

УДК 621.9; 620.17; 620.19

doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-66-71

Вихревой механизм изнашивания твердосплавного инструмента

Ю.Г. Кабалдин, А.А. Башков, И.Д. Замураев, С.В. Иванов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Vortex wear mechanism of the carbide tools

Yu.G. Kabaldin, A.A. Bashkov, I.D. Zamuraev, S.V. Ivanov

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev

Исследован механизм изнашивания твердосплавного режущего инструмента, связанного с реализацией вихревых мод деформации в прирезцовых слоях стружки. Высокая степень деформации в приконтактных слоях стружки вызывает аморфизацию локальных объемов и поворот частиц обрабатываемого материала. Показано, что в отличие от ламинарного движения частиц стружки, при вихревом движении на зерно карбидной фазы дополнительно действует крутящий момент, что увеличивает амплитуду раскачки зерен и облегчает их вырыв. Указаны пути повышения износостойкости твердосплавного инструмента за счет осаждения твердых покрытий. Изложен механизм повышения стойкости инструмента при осаждении на него покрытий.

Ключевые слова: прирезцовые слои стружки, высокая степень деформации, вихревые моды, структура твердых сплавов, вырыв зерен карбидной фазы, износостойкость твердосплавного инструмента

The paper reveals and studies the mechanism of the carbide cutting tool wear associated with the vortex deformation modes in the chip near-cutting layers. High deformation degree in the chip near-contact layers causes amorphization of local volumes and rotation of the particles of the material being machined. It is shown that, the torque is additionally acting on the carbide phase grain in contrast to the laminar motion of chip particles in the vortex motion. This circumstance both increases the grains swing amplitude and facilitates their extraction. The ways to increase wear resistance of the carbide tools by deposition of the hard coatings are indicated. Mechanism is described for improving the tool life with the coating deposition on it.

Keywords: chip near-cutting layers, high degree of deformation, vortex modes, carbide alloy structure, carbide phase grain extraction, carbide tool wear resistance

Процессы трения и изнашивания режущего инструмента (РИ) принято рассматривать с позиции термодинамики открытых систем. В связи с этим в трибологических системах происходит накопление и рассеивание энергии упругой деформации ΔU_d и тепла Q [1–3]:

$$A_{\text{тр}} = \Delta U_d + Q, \quad (1)$$

где $A_{\text{тр}}$ — работа трения.

Уравнение (1) основано на первом и втором законах термодинамики. При этом полагают, что сила трения F и интенсивность изнашивания будут определяться диссипативными (вторичными) структурами, формируемыми в поверхностном (приконтактном) слое. Однако теория диссипативных структур не позволяет охватить все вопросы такого сложного явления, как процессы трения и изнашивания.

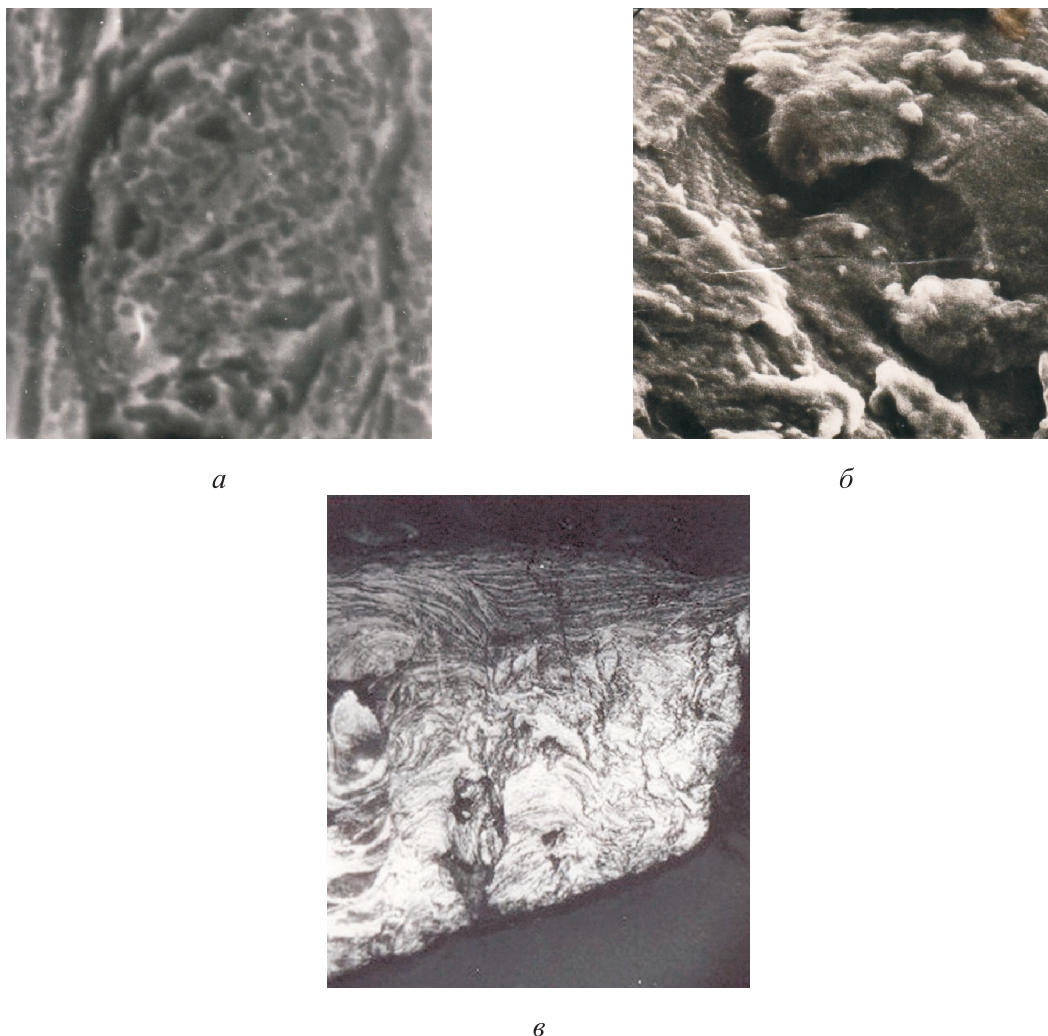


Рис. 1. Картины вихревого движения частиц ОМ в прирезцовых слоях стружки после резания стали 20 (при увеличении $\times 200$):

a — в толще стружки; *б* — на прирезцовой поверхности; *в* — на подошве нароста

Цель работы — изучение влияния вихревых мод деформации в прирезцовых слоях стружки на изнашивание РИ.

Изнашивание РИ — процесс постепенного удаления с поверхностного слоя частиц, соизмеримых с размером одного или нескольких зерен, реализуемый на мезоскопическом уровне [1, 2]. В ходе изнашивания РИ первичные очаги вырыва в виде отдельных зерен обусловлены, прежде всего, их раскачкой под действием вихревого движения частиц обрабатываемого материала (ОМ) в прирезцовых слоях стружки. Вырыв группы зерен происходит по другому механизму.

В работах [4, 5] показано, что процесс пластического течения частиц ОМ в тонких прирезцовых слоях стружки имеет сложный характер. При установившемся резании в прирезцо-

вых слоях стружки возможно плавление деформированных объемов ОМ и вихревое движение частиц (рис. 1). Вихревые структуры возникают на подошвах нароста и прирезцовой поверхности стружки (см. рис. 1), что приводит к раскачке и вырыву зерен карбидной фазы (рис. 2).

Схемы вырыва зерен при ламинарном и вихревом движениях частиц ОМ в прирезцовых слоях стружки приведены на рис. 3. Видно, что в отличие от ламинарного движения частиц стружки, при их вихревом движении на зерно карбидной фазы дополнительно действует крутящий момент M , что увеличивает амплитуду раскачки зерен Δ и облегчает их вырыв.

Условие отрыва зерна карбидной фазы с контактной поверхности твердосплавного РИ мелкомасштабным вихрем можно записать следующим образом:

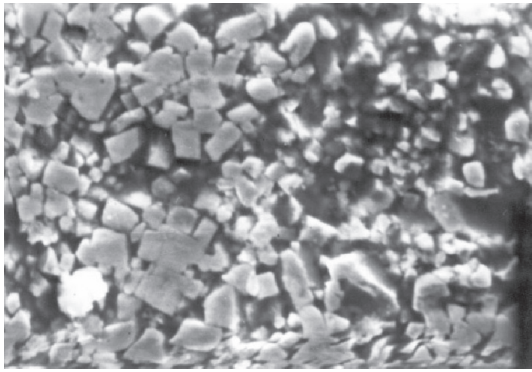


Рис. 2. Микроструктура сплава BK8 после резания стали 45 (при увеличении $\times 5000$)

$$F = \pi R^2 q_N; \quad F < F_0,$$

где F — сила сопротивления отрыву вихря; R — радиус зерна; q_N — удельное нормальное давление; F_0 — сила отрыва вихря.

Условие микроразрушения поверхностных слоев РИ можно представить как

$$\tau_p \gg \tau_a \gg \tau_F,$$

где τ_p — прочность самого слабого звена в структуре инструментального материала; τ_a — прочность адгезионной связи подошвы вихря с инструментальным материалом; τ_F — касательные напряжения на контактных поверхностях РИ.

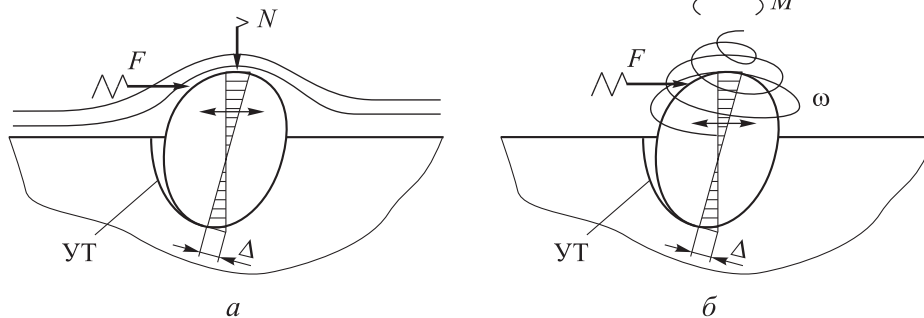


Рис. 3. Схемы вырыва зерен при ламинарном (а) и вихревом (б) движениях частиц ОМ в прирезцовых слоях стружки:

УТ — усталостная трещина; ω — угловая скорость вихря

Расчетные значения начальной собственной частоты зерна карбидной фазы в ТС при различных значениях среднего размера зерна

ТС	Начальная собственная частота $f_{0F} \cdot 10^{-9}$, Гц, при среднем размере зерна \bar{d} , мкм		
	1	3	6
WC + Co	8,90	2,90	1,40
WC + 40 % Co + 60 % Re	10,80	3,93	1,96
TiC + Co	15,40	5,20	2,64
TaC + Co	14,90	4,90	2,48

Структура твердых сплавов (ТС), широко применяемых в качестве материала РИ, включает в себя тугоплавкие карбиды (TiC, WC, TiCN и т. д.) и связующую фазу (кобальт, сплав никеля и молибдена и др.).

Расчетные значения начальной частоты собственных колебаний f_{0F} зерна карбидной фазы в разных ТС при различных значениях среднего размера зерна \bar{d} приведены в таблице. Видно, что начальные частоты собственных колебаний зерна карбидной фазы являются высокими. Аналогичные значения имеют начальные частоты собственных колебаний зерен в направлении силы $N f_{0N}$. Расчет частоты f_{0F} позволил определить степень влияния на нее размера зерна карбидной фазы, вида тугоплавкого соединения, материала связки и т. д.

Анализ результатов расчета позволяет заключить, что начальная частота собственных колебаний зерна карбидной фазы f_{0F} зависит от его массы (размера) больше, чем от вида связки и ее упругих характеристик (модулей упругости и сдвига). Кроме того, на частоту f_{0F} влияет толщина прослойки связующей фазы.

Расчет начальной собственной частоты колебаний зерна карбидной фазы f_{0F} позволил уточнить механизм вихревого износа ТС. В частности, напряжения и в целом усталостные процессы в связке будут определяться ин-

тенсивностью (амплитудой) раскочки зерна карбидной фазы, которая зависит не только от его массы (размера) и толщины связующей прослойки, но и от «приведенной» массы вследствие адгезионных явлений, особенно при увлечении зерна движущейся стружкой, когда амплитуда раскочки зерен и напряжения в связке будут резко возрастать.

В связи с этим начальная собственная частота колебаний зерна карбидной фазы f_{0F} будет снижаться, а коэффициент $K = \nu/f_{0F}$ (ν — частота, в первом приближении соответствующая частоте образования элемента стружки) возрастать.

Модели зерен карбидной фазы в ТС группы ВК на поверхности пластины, приведены на рис. 4, где *a* — зерна, полностью погруженные в кобальтовую связку ТС группы ВК; *б*, *в* — зерна, выступающие из нее на некоторую высоту после алмазной заточки.

Неоднородная циклическая деформация зерен поверхностных слоев под действием касательных напряжений на передней поверхности РИ τ_F повышает амплитуду раскочки зерен Δ и их вырыв (см. рис. 3).

Микротрещины, образующиеся на межзеренных и межфазных границах из-за циклического раскачивания зерен, карбидов или агрегатов в процессе резания, облегчают их вырыв с поверхности ТС, которые абразивно воздействуют на нижерасположенные зерна карбидов на контактной поверхности РИ.

Динамическая модель зерна тугоплавкого соединения в ТС показана на рис. 5, *a*. Зерно имеет как упругие связи вследствие контакта с другими зернами, так и демпфирующие из-за обволакивания его связующей фазой.

Экспериментальные исследования стойкости ТС различных марок при обработке нормализованной стали 45 показали, что у ТС группы ТТК эффективность выше, чем у ТС группы ТК и ВК. Это обусловлено прочностью как зерен ТаС, так и межзеренных и межфазных границ в сплавах группы ТТК.

Повышение износостойкости ТС достигается осаждением на них твердых покрытий [5–10]. Динамическая модель зерна тугоплавкого соединения в покрытии показана на рис. 5, *б*. В отличие от предыдущего случая (см. рис. 5, *a*), зерно тугоплавкого соединения в покрытии имеет только жесткие связи.

Покрытия — это сплошной нитридный (либо карбидный) каркас, обладающий низкой хрупкой прочностью (трещиностойкостью). Для уве-

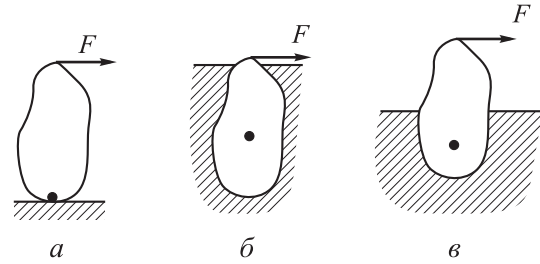


Рис. 4. Модели зерен карбидной фазы на поверхности пластины, полностью погруженных в кобальтовую связку ТС группы ВК (*a*) и выступающих из нее на некоторую высоту после алмазной заточки (*б*, *в*)

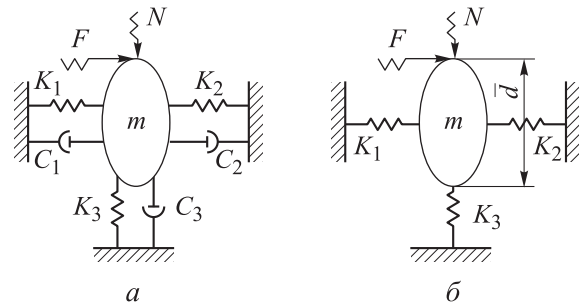


Рис. 5. Динамические модели зерна тугоплавкого соединения в ТС (*a*) и покрытия (*б*): K_1, K_2, K_3 — коэффициенты упругости; C_1, C_2, C_3 — коэффициенты демпфирования; m — масса зерна

личения этого параметра покрытие выполняют многослойным, т. е. в его состав вводят промежуточные мягкие слои из тугоплавких металлов. Это в свою очередь повышает демпфирующие свойства покрытия, трещино- и износостойкость твердосплавного инструмента.

Отсутствие кобальтовой связки в покрытиях уменьшает их адгезионную активность, а также интенсивность воздействия на контактные поверхности РИ вихревых мод деформации в прирезцовых слоях стружки, вследствие чего возрастает стойкость РИ [9].

Выводы

1. Исследован новый механизм изнашивания твердосплавного инструмента, обусловленный пластической неустойчивостью обрабатываемого материала в прирезцовых слоях стружки. Высокие удельные давления инициируют ротационные моды деформации.

2. Предложены пути снижения интенсивности вихревого механизма изнашивания РИ, зависящей от структуры инструментального материала (ТС).

Литература

- [1] Кабалдин Ю.Г. Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания твердых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1986, № 4, с. 127–131.
- [2] Кабалдин Ю.Г. *Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов*. Владивосток, Дальнаука, 1996. 188 с.
- [3] Рыжкин А.А. *Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов*. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2005. 311 с.
- [4] Кабалдин Ю.Г. Механизмы деформации срезаемого слоя и стружкообразование при резании. *Вестник машиностроения*, 1993, № 7, с. 25–30.
- [5] Кабалдин Ю.Г. Трение и износ при резании. *Вестник машиностроения*, 1995, № 1, с. 26–31.
- [6] Чапорова И.Н., Чернявский К.С. *Структура твердых сплавов*. Москва, Металлургия, 1975. 248 с.
- [7] Табаков В.П., Чихранов А.В. *Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающие в условиях непрерывного резания*. Ульяновск, УлГТУ, 2007. 255 с.
- [8] Кабалдин Ю.Г., Серый С.В. Оптимизация составов и функциональных свойств наноструктурных покрытий для режущего инструмента методом функционала электронной плотности. *Вестник машиностроения*, 2011, № 5, с. 49–54.
- [9] Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Шатагин Д.А. и др. *Выбор состава и структуры износостойких наноструктурных покрытий для твердосплавного режущего инструмента на основе квантово-механического моделирования*. Москва, Инновационное машиностроение, 2017. 216 с.
- [10] Верещака А.С. *Работоспособность режущего инструмента с покрытием*. Москва, Машиностроение, 1993. 336 с.

References

- [1] Kabaldin Yu.G. Structural-energetic approach to the wear process of hard alloys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 1986, no. 4, pp. 127–131. (In Russ.).
- [2] Kabaldin Yu.G. *Struktura, prochnost i iznosostoykost kompozitsionnykh instrumentalnykh materialov* [Structure, strength and wear resistance of composite tool materials]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1996. 188 p. (In Russ.).
- [3] Ryzhkin A.A. *Teplofizicheskie protsessy pri iznashivanii instrumentalnykh rezhushchikh materialov* [Thermophysical processes in wear of tool cutting materials]. Rostov-na-Donu, DGTU Publ., 2005. 311 p. (In Russ.).
- [4] Kabaldin Yu.G. Mechanisms of sheared layer deformation and chip formation during cutting. *Vestnik mashinostroeniya*, 1993, no. 7, pp. 25–30. (In Russ.).
- [5] Kabaldin Yu.G. Friction and wear at cutting. *Vestnik mashinostroeniya*, 1995, no. 1, pp. 26–31. (In Russ.).
- [6] Chaporova I.N., Chernyavskiy K.S. *Struktura tverdykh splavov* [Structure of hard alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 248 p. (In Russ.).
- [7] Tabakov V.P., Chikhranov A.V. *Iznosostoykie pokrytiya rezhushchego instrumenta, rabotayushchie v usloviyakh nepreryvnogo rezaniya* [Wear-resistant coatings of cutting tools operating under conditions of continuous cutting.]. Ulyanovsk, UIGTU, 2007. 255 p. (In Russ.).
- [8] Kabaldin Yu.G., Seryy S.V. Optimizing the composition and properties of nanostructural coatings for cutting tools on the basis of the electron-density functional. *Vestnik mashinostroeniya*, 2011, no. 5, pp. 49–54. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Engin. Res.*, 2011, vol. 31, no. 5, pp. 458–464, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X11050078>)
- [9] Kabaldin Yu.G., Kretinin O.V., Shatagin D.A. et al. *Vybor sostava i struktury iznosostoykikh nanostrukturnykh pokrytiy dlya tverdosplavnogo rezhushchego instrumenta na osnove kvantovo-mekhanicheskogo modelirovaniya* [Selection of composition and structure of wear-resistant nanostructured coatings for carbide cutting tools based on quantum-

mechanical modeling]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2017. 216 p. (In Russ.).

- [10] Vereshchaka A.S. *Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s pokrytiem* [Workability of cutting tools with coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 336 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.12.2022

Информация об авторах

КАБАЛДИН Юрий Георгиевич — заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева (603155, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: uru.40@mail.ru).

БАШКОВ Андрей Алексеевич — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева (603155, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: kicliu@mail.ru).

ЗАМУРАЕВ Иван Дмитриевич — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева (603155, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: iv_zamuraev@mail.ru).

ИВАНОВ Сергей Владимирович — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева (603155, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: ivanov.serega.2016@mail.ru).

Information about the authors

KABALDIN Yuriy Georgievich — Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Machine Building Technology and Equipment. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603155, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: uru.40@mail.ru).

BASHKOV Andrey Alekseevich — Postgraduate, Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603155, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: kicliu@mail.ru).

ZAMURAEV Ivan Dmitrievich — Postgraduate, Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603155, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: iv_zamuraev@mail.ru).

IVANOV Sergey Vladimirovich — Postgraduate, Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603155, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: ivanov.serega.2016@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кабалдин Ю.Г., Башков А.А., Замураев И.Д., Иванов С.В. Вихревой механизм изнашивания твердосплавного инструмента. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 6, с. 66–71, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-66-71

Please cite this article in English as:

Kabal'din Yu.G., Bashkov A.A., Zamuraev I.D., Ivanov S.V. Vortex wear mechanism of the carbide tools. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 6, pp. 66–71, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-66-71