

УДК 621.9:620.17: 620.19

doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-89-95

Влияние пластической неустойчивости приконтактных слоев стружки на механизм изнашивания твердосплавного инструмента

Ю.Г. Кабалдин, А.А. Башков

НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Influence of Plastic Instability of Near-contact Chip Layers on the Wear Mechanism of a Carbide Tool

Y.G. Kabaldin, A.A. Bashkov

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

Исследован механизм пластического деформирования прирезцового слоя стружки при резании углеродистых сталей и титанового сплава. Показано, что высокая степень деформации обуславливает плавление и вихревой характер движения в нем частиц обрабатываемого материала, вызывая интенсивное изнашивание твердосплавного инструмента.

Ключевые слова: прирезцовый слой стружки, высокая степень деформации, плавление материала, вихревое движение металла, изнашивание твердосплавного инструмента

The mechanism of plastic deformation of the incised chip layer during cutting of carbon steels and titanium alloy is investigated. It is shown that high degrees of deformation cause melting and the vortex nature of the movement of particles of the processed material in it, causing intensive wear of the carbide tool.

Keywords: cutting layer of chips, high degree of deformation, melting of material, vortex motion of metal, wear of carbide tool

Процесс пластического течения частиц обрабатываемого материала (ОМ) в тонких прирезцовых слоях стружки имеет сложный характер [1–5]. Исследования механизма потери их пластической устойчивости позволили выявить механизм изнашивания твердосплавного режущего инструмента (далее инструмент). Механизм потери пластической устойчивости при резании изучен недостаточно.

Цель работы — установление механизма реализации при резании вихревых мод деформации (пластической неустойчивости прирезцовых слоев стружки) и ее влияние на износ инструмента.

В результате исследования системы резания получены микрофотографии передней поверхности (ПП) инструмента из твердого сплава ВК8 (рис. 1) при резании углеродистой стали 10, характеризующей интенсивность адгезионных процессов, проявляющихся в виде приварившихся частиц ОМ (налипов), названной областью высокого давления (ОВД), так как она воспринимает высокие сжимающие напряжения (давления).

Анализ распределения частиц ОМ по ПП (рис. 1, а) и характера начального изнашивания контактных площадок (рис. 1, б) показывает, что наибольшие интенсивность адгезионных

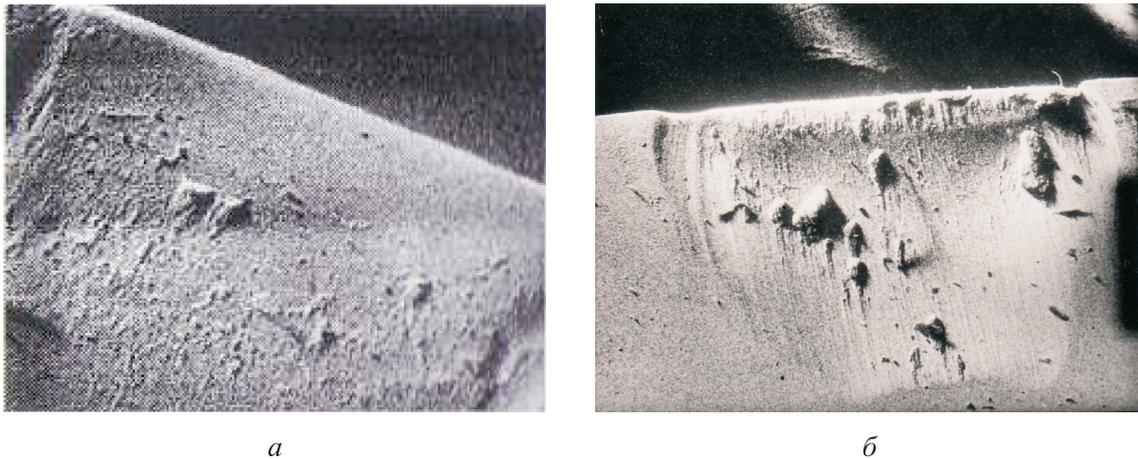


Рис. 1. Микрофотографии ПП инструмента из твердого сплава ВК8 при резании стали 10, характеризующие интенсивность его адгезионного взаимодействия со стружкой (увеличение $\times 1000$):
 а — распределение частиц ОМ, приварившихся после сдвига нароста, по ПП;
 б — формирование лунки и краевого износа на ПП инструмента

процессов и изнашивание инструмента наблюдаются на некотором удалении от его режущей кромки.

Наряду с ОВД возникают области низкого деформационного давления (ОНД). Схема образования ОВД и ОНД на ПП инструмента при наличии налипов ОМ (см. рис. 1, а) приведена на рис. 2. Установлено, что образование ОВД как на передней поверхности инструмента, так и на задней, оказывает большое влияние на механизм формирования развитого нароста и износ инструмента.

Образование ОВД способствует переходу от скольжения прирезцовой поверхности стружки по фактическим пятнам контакта на ПП инструмента, к пластическому срезу на нем заторможенных частиц ОМ. В местах адгезии на участке пластического контакта стружки с инструментом возникают локальные вихревые

структуры пластического движения, так как в модах пластического течения появляется вращательная (вихревая) компонента.

Иначе говоря, вместо так называемых фактических пятен контакта образуются структуры в виде ОВД из заторможенных частиц ОМ, которые воспринимают высокие сжимающие напряжения и последующий срез. Систему таких областей следует рассматривать как диссипативную динамическую структуру.

Экспериментально система таких областей фиксируется на ПП инструмента после его вывода из зоны резания (см. рис. 1, а). Микрофотографии подошв наростов, полученных при резании стали 10 со скоростью $v = 15$ и 35 м/мин, иллюстрирующие вихревой характер затормаживания частиц ОМ на ПП инструмента, приведены на рис. 3.

При металлографическом исследовании на подошвах наростов после их сдвига относительно ПП выявляется завихренная структура. Наличие вихревых структур свидетельствует о высокой степени деформации в прирезцовых слоях $\epsilon_{пр}$ [1] вследствие больших значений нормальной составляющей напряжения σ_N на рабочих поверхностях инструмента и реализации поворотных мод деформации, т. е. потери устойчивости ОМ.

Высокая степень деформации в прирезцовых слоях стружки и накопление дислокаций в локальных объемах может привести к искажению кристаллической решетки. Если принять, что удельная энергия деформации ΔU_d затрачивается на предельное искажение кристалли-

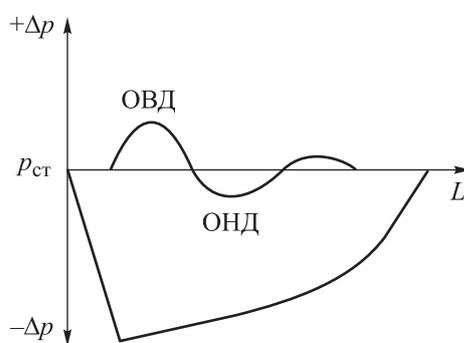


Рис. 2. Схема образования ОВД и ОНД на ПП инструмента при наличии налипов ОМ: Δp — давление в ОВД; $p_{ст}$ — нулевое давление на ПП; L — длина режущего лезвия

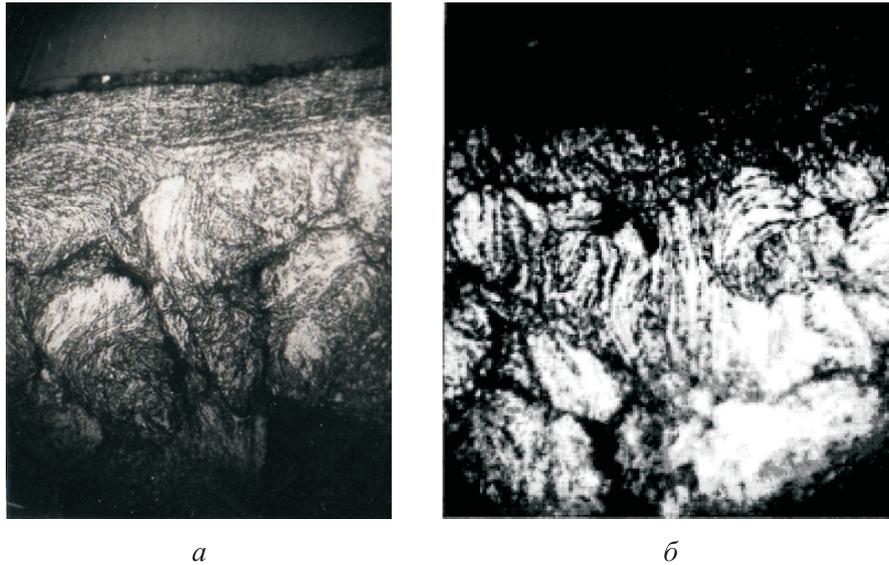


Рис. 3. Микрофотографии подошв наростов, полученных при резании стали 10 со скоростью $v = 15$ (а) и 35 м/мин (б), с увеличением $\times 200$

ческой решетки и нарушение межатомных связей [6], то можно записать

$$\Delta U_d = E_0 \rho_{кр},$$

где E_0 — удельная энергия дислокаций на единицу длины; $\rho_{кр}$ — критическая плотность дислокаций.

Расчеты показывают, что критическая плотность дислокаций $\rho_{кр}$ составила 10^{10} см⁻². При столь высоком значении $\rho_{кр}$ нарушается кристаллическое строение, и металл приближается к аморфному (квазижидкому) состоянию [6]. Предельное искажение кристаллической решетки обусловлено скоплением в локальных объемах металла критической плотности дислокации $\rho_{кр}$.

Электронографические исследования подтверждают аморфизацию кристаллической решетки деформируемых локальных объемов как в приконтактном слое стружки, так и в теле нароста.

Таким образом, при установившемся резании в прирезцовых слоях стружки может происходить плавление деформированных объемов ОМ, а также вихревое движение частиц (см. рис. 3). Подобная задача рассмотрена в классических работах [7, 8]. В первом приближении увеличение температуры в прирезцовом слое стружки при контакте с ПП инструмента можно оценить по выражению

$$\Delta T = \tau_s \varepsilon_{пр} / C_v,$$

где τ_s — напряжение текучести; C_v — теплоемкость.

Для стали $\tau_s = 5 \cdot 10^5$ Н/м², $\varepsilon = 30$, $C_v = 5000$ Дж/(м³·К). Подставляя указанные значения в это выражение, получаем $\Delta T = 1400$ К, что близко к температуре плавления, например, стали У8.

Результаты экспериментального исследования с использованием тонких фольг [2] показывают, что плотность дислокаций в локальных объемах может составлять около $10^{10} \dots 10^{12}$ см⁻², что свидетельствует о потери кристаллической решетки интенсивно деформируемых объемов металла и его переходе в квазижидкое состояние.

Таким образом, в локализованной ОВД прирезцового слоя на ПП инструмента могут появляться первичные очаги затормаживания частиц ОМ.

Материал на образование таких пластических волн расходуется из промежуточных областей: за волной возникает впадина (см. рис. 2), причем он может быть как обрабатываемым, превращенным в стружку, так и инструментальным (ИМ).

Расход материала на формирование таких волн компенсируется образованием продолжительной впадины на прирезцовом слое позади ОВД. С увеличением скорости резания частота генерации волн убывает, а с ростом толщины пластического слоя стружки — возрастает.

В связи с этим представляет интерес оценка времени действия (релаксации) деформационных волн и их энергии. Расчеты показывают, что время действия квазижидкой волны де-

формационного происхождения составляет около $10^{-2} \dots 10^{-5}$ с.

Энергия квазизидкой волны в первом приближении [5]

$$\Delta E = F_d v_b,$$

где F_d — сила, действующая на единицу длины дислокации; v_b — скорость движения волны.

Следует отметить, что как скорость движения, так и энергия волны деформационного происхождения существенно зависят от среды, в которой перемещается квазизидкая волна, т. е. от ОМ. В частности, у некоторых материалов скорость движения дислокаций близка к скорости звука. Причем скорость движения дислокаций в металлах с гранецентрированной кубической решеткой выше, чем в таковых с объемно-центрированной кубической решеткой. Скорость движения дислокаций также зависит от энергии дефекта упаковки металлов.

Кроме того, результаты расчетов показывают, что энергия такой волны превышает удельную энергию разрушения связующей фазы и зерен карбидной фазы в твердых сплавах.

Тепловая мощность волны [9]

$$Q_0 = 10^8 \rho^{1/3} \varepsilon_l q_0,$$

где ρ — плотность дислокаций; ε_l — степень деформации в локальных ОВД; q_0 — тепловая мощность одной дислокации.

Температура волны

$$T_b = A q_0 \sqrt{\tau_b},$$

где A — коэффициент; τ_b — время действия квазизидкой волны.

Результаты расчетов показывают, что при продолжительном времени действия квазизидкой волны $\tau_b = 10^{-5}$ с температура устанавливается практически мгновенно и превышает температуру плавления большинства ОМ.

Схемы формирования нароста и волн пластичности на ПП инструмента и образования локальных наливов вихревой структуры приведены на рис. 4, а и б. Здесь введены следующие обозначения: $C_{пл}$ и $C_{вн}$ — длина зоны пластического и внешнего контакта соответственно; h — толщина квазизидкого прирезцового слоя стружки; H — высота вихревого столба; ω — угловая скорость вихря; $v_{стр}$ — скорость стружки; v_b — скорость волны пластичности.

Таким образом, при резании ОМ пластическое течение приконтактных слоев стружки ведет к потере его устойчивости и созданию

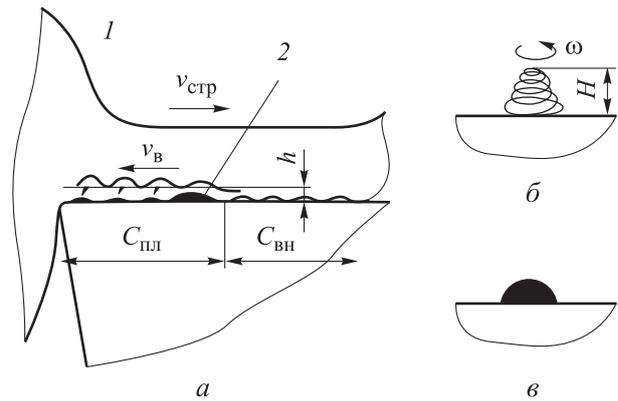


Рис. 4. Схемы формирования нароста и волн пластичности на ПП инструмента (а) и образования локальных наливов вихревой структуры (б, в):
1 — единенные области турбулентности;
2 — первичный заторможенный объем ОМ

единенных областей турбулентности 1 (см. рис. 4, а), погруженных в ламинарное течение, бегущих к режущему лезвию.

Как уже указывалось, волны из квазизидкого металла прирезцового слоя формируются в основном за счет материала стружки. Если же в образовании зародышей вихревой структуры участвует ИМ поверхностного слоя реза, то будет наблюдаться унос частиц инструмента из участка ОВД, т. е. его износ.

Микрофотографии шлифа среза лунки на ПП инструмента из твердого сплава Т15К6 после обработки титанового сплава приведены на рис. 5. По глубине лунки в ОМ, заполнившем ее, наблюдаются светлые пятна 1 вырванных частиц ИМ (рис. 5, а). Такой характер расположения частиц износа ИМ возможен только в жидком состоянии ОМ и при перемешивании слоев, что следует из детального рассмотрения шлифа.

Как видно на рис. 5, в, частицы износа находятся выше ПП инструмента, т. е. в толще стружки.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о совместном вихревом движении ОМ и частиц микроразрушения ИМ (т. е. об их перемешивании) в лунке и реализации поворотных мод деформации (потери устойчивости ОМ) [10].

Таким образом, пластическая неустойчивость прирезцовых слоев стружки (возникновение ротационной моды деформации при высокой степени деформации последней) способствует вырыванию частиц ИМ, которые перемещаются по ПП инструмента (см. рис. 5, а). Отрыв частиц

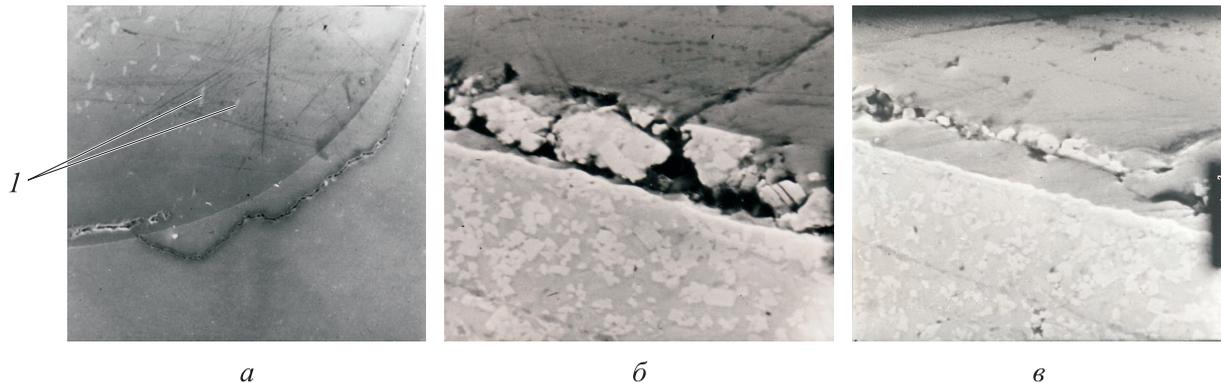


Рис. 5. Микрофотографии шлифа среза лунки на ПП инструмента из твердого сплава Т15К6 после обработки титанового сплава (с увеличением $\times 1500$):

a — заполнение лунки титановым сплавом с частицами износа *l*; *б*, *в* — вихревое движение частиц износа ИМ в лунке

ИМ происходит в результате их отрыва из-за усталостных процессов, либо вследствие локального отрыва частиц из-за их высокой прочности адгезионных связей с ОМ.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать вихревой механизм изнашивания твердосплавного инструмента и пути повышения его износостойкости. Последнее достигается применением износостойких наноструктурных покрытий [11–15], обладающих низкой адгезионной активностью.

Выводы

1. Экспериментальные исследования системы резания показали, что первичное затормаживание (адгезионное взаимодействие) частиц прирезцового слоя стружки с ПП происходит

на некотором удалении от режущего лезвия — в ОВД. Наряду с ОВД на поверхностях контакта инструмента со стружкой возникают ОНД, т. е. там, где налипы не наблюдаются.

2. Показано, что высокая степень деформации в прирезцовых слоях стружки вызывает их аморфизацию, т. е. образование квазижидкого состояния частиц металла и появление вихревых мод деформации. Вследствие чего характер движения частиц прирезцового слоя по длине контакта стружки с инструментом может изменяться от ламинарного к вихревому. Вихревой (ротационный) характер движения частиц прирезцового слоя, образование налипов и их срез облегчают вырыв частиц ИМ и вызывают интенсивный износ твердосплавного инструмента. В прирезцовом слое стружки наблюдается перемешивание частиц ОМ и ИМ.

Литература

- [1] Зорев Н.Н. *Вопросы механики процесса резания металлов*. Москва, Машиностроение, 1956. 367 с.
- [2] Кабалдин Ю.Г. Механизмы деформации срезаемого слоя и стружкообразование при резании. *Вестник машиностроения*, 1993, № 7, с. 25–30.
- [3] Кабалдин Ю.Г. Закономерности наростообразования при резании. *Вестник машиностроения*, 1995, № 5, с. 17–23.
- [4] Кабалдин Ю.Г., ред. *Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием*. Владивосток, Дальнаука, 2000. 198 с.
- [5] Кабалдин Ю.Г., Алейников А.И., Бурков А.А. Синергетика эволюции структур и солитонные механизмы трения, износа и смазки при резании. *Вестник машиностроения*, 2000, № 1, с. 34–41.
- [6] Павлов В.А. Аморфизация структуры металлов и сплавов с предельно высокой степенью деформации. *Физика металлов и металловедение*, 1985, т. 59, № 4, с. 629–649.
- [7] Белоцерковский О.М. *Численный эксперимент в турбулентности: от порядка к хаосу*. Москва, Наука, 2000. 224 с.

- [8] Черный Г.Г. Движение плавящегося твердого тела между двумя полупространствами. *Доклады АН СССР*, 1985, т. 282, № 4, с. 813–818.
- [9] Красулин Ю.П., Тимофеев В.Н. Тепловыделение на контактных поверхностях в процессе обработки металлов. В: *Физико-механические и теплофизические свойства металлов*. Москва, Наука, 1976, с. 132–136.
- [10] Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. *Структурные уровни деформации твердых тел*. Новосибирск, Наука, 1985. 229 с.
- [11] Кабалдин Ю.Г., Серый С.В. Оптимизация составов и функциональных свойств наноструктурных покрытий для режущего инструмента методом функционала электронной плотности. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2011, № 2, с. 88–94.
- [12] Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В. *Управление киберфизическими механообрабатывающими системами в цифровом производстве на основе искусственного интеллекта и облачных технологий*. Москва, Инновационное машиностроение, 2019. 293 с.
- [13] Кабалдин Ю.Г. Повышение работоспособности режущего инструмента осаждением наноструктурных покрытий. *Вестник машиностроения*, 2010, № 3, с. 41–48.
- [14] Кабалдин Ю.Г., Кретицин 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.
- [15] Кабалдин Ю.Г., Власов Е.Е., Кузьмишина А.М. Влияние фрактальных свойств наноструктурных покрытий на их износостойкость. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2018, № 6, с. 275–278.

References

- [1] Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Mechanical issues of metal cutting process]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1956. 367 p. (In Russ.).
- [2] Kabaldin Yu.G. deformation mechanisms of cut layer and chip formation. *Vestnik mashinostroeniya*, 1993, no. 7, pp. 25–30. (In Russ.).
- [3] Kabaldin Yu.G. Build-up forming law in cutting process. *Vestnik mashinostroeniya*, 1995, no. 5, pp. 17–23. (In Russ.).
- [4] Kabaldin Yu.G., ed. *Matematicheskoe modelirovanie samoorganizuyushchikhsya protsessov v tekhnologicheskikh sistemakh obrabotki rezaniem* [Mathematical modeling of self-organizing processes in technological systems of cutting processing]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000. 198 p. (In Russ.).
- [5] Kabaldin Yu.G., Aleynikov A.I., Burkov A.A. Structure evolution synergetics and soliton mechanisms of friction, wearing and lubrication at cutting. *Vestnik mashinostroeniya*, 2000, no. 1, pp. 34–41. (In Russ.).
- [6] Pavlov V.A. Structure amorphisation of metals and alloys with excessively high deformation level. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1985, vol. 59, no. 4, pp. 629–649. (In Russ.).
- [7] Belotserkovskiy O.M. *Chislennyy eksperiment v turbulentnosti: ot poryadka k khaosu* [Numerical experiment in turbulence: from order to chaos]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 224 p. (In Russ.).
- [8] Chernyy G.G. The motion of a melting body between two elastic half-spaces. *Doklady AN SSSR*, 1985, vol. 282, no. 4, pp. 813–818. (In Russ.).
- [9] Krasulin Yu.P., Timofeev V.N. Teplovydelenie na kontaktnykh poverkhnostyakh v protsesse obrabotki metallov [Thermal radiation on contact surfaces in process of metal processing]. V: *Fiziko-mekhanicheskie i teplofizicheskie svoystva metallov* [In: Physical-mechanical and thermophysical properties of metals]. Moscow, Nauka, 1976, pp. 132–136. (In Russ.).
- [10] Panin V.E., Likhachev V.A., Grinyaev Yu.V. *Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structure levels of solid body deformation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 229 p. (In Russ.).
- [11] Kabaldin Yu.G., Seryy S.V. Optimization of composition and functional properties of nanostructured coatings for cutting tools using the density functional. *Trudy NGTU*

- im. R.E. Alekseeva* [Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev], 2011, no. 2, pp. 88–94. (In Russ.).
- [12] Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kolchin P.V. *Upravlenie kiberfizicheskimi mekhanooobratyvatyayushchimi sistemami v tsifrovom proizvodstve na osnove iskusstvennogo intellekta i oblachnykh tekhnologiy* [Control on cyberphysical machining systems in digital production based on artificial intelligence in cloud technologies]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 293 p. (In Russ.).
- [13] Kabaldin Yu.G. Improving cutter performance by the application of nanostructural coatings. *Vestnik mashinostroeniya*, 2010, no. 3, pp. 41–48. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Engin. Res.*, 2010, vol. 30, no. 3, pp. 235–242, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X10030093>)
- [14] Kabaldin Yu.G., Kretinin O.V., Shatagin D.A. et al. *Vybor sostava i struktury iznosostoykikh nanostrukturnykh pokrytiy dlya tverdospлавного rezhushchego instrumenta na osnove kvantovo-mekhanicheskogo modelirovaniya* [Choice of composition and structure of wear-resistance nanostructural coatings for carbide cutting tools based on quantum-mechanical simulation]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2017. 216 p. (In Russ.).
- [15] Kabaldin Yu.G., Vlasov E.E., Kuz'mishina A.M. Effect of fractal properties of nanostructured coatings on their wear resistance. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2018, no. 6, pp. 275–278. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.04.2022

Информация об авторах

КАБАЛДИН Юрий Георгиевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения». НГТУ им. Р.Е. Алексеева (603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: uru.40@mail.ru).

БАШКОВ Андрей Алексеевич — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроения». НГТУ им. Р.Е. Алексеева (603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: kicliu@mail.ru).

Information about the authors

KABALDIN Yuri Georgievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, 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 (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: kicliu@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кабалдин Ю.Г., Башков А.А. Влияние пластической неустойчивости приконтактных слоев стружки на механизм изнашивания твердосплавного инструмента. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 10, с. 89–95, doi: [10.18698/0536-1044-2022-10-89-95](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-10-89-95)

Please cite this article in English as:

Kabaldin Y.G., Bashkov A.A. Influence of Plastic Instability of Near-contact Chip Layers on the Wear Mechanism of a Carbide Tool. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 10, pp. 89–95, doi: [10.18698/0536-1044-2022-10-89-95](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-10-89-95)