

УДК 521.7:621.9.02

СТОЙКОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНЦЕВЫХ РАДИУСНЫХ ФРЕЗ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ С ДИФфуЗИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ И БЕЗ ПОКРЫТИЯ

А. С. ЧАУС^{а+}, М. В. СИТКЕВИЧ^б, П. ПОКОРНЫ^а

Приведены результаты лабораторных стойкостных испытаний концевых радиусных фрез из быстрорежущей стали типа Р6М5 с диффузионным комплексным покрытием (С—В—N) и без покрытия. Установлена связь между кинетикой изнашивания и стойкостью инструментов. Показано, что в принятых условиях испытаний стойкость фрез с покрытием оказалась в 1,6 раза выше по сравнению со стойкостью аналогичных фрез без покрытия. Более высокая трибологическая стабильность покрытия в процессе изнашивания подтверждена результатами электронномикроскопических исследований изношенных поверхностей фрез.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, диффузионное покрытие, фрезерование, абразивное и адгезионное изнашивание, пластическая деформация, износостойкость.

Введение. В мировой практике металлообработки различного рода изделий режущими инструментами все большее применение находят инструментальные материалы с тонкими, пленочными покрытиями [1—5], которые, изменяя трибологические условия работы режущего инструмента (в первую очередь, благодаря уменьшению коэффициента трения, снижению сил и температур в контактной зоне резания), способствуют повышению его стойкости и увеличению скорости резания при обработке. Использование такого рода покрытий на инструментах из быстрорежущей стали, применяемых в автомобильной промышленности, позволяет реально повысить скорость резания до 70—80 м/мин и увеличить стойкость зуборезных фрез в 3—5 раз [6].

Наиболее часто покрытия на инструменты наносят с помощью методов химического — газофазного — осаждения (CVD — *Chemical Vapour Deposition*) или физического осаждения в вакууме (PVD — *Physical Vapour Deposition*) [5]. Учитывая тот факт, что при химическом осаждении покрытий рабочая реакция осаждения происходит при температурах 1000 °С и выше, которые значительно превышают теплостойкость известных быстрорежущих сталей [4], этот метод является приемлемым только для инструментов из твердого сплава и режущей керамики.

По сравнению с химическим осаждением процесс нанесения покрытия методом PVD является более универсальным, поскольку температура осаждения, которую можно изменять в интервале от 20 до 1000 °С, делает его пригодным и для нанесения покрытий на инструменты из быстрорежущей стали. Однако используемое в PVD оборудование является относительно дорогостоящим, что делает процесс физического испарения или распыления вещества в вакууме с целью последующего осаждения защитного покрытия экономически невыгодным при малых сериях режущих инструментов. С этой точки зрения представляет интерес использование процессов низкотемпературной химико-термической обработки с целью нанесения износостойких диффузионных защитных покрытий на поверхность заточенных и доведенных инструментов из быстрорежущей стали.

а Словацкий технический университет. Словакия, 917 24, г. Трнава, ул. Паулинска, 16.

б Белорусский национальный технический университет. Беларусь, 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: alexander.chaus@stuba.sk.

Цель работы — проведение стойкостных испытаний концевых радиусных фрез из быстрорежущей стали с диффузионным покрытием и без покрытия, а также анализ кинетики и механизмов изнашивания инструментов.

Методика эксперимента. Стойкостные испытания проводили в условиях лаборатории резания кафедры резания и монтажа Института производственных технологий материало-технологического факультета Словацкого технического университета на фрезерном обрабатывающем центре EAGLE 1000 (рис. 1). Он имеет максимальную скорость вращения рабочего вала 12000 об/мин и размеры осей рабочего стола $X = 1020$ мм, $Y = 530$ мм, $Z = 510$ мм. В качестве исследуемого инструмента были выбраны покупные биметаллические концевые радиусные фрезы диаметром 10 мм и длиной 70 мм (рис. 2), рабочая часть которых длиной 40 мм была изготовлена из быстрорежущей стали типа P6M5. Число зубьев фрез равнялось четырем.

Часть фрез (3 шт) была подвергнута химико-термической обработке с целью формирования диффузионного покрытия системы углерод—бор—азот на рабочей поверхности инструмента без использования специального технологического оборудования. Схема процесса приведена на рис. 3. Готовые к эксплуатации фрезы помещали в контейнер и засыпали диффузионно-активными порошковыми смесями, разработанными под руководством проф. М. В. Ситкевича в Белорусском национальном техническом университете. Контейнер, закрытый крышкой с песчаным затвором, помещали в обычную камерную печь с воздушной атмосферой, где осуществляли его выдержку при температуре 550 °С до полного прогрева с добавлением выдержки в течение 1 ч для формирования диффузионных карбоборазотированных слоев. После охлаждения и извлечения из контейнера фрезы были использованы в эксперименте наряду с другими тремя фрезами без покрытия.

Для обеспечения постоянной скорости резания в процессе эксперимента, а также с целью недопустимости появления областей нулевой скорости резания в оси фрезы обрабатывались заготовки с наклонной плоскостью, расположенной под углом 60° (рис. 4). Материалом заготовок служила пружинная сталь марки STN 41 2060 (эквивалент стали марки 60Г по ГОСТ 14959–79 [4]) с ферритно-перлитной структурой (рис. 5) и твердостью 200 НВ в отожженном состоянии.



Рис. 1. Фрезерный обрабатывающий центр EAGLE 1000

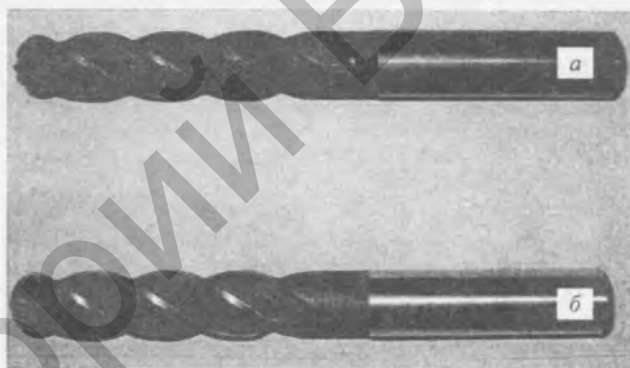


Рис. 2. Биметаллические концевые радиусные фрезы с диффузионным покрытием (а) и без покрытия (б)

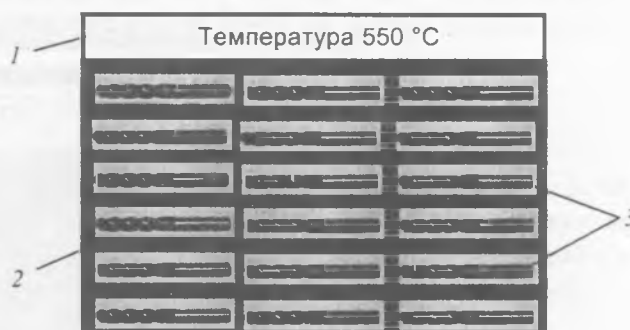


Рис. 3. Схема процесса диффузионного насыщения фрез: 1 — контейнер, закрытый крышкой с песчаным затвором; 2 — диффузионно-активная порошковая смесь; 3 — обрабатываемые фрезы

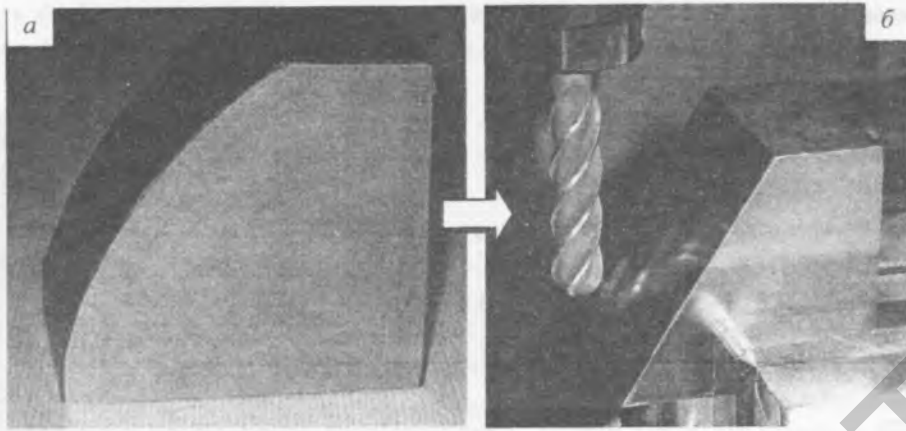


Рис. 4. Черновая (а) и подготовленная к фрезерованию (б) заготовки

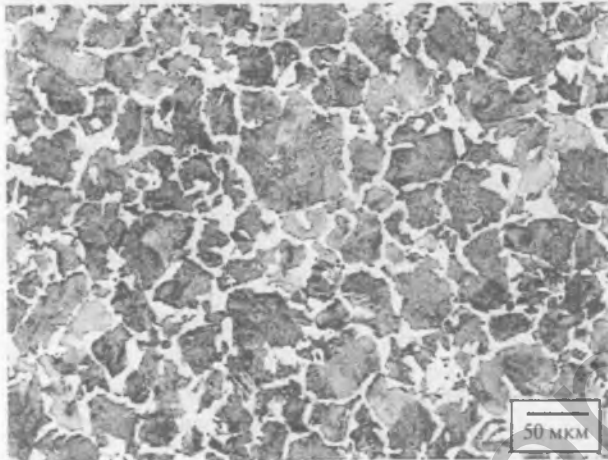


Рис. 5. Микроструктура материала обрабатываемой заготовки

Заданные режимы резания составляли: скорость резания $v_c = 26$ м/мин; подача на зуб $f_z = 0,02$ мм; глубина резания $a_p = 0,12$ мм; охлаждающая среда — 5% концентрат ECO COOL 68CF2. Из рис. 6 видно, что эффективный радиус фрезы R_{ef} может быть найден из выражения

$$R_{ef} = R \sin \left[\alpha + \arccos \frac{(R - a_p)}{R} \right], \quad (1)$$

где R — радиус фрезы; α — угол наклона плоскости; a_p — глубина резания. Учитывая, что угол наклона $\alpha = 60^\circ$, глубина резания $a_p = 0,12$ мм и радиус фрезы $R = 5$ мм, из уравнения (1) находим значение эффективного радиуса

радиуса фрезы $R_{ef} = 4,77$ мм, из чего следует, что эффективный диаметр фрезы $D_{ef} = 2R_{ef} = 9,54$ мм.

Для расчета частоты вращения было использовано уравнение

$$n = \frac{1000v_c}{\pi D_{ef}}, \quad (2)$$

где v_c — скорость резания и D_{ef} — эффективный диаметр фрезы. После подстановки известных величин $v_c = 26$ м/мин, $D_{ef} = 9,54$ мм и $\pi = 3,14$ в уравнение (2) была найдена частота вращения $n = 868$ об/мин.

Для определения скорости подачи v_f было использовано выражение

$$v_f = f_z z n, \quad (3)$$

где f_z — подача на зуб; z — число зубьев фрезы; n — число оборотов в минуту. После подстановки известных величин $f_z = 0,02$ мм, $z = 4$ и $n = 868$ об/мин в уравнение (3) была найдена скорость подачи $v_f = 69,44$ мм/мин.

Затем было рассчитано положение точки касания A или значение координаты x . Из рис. 6 следует, что

$$x = R - x_1. \quad (4)$$

Для нахождения значения величины x_1 воспользовались теоремой Пифагора, согласно которой

$$x_1^2 + R_{ef}^2 = R^2. \quad (5)$$

После подстановки известных величин $R_{ef} = 4,77$ мм и $R = 5$ мм в уравнение (5) было найдено значение $x_1 = 1,499$ мм. После подстановки известных величин $R = 5$ мм и $x_1 = 1,499$ мм в уравнение (4) было найдено значение $x = 3,501$ мм.

Заданные и расчетные данные, приведенные выше, были использованы при выборе параметров обработки наклонной плоскости, модель которой (рис. 7, а) создавалась с использованием программы Power SHAPE. В свою очередь, модель наклонной плоскости была применена при моделировании процесса (траектории) самого фрезерования в программе Power MILL (рис. 7, б).

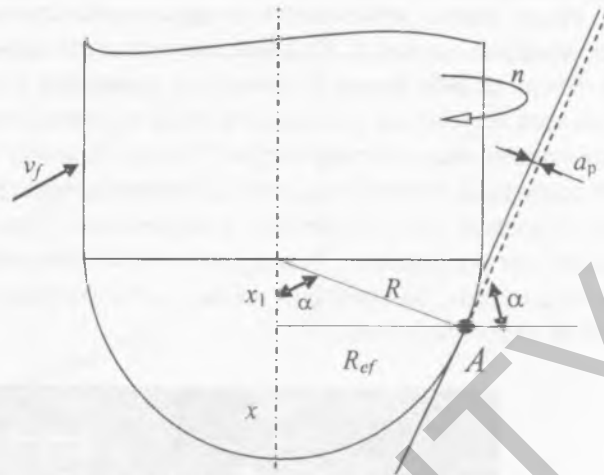


Рис. 6. Схема фрезерования наклонной плоскости

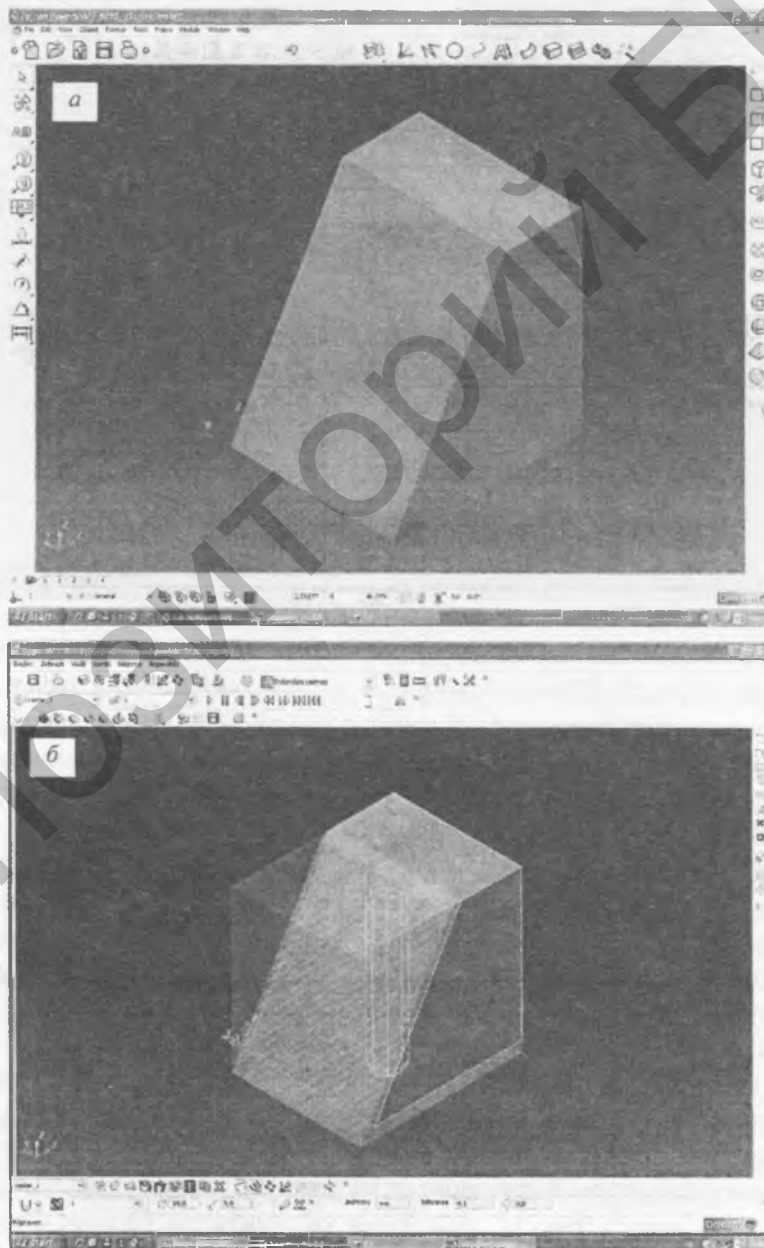


Рис. 7. Модели наклонной плоскости (а) и траектории фрезерования (б), полученные с использованием программ Power SHAPE и Power MILL, соответственно

