

ТРЕНИЕ И ИЗНОС

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с января 1980 г.

Выходит один раз в два месяца, один том в год

ГОМЕЛЬ • ИММС НАН БЕЛАРУСИ • 2014, ТОМ 35, № 5

СОДЕРЖАНИЕ

Измайлов В. В. Расчёт характеристик дискретного адгезионного контакта.....	518
Маркова Л. В., Макаренко В. М., Конг Х., Хан Х.-Г. Влияние модификаторов вязкости на реологические свойства синтетических масