразивное изнашивание контактных поверхностей. Это происходит в результате вырывания из поверхностного слоя ПСТМ отдельных частиц материала, которые способствуют интенсификации абразивного

взаимодействия на контактных участках инструмента за счет отмеченного выше механизма “самоизнашивания”.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что адгезионная составляющая механизма изнашивания влияет на интенсивность износа инструмента приблизительно в том же диапазоне термобарических параметров, что и абразивное взаимодействие в зоне резания – т. е. при температурах от 600 до 800 °С и контактных напряжениях $q_N \approx 2,1-2,4$ ГПа, $q_F \approx 1,2-0,85$ ГПа, $q_\Sigma \approx 2,3-2,4$ ГПа.

Химическое взаимодействие и образование эвтектических соединений в зоне контакта материалов инструмента и обрабатываемого изделия

При обработке инструментами с ПСТМ на основе КНБ на неконтактных участках передней и задних поверхностей инструмента имеет место формирование своеобразного налета из продуктов химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов (рис. 7, а), а в окружающей зону резания газовой среде присутствуют частицы сферической формы с ярко выраженной дендритной структурой (рис. 7, б) [12]. В состав указанных продуктов входят химические элементы, содержащиеся в контактирующих материалах и окружающей среде (Fe, Cr, Si, B, N, O, ...).

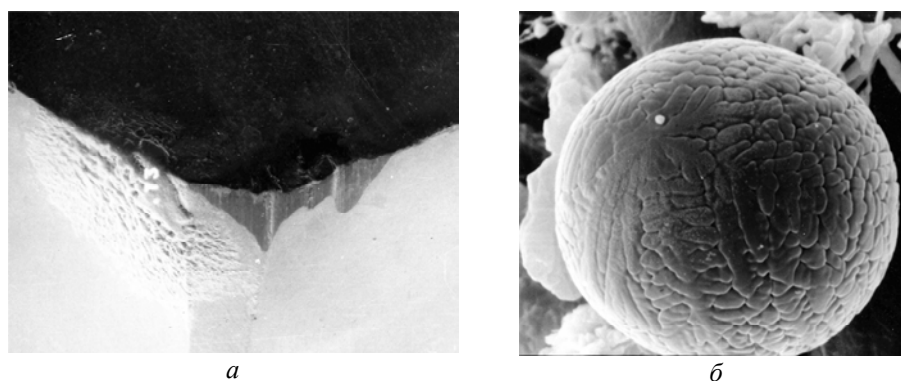


Рис. 7. Продукты износа инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ: а – на задней поверхности инструмента; б – отобранные из окружающей среды.

Образование налета на неконтактных поверхностях инструмента и сферических частиц в окружающей зону резания среде объясняется присутствием на контактных участках инструмента со стружкой и инструмента с обрабатываемым изделием жидкой фазы, которая в процессе резания выносится за границы зон контакта. Жидкие продукты взаимодействия за счет кинетической энергии стружки частично выбрасываются в окружающую газовую среду и в свободном состоянии кристаллизуются в виде сферических частиц, что отвечает термодинамически наиболее выгодной форме – с минимумом площади поверхности при максимуме объема.

Результаты экспериментов свидетельствуют о протекании в зоне резания процессов химического взаимодействия контактирующих материалов между собой и с элементами окружающей среды.

Возможность протекания химических реакций между материалами инструмента и изделия подтверждается термодинамическими расчетами [8, 13]. Термодинамический потенциал Гиббса химической реакции $cBN + xMe \rightarrow Me_xB + 0,5N_2$ при нагреве определяется по зависимости

$$\Delta G_r(T) = \Delta G_{\text{Me}_x\text{B}}(T) - \Delta G_{\text{cBN}}(T) + \int_0^p \Delta V_{\text{Me}_x\text{B-cBN-xMe}} dp + 0,5RT \ln \frac{p}{p_0}, \quad (5)$$

где $\Delta G_{\text{Me}_x\text{B}}(T)$, $\Delta G_{\text{cBN}}(T)$ – термодинамический потенциал Гиббса реакции образования борида металла и КНБ соответственно; T – температура; ΔV – изменение мольного объема системы; p – давление на контактном участке инструмента; p_0 – парциальное давление азота, выделяющегося при взаимодействии материалов инструмента и изделия; R – универсальная газовая постоянная.

Большое влияние на температуру начала процессов химического взаимодействия в зоне резания оказывают нормальные и тангенциальные напряжения на контактных участках инструмента. Проведенными исследованиями установлено, что при наличии в контактной зоне парциального давления азота 100 Па и давления на передней поверхности инструмента 3–5 ГПа, начало химического взаимодействия между железом и КНБ с образованием боридов железа и свободного азота соответствует температурам в зоне резания.

Как известно [14], для системы Fe–(Fe–B) при температуре 1177 °С характерен эффект контактного плавления эвтектики Fe–FeB₂. Учитывая необходимость наличия для реализации этого эффекта борида железа, в рассматриваемом случае можно говорить о контактно-реактивном плавлении.

Процесс резания сопровождается термотрибоактивацией поверхностных слоев контактирующих материалов, поэтому в зоне контакта могут образовываться соединения, температура плавления которых ниже температур плавления контактирующих материалов и ниже температуры резания. Учитывая, что процесс обработки происходит в присутствии кислорода воздуха, в зоне контакта могут протекать химические реакции с образованием тройных соединений (например, оксидов железа), для которых температура контактно-реактивного плавления имеет меньшее значение.

Таким образом, контакт между инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ, стружкой и обрабатываемым изделием происходит через слой жидкой фазы, состоящей из продуктов химического взаимодействия контактирующих материалов между собой и с элементами окружающей среды. Изнашивание инструмента, связанное с химическим взаимодействием в зоне резания, имеет место в широком диапазоне скоростей резания. Анализ микроснимков рабочих поверхностей инструмента показывает, что налет из продуктов химического взаимодействия на передней и задней поверхностях инструмента наблюдается место и при небольших, около 0,5 м/с (рис. 8, а), скоростях резания, но влияние отмеченного эффекта на изнашивание инструмента существенно возрастает в диапазоне высоких скоростей (температур) резания (рис. 8, б, в, д).

Химическое взаимодействие между материалами инструмента и обрабатываемого изделия активизируется при скоростях резания > 0,8 м/с ($T \approx 780$ °С) и изменяет общую картину процесса изнашивания инструмента. Внешний вид изношенных поверхностей инструмента с ПСТМ подтверждает, что в процессе резания на контактных участках инструмента происходят механохимические явления – на задней поверхности инструмента формируются вторичные структуры 1-го рода, а на передней – вторичные структуры комбинированного характера с преобладанием структур 2-го рода (по Б. И. Косецкому).

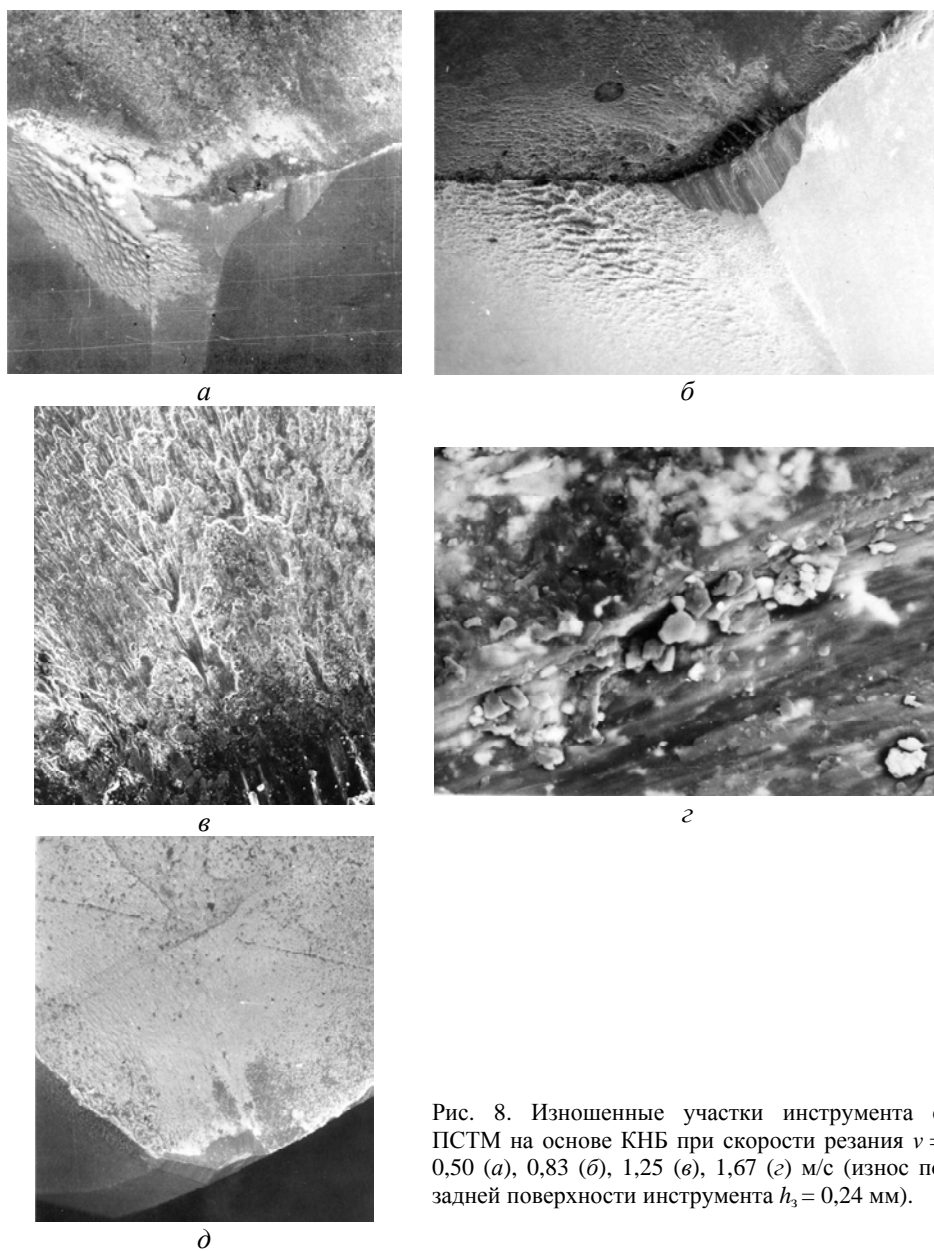


Рис. 8. Изношенные участки инструмента с ПСТМ на основе КНБ при скорости резания $v = 0,50$ (а), $0,83$ (б), $1,25$ (в), $1,67$ (г) м/с (износ по задней поверхности инструмента $h_3 = 0,24$ мм).

При скорости резания $1,25$ м/с и ширине фаски износа по задней поверхности инструмента до $0,24$ мм ($T = 950$ °С) на передней поверхности инструмента появляются широкие неглубокие борозды. На контактных поверхностях инструмента наблюдается интенсивное разрушение пленок вторичных структур (см. рис. 8, в).

С увеличением скорости резания до $1,66$ м/с ($T \approx 1070$ °С) изношенные поверхности инструмента имеют более сглаженный вид. Борозды значительно уменьшаются как по ширине, так и по глубине. Вероятно, в этих условиях процессы химического взаимодействия материалов инструмента и изделия значительно интенсифицируются, доля механического взаимодействия контактирующих материалов снижается, а следы абразивного изнашивания сглаживаются.

Таким образом, рассмотренный механизм взаимодействия наиболее значим при температурах резания $T = 1000\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$ и контактных напряжениях $q_N \approx 2200\text{--}0,8\text{ ГПа}$, $q_F \approx 0,85\text{--}0,13\text{ ГПа}$, $q_\Sigma \approx 2,4\text{--}0,82\text{ ГПа}$, что в нашем случае соответствует обработке со скоростями резания $> 1,5\text{ м/с}$.

Изнашивание, связанное с окислением материала инструмента

Как отмечалось выше, процесс резания, особенно при $T > 1000\text{ }^\circ\text{C}$, сопровождается образованием на контактных поверхностях инструмента соединений с более низкой, по сравнению с материалами инструмента и изделия, температурой плавления. В результате контактно-реактивного плавления взаимодействие инструмента со стружкой и заготовкой происходит в присутствии жидкой фазы. Еще одной причиной образования жидкой фазы на контактных поверхностях инструмента является окисление ПСТМ на основе КНБ.

Для изучения окисления инструментального материала были проведены специальные модельные эксперименты [15]. На рис. 9 приведены данные кинетических исследований ПСТМ с высоким содержанием кубического нитрида бора. Анализ изотерм свидетельствует о том, что при $800\text{ }^\circ\text{C}$ образцы начинают окисляться и степень окисления незначительно увеличивается с ростом температуры до $900\text{ }^\circ\text{C}$. Изотерма окисления композита при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ отвечает условиям интенсивного образования газообразных продуктов окисления.

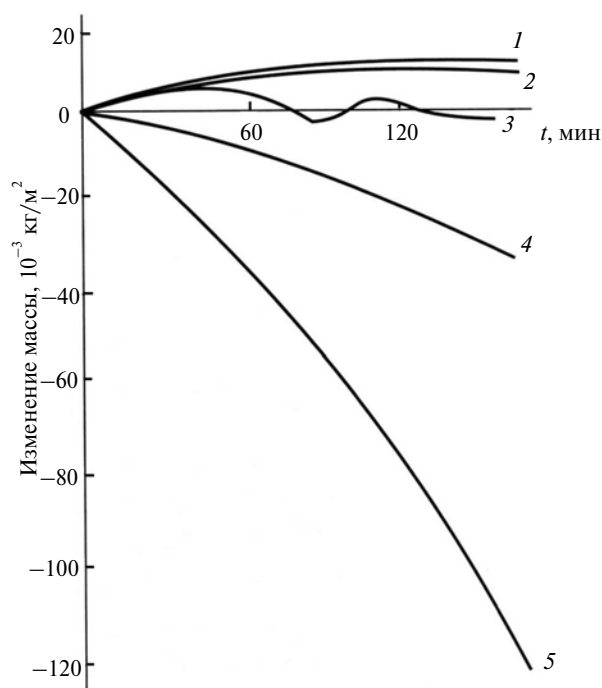


Рис. 9. Изотермы окисления ПСТМ на основе КНБ при температуре 800 (1) , 900 (2) , 1000 (3) , 1100 (4) , $1200\text{ (5)}\text{ }^\circ\text{C}$.

Дальнейший рост (до $1200\text{ }^\circ\text{C}$) температуры приводит к интенсивному окислению материала, испарению оксидов бора и удалению свободного азота. На рис. 10 приведены термограммы окисления ПСТМ. Начало окисления

образцов, содержащих 97 % (по массе) КНБ, соответствует 700 °С и сопровождается прибылью массы с незначительной скоростью реакции. В интервале температур 700–1100 °С происходит окисление имеющихся в составе композита включений. Из-за высокой плотности материала диффузия кислорода воздуха к внутренним слоям ПСТМ затруднена, что приводит к снижению скорости реакции окисления. При температурах 1100–1200 °С скорость реакции увеличивается. При нагреве до 1200 °С начинается уменьшение массы образца, скорость этого процесса резко увеличивается с ростом температуры до 1460 °С и сопровождается эндотермическим эффектом.

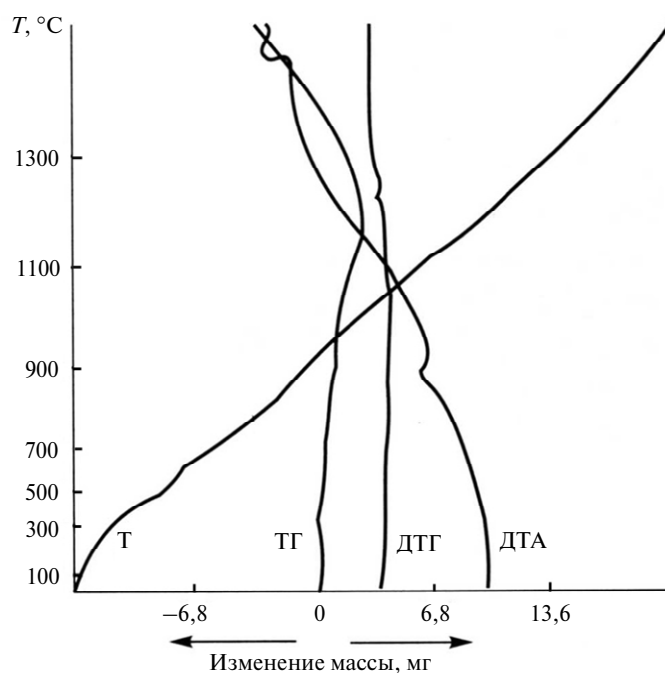


Рис. 10. Термограмма окисления ПСТМ на основе КНБ: ТГ – изменение массы образца; DTG – скорость изменения массы образца; ДТА – тепловые эффекты в образце; Т – температура.

Скорости резания 0,75 м/с при точении закаленной стали в принятых условиях отвечает температура на контактных участках инструмента ~ 730 °С (ширина фаски износа по задней поверхности инструмента $h_3 = 0,15$ мм). При такой температуре окисление материала инструмента только начинает проявляться (см. рис. 9, 10). В то же время жидкая фаза в зоне контакта инструмента со стружкой и изделием уже присутствует, что связано со значительно более высокой температурой на локальных пятнах вспышки на поверхностях трения в зоне пластического контакта [16]. Увеличение скорости резания до 3,0 м/с сопровождается ростом средней (1000–1300 °С) температуры на контактных участках инструмента – в этих условиях при работе на воздухе резко интенсифицируется окисление материала инструмента.

В отношении анализа влияния окисления материала инструмента на формирование жидкой фазы в зонах контакта инструмента со стружкой и изделием следует иметь ввиду экспериментально подтвержденный факт, свидетельствующий о наличии низкотемпературной эвтектики в системе $B_2O_3-Fe_2O_3$ при температурах 830–850 °С [8].

Таким образом, в механизме изнашивания инструмента, обусловленного химическим взаимодействием в зоне резания, кроме контактно-реактивного плавления следует выделить составляющую, связанную с окислением материала инструмента. Она активно влияет на интенсивность изнашивания инструмента с ПСТМ с высоким содержанием КНБ при $T > 1100\text{ }^\circ\text{C}$ (при повышенных скоростях резания). Анализ результатов исследований показывает, что в таких условиях механизм контактно-реактивного плавления продуктов взаимодействия определяет 20–30 % износа инструмента, а на долю износа, обусловленного окислением материала инструмента, приходится до 50 % [8]. Оценка термобарических параметров, связанных с окислением ПСТМ, показывает, что в этом случае температура резания составляет $\geq 1100\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$, а контактные напряжения – $q_N \approx 0,8\text{--}1,3\text{ ГПа}$, $q_F \approx 0,13\text{--}0,37\text{ ГПа}$, $q_\Sigma \approx 1,3\text{--}0,8\text{ ГПа}$.

ВЫВОДЫ

Приведенные выше результаты исследований позволяют сформировать диаграмму (карту) механизмов изнашивания инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, при точении закаленной стали ШХ15 в зависимости от термобарических условий на контактных поверхностях инструмента – температуры резания и контактных напряжений (рис. 11).

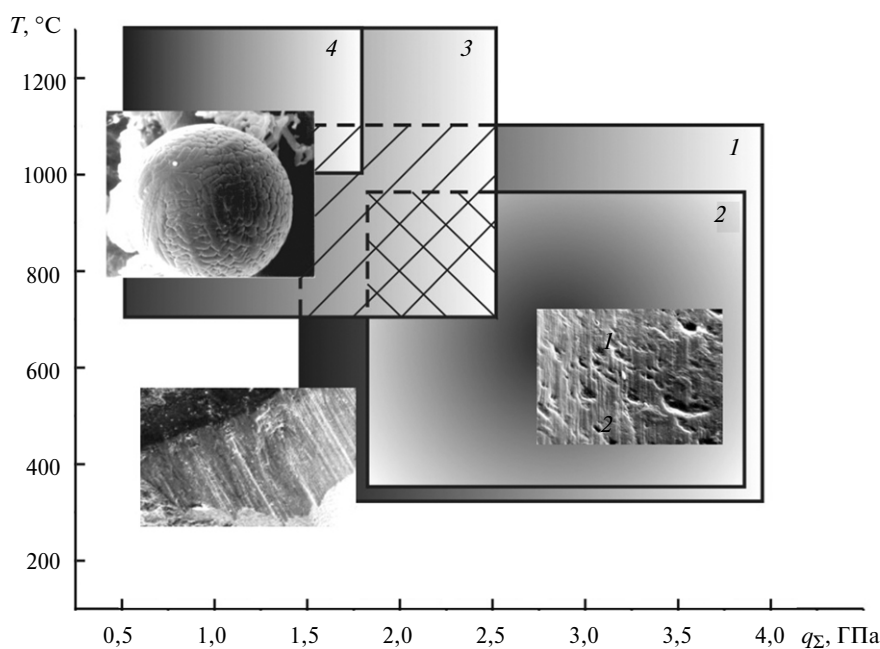


Рис. 11. Диаграмма механизм изнашивания–условия термобарического нагружения инструмента: абразивное (1), адгезионное (2), химическое (3, 4) изнашивание (3 – за счет контактно-реактивного плавления продуктов взаимодействия; 4 – за счет окисления материала инструмента); увеличение интенсивности окрашивания соответствует увеличению интенсивности изнашивания.

При значительных температурах резания (характерных для процессов с высокой производительностью) химическое взаимодействие контактирующих материалов и окисление материала инструмента приводит к резкому снижению работоспособности режущего инструмента.

Перспективным путем повышения производительности обработки и стойкости инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, является управление механизмами физико-химического взаимодействия материалов инструмента и изделия с учетом действия окружающей среды.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что управление рассмотренными механизмами изнашивания инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, обеспечивающее минимизацию интенсивности контактного взаимодействия материалов инструмента и изделия в зоне резания, позволяет повысить эффективность обработки изделий из сталей и сплавов высокой твердости.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГФФИ Украины № Ф53/101–2013 и РФФФИ № 13-08-9042.

Розглянуто механізми контактної взаємодії в зоні різання інструментом, оснащеним ПНТМ на основі КНБ, і показано їх зв'язок з умовами термобаричного навантаження на інструмент – температурою різання і контактними напруженнями.

Ключові слова: інструмент, кубічний нітрид бору, різання, температура різання, контактні напруження, зношування.

The mechanisms of interaction between contact regime in the cutting tool equipped with PSTM based on the cBN, and their connection with the thermobaric conditions of loading on the tool – cutting temperature and the contact stress.

Keywords: cutting tool, cubic boron nitride, cutting, the cutting temperature, contact stresses, wear.

1. Трент Е. М. Резание металлов: пер. с англ. / Е. М. Трент. – М.: Машиностроение, 1980. – 263 с.
2. Захаренко П. В. Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвердых материалов / П. В. Захаренко, В. М. Волкогон, А. В. Бочко и др. – К.: Наук. думка, 1992 – 188 с.
3. Клименко С. А., Муковоз Ю. А., Полонский Л. Г., Мельничук П. П. Точение износостойких защитных покрытий. – К.: Техніка, 1997. – 144 с.
4. Манохин А. С., Клименко С. А. Методика определения температуры резания при обработке инструментом с ПКНБ // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. – Вып. 3 (63). Новые технологии в машиностроении. – Харьков: ХАИ, 2010. – С. 92–98.
5. Коломиец В. В., Зубарь В. П., Голик В. В., Колганенко В. В. Экспериментальное определение температурного поля реза из эльбора-Р // Синтет. алмазы. – 1977. – № 1. – С. 28–30.
6. Кушнер В. С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1982. – 180 с.
7. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 150 с.
8. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко. – К., 2006. – 316 с.
9. Розенберг Ю. А. Резание материалов. – Курган: Изд-во ОАО “Полиграфический комбинат Зауралье”, 2007. – 292 с.
10. Бухштейн В. И., Тихонцов А. М., Волкогон В. М. и др. Исследование механизма износа двухслойных пластин К10Д при обработке закаленных хромистых сталей // Сверхтв. материалы. – 1989. – № 4. – С. 45–51.
11. Гартфельдер Вик. А., Гартфельдер Вал. А., Смирнова Н. Р. Изнашивание инструментов при точении закаленной стали // Триболог-5М: Мат. Всесоюз. семинара, Рыбинск, 1989. – М.: КСМ правления Союза НИО, 1989. – Ч. 2.
12. Klimentko S. A., Mukovoz Yu. A., Lyashko V. A. et al. On the mechanism of cubic boron nitride base cutting tools // Wear. – 1992. – 157. – P. 1–7.

13. *Turkevich V. Z., Klimenko S. A., Kulik O. G.* Thermodynamics of the interaction in the CBN-based tool material-Fe(Ni) system // FME Transactions. – 1999. – **XXVIII**, N 2. – P. 8–11.
14. *Кубашевски О.* Диаграммы состояния систем на основе железа: Справ. – М.: Металлургия, 1985. – 184 с.
15. *Огородник В. В., Ю. А. Муковоз, С. А. Клименко и др.* Термохимические свойства поликристаллов на основе кубического нитрида бора // Сверхтв. материалы. – 1993. – № 2. – С. 24–28.
16. *Клименко С. А., Клименко С. Ан., Бурикін В. В.* Аналітична оцінка величини температурних спалахів на контактних поверхнях інструменту з полікристалічних надтвердих матеріалів на основі КНБ // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2012. – Вип. 12. – С. 58–66.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины
Ин-т металлургии и материаловедения
им. А. А. Байкова РАН

Поступила 26.09.013