Износ фрез в зависимости от времени контролировали с помощью оптического микроскопа, как показано на рис. 8. Степень изнашивания оценивали по ширине площадки износа на задней поверхности зуба фрезы с точностью измерения 0,05 мм. С целью повышения достоверности результатов измерений площадку износа контролировали на каждом из четырех зубьев всех фрез, задействованных в эксперименте. Интервал между контрольными измерениями составлял 5 мин. На основании полученных данных рассчитывали среднеарифметические значения, которые были использованы для построения кинетических кривых изнашивания исследуемых инструментов. Состояние изношенных поверхностей инструментов изучали с помощью растрового электронного микроскопа. За критерий износа была выбрана площадка износа на задней поверхности зуба фрезы шириной 0,4 мм.



Рис. 8. Измерение ширины площадки износа на задней поверхности зуба фрезы с помощью оптического микроскопа

Результаты исследований и их обсуждение. Особенности изнашивания фрез с диффузионным покрытием и без покрытия отражаются кинетическими кривыми, которые были построены на основании результатов контрольных измерений площадки износа на задней поверхности зубьев фрез и представлены на рис. 9. Как видно из рис. 9, на начальной стадии эксплуатации у фрез без покрытия наблюдается весьма интенсивный износ, о чем свидетельствует ярко выраженный “крутой” участок на кривой изнашивания, соответствующий т. н. периоду приработки инструмента. Для фрез с покрытием характерно отсутствие такого типичного участка на кинетической кривой, что свидетельствует о более равномерном протекании изнашивания этих фрез в период приработки. По всей видимости, объяснение следует искать в том, что в диффузионном покрытии, формирующемся после шлифования рабочей поверхности инструмента, отсутствуют дефекты, типичные для шлифованного слоя. К ним относятся повышенные напряжения, высокая плотность дислокаций и т. н. технологические дефекты — “прижоги”, являющиеся ответственными за интенсивное изнашивание инструментального материала на первой стадии эксплуатации инструмента [7]. Различия в топографии шлифованного слоя без покрытия и с нанесенным покрытием показаны на рис. 10. Главным отличительным признаком шлифованного слоя с покрытием является нечеткость или “размытость” его микрорельефа, обусловленная протеканием диффузионных процессов и массопереноса активных компонентов из порошковой смеси в глубину шлифованного слоя при формировании самого покрытия. В этот момент на режущей кромке фрез на задней поверхности формируется площадка износа (рис. 11, а), которая увеличивается по мере изнашивания инструмента.

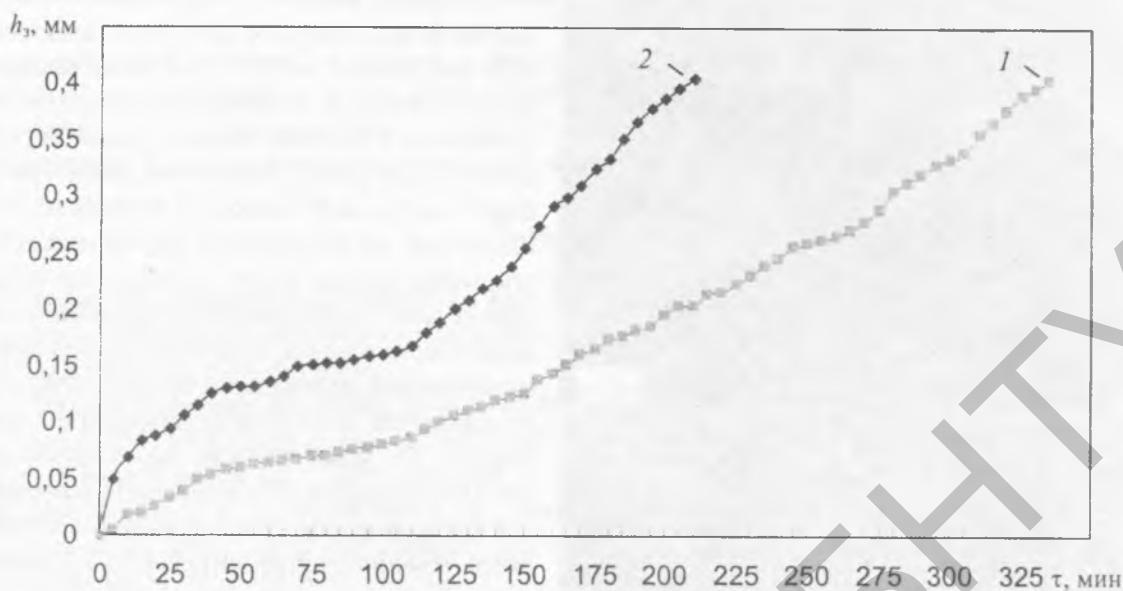


Рис. 9. Кинетика изнашивания фрез с покрытием (1) и без покрытия (2)

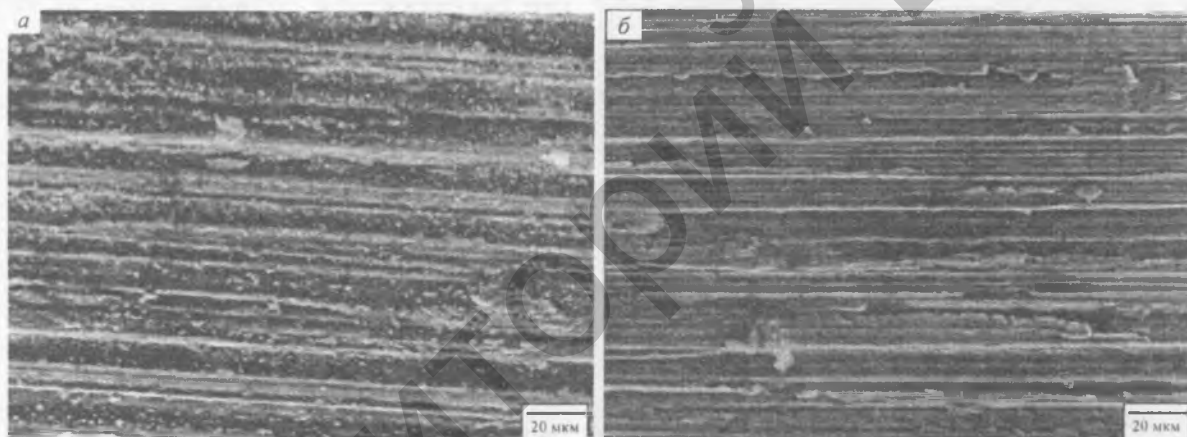


Рис. 10. РЭМ-изображения шлифованных поверхностей фрез с покрытием (а) и без покрытия (б)

Как правило, за период приработки следует период установившейся работы, для которого характерно замедленное, равномерное изнашивание инструмента [5, 8–12]. Следует отметить, что для фрез без покрытия ярко выраженный переход от интенсивного к равномерному изнашиванию наблюдается после ≈ 40 мин эксплуатации. Как уже отмечалось выше, такого рода переход отсутствует для фрез с покрытием, для которых почти прямолинейный характер изменения скорости изнашивания сохраняется вплоть до достижения критической степени износа (см. рис. 9). Наоборот, скорость изнашивания фрез без покрытия после ≈ 110 мин испытаний резко возрастает (см. рис. 9), что, предположительно, связано с потерей инструментальным материалом сопротивления пластической деформации в тонком поверхностном слое вследствие интенсификации теплового разупрочнения по мере увеличения степени изнашивания.

Характер изменения кинетических кривых иллюстрирует убедительное преимущество в износостойкости фрез с покрытием на всех этапах эксплуатации. Из рис. 9 следует, что критерий изнашивания (площадка изнашивания на задней поверхности шириной 0,4 мм) был достигнут: для фрез без покрытия после ≈ 210 мин работы, а для фрез с диффузионным покрытием — после 335 мин. Это означает, что стойкость концевых радиусных фрез с покрытием оказалась в $\approx 1,6$ раза выше по сравнению с аналогичными фрезами без покрытия.

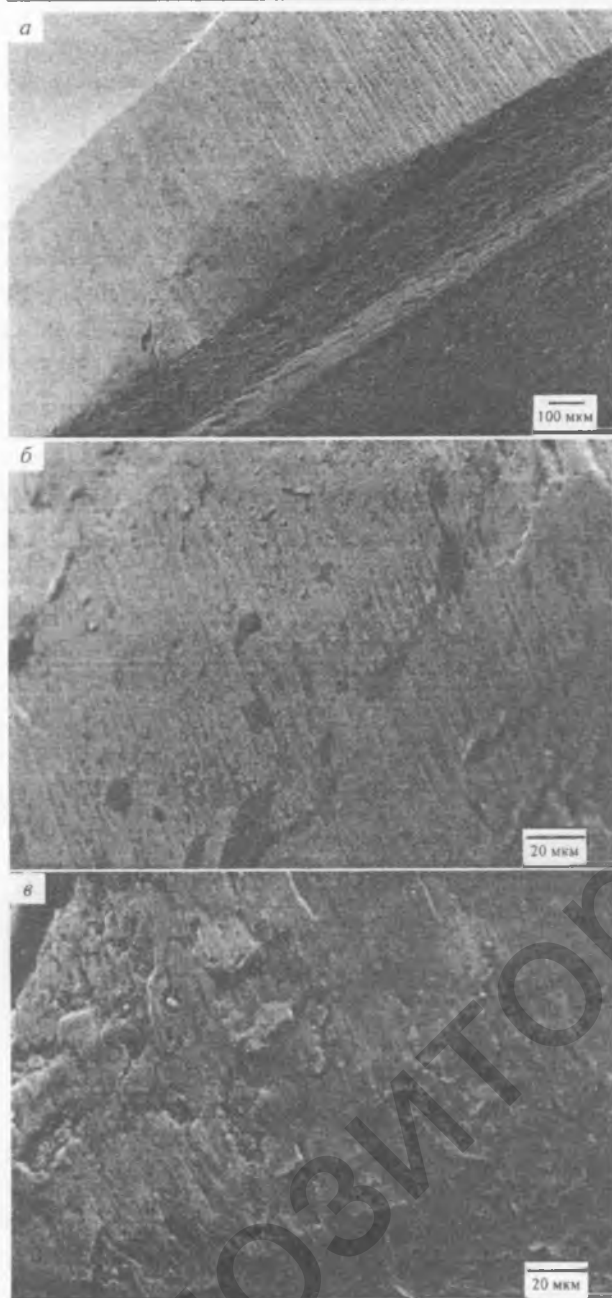


Рис. 11. РЭМ-изображения изношенных поверхностей фрез с покрытием (а, б) и без покрытия (в)

Изучение рабочих (изношенных) поверхностей фрез с помощью растрового электронного микроскопа подтвердило более высокую трибологическую стабильность покрытия по сравнению с быстрорежущей сталью без покрытия. Для фрез с покрытием, несмотря на более длительный период до изъятия из эксплуатации, на изношенной задней поверхности наблюдаются менее выраженные следы абразивного и адгезионного изнашивания при практически полном отсутствии следов явной пластической деформации инструментального материала в тонком поверхностном слое (рис. 11, б). Иная картина наблюдается для фрез без покрытия, на изношенной поверхности которых видны следы сильного пластического течения инструментального материала (рис. 11, в), что указывает на доминирующую роль пластической деформации в изнашивании быстрорежущей стали без покрытия на завершающей стадии эксплуатации исследуемых фрез.

Заключение. В результате выполненных стойкостных лабораторных исследований установлено, что стойкость концевых радиусных фрез с диффузионным покрытием системы углерод—бор—азот оказалась в $\approx 1,6$ раза выше стойкости аналогичных фрез без покрытия. Характер изменения кинетических кривых, построенных на основании результатов измерения ширины площадки износа на задней поверхности зуба фрезы в зависимости от времени работы инструмента иллюстрирует убедительное преимущество в износостойкости фрез с покрытием на всех этапах эксплуатации. Выявленные с помощью электронно-микроскопического анализа особенности состояния изношенных поверхностей фрез подтвердили более высокую трибологическую стабильность покрытия по сравнению с быстрорежущей сталью без покрытия.

Об этом свидетельствуют менее выраженные следы абразивного и адгезионного изнашивания, а также практически полное отсутствие признаков явной пластической деформации инструментального материала у фрез с покрытием. Следы сильного пластического течения инструментального материала в тонком поверхностном слое на изношенных поверхностях фрез без покрытия указывают на доминирующую роль пластической деформации в изнашивании быстрорежущей стали без покрытия на завершающей стадии эксплуатации концевых радиусных фрез, что является главной причиной их более низкой стойкости.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке по проектам VEGA № 1/0099/10 и VEGA № 1/0130/08. В работе принимал участие инженер С. Шурина.

Обозначения

v_c — скорость резания; f_z — подача на зуб; a_p — глубина резания; R_{ef} — эффективный радиус фрезы; R — радиус фрезы; α — угол наклона обрабатываемой плоскости; D_{ef} — эффективный диаметр фрезы; n — частота вращения; v_f — скорость подачи; z — число зубьев фрезы; НВ — твердость по Бринеллю; h_s — размер площадки износа на задней поверхности; τ — время испытаний.

Литература

1. Antonov M., Hussainova I., Sergejev F., Kulu P., and Gregor A. Assessment of Gradient and Anogradient PVD Coatings Behaviour under Erosive, Abrasive and Impact Wear Conditions // *Wear*. — 2009 (267), Iss. 5–8, 898–906
2. Sergejev F., Antonov M., Gregor A., et al. Investigation of the Surface Fatigue of Carbide Composites and PVD Hard Coating // *Proc. 6th Int. Conf. of DAAAM Baltic Industrial Engineering*. — Tallinn. — Vienna: DAAAM Int. — 2008, 543–548
3. Hua M., Ma H. Y., Li J., and Mok C. K. Tribological Behaviours of Patterned PVD TiN Spot Coatings on M2 Steel Coated with Different Bias Voltages // *Surface and Coatings Technology*. — 2006 (200), Iss. 11, 3612–3625
4. Гелин Ф. Д., Чаус А. С. *Металлические материалы*. — Минск: Вышэйшая школа. — 2007
5. Mills B. Recent Developments in Cutting Tool Materials // *J. of Materials Processing Technology*. — 1996 (56), 16–23
6. Astakhov V. P. Editorial: Tribology at the Forefront of Study and Research on Metal Cutting // *Int. J. of Machining and Machinability of Materials*. — 2007 (2), no. 3, 309–315
7. Бельский С. Е., Тофленец Р. Л. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. — Минск: Наука и техника. — 1984
8. Chaus A. S. and Hudáková M. Wear Resistance of High-Speed Steels and Cutting Performance of Tool Related to Structural Factors // *Wear*. — 2009 (267), Iss. 5–8, 1051–1055
9. Чаус А. С., Рудницкий Ф. И. Влияние условий эксплуатации литого металлорежущего инструмента на особенности его изнашивания и стойкость. Ч. 2. Результаты стойкостных испытаний // *Трение и износ*. — 2008 (29), № 2, 198–203
10. Комаров О. С., Ковалевский В. Н., Керженцева Л. Ф. и др. *Технология конструкционных материалов*. — Минск: Новое знание. — 2007
11. Чаус А. С. Особенности изнашивания инструмента из литой и катаной быстрорежущих сталей при фрезеровании // *Трение и износ*. — 2000 (21), № 4, 444–450
12. Чаус А. С. Особенности изнашивания инструмента из литой и катаной быстрорежущих сталей при точении // *Трение и износ*. — 1999 (20), № 4, 388–392

Поступила в редакцию 01.03.10.

Chaus A. S., Sitkevich M. V., and Pokorný P. **Cutting Tests of Ball Nose End Mills from High-Speed Steel with and without Diffusion Coating.**

The results on laboratory cutting tests of ball nose end mills from M2 high-speed steel with and without complex diffusion coating (C–B–N) are introduced in the paper. The relationship between wear kinetics and tool life has been established. It was shown that under the used experimental conditions the tool life of the mills with the coating was a factor of 1.6 higher than that of the mills without the coating. The higher tribological stability of the coating in cutting process was supported by metallographic observations of the worn surfaces using scanning electron microscopy.

Keywords: high-speed steel, diffusion coating, milling, abrasive and adhesive wear, plastic deformation, wear resistance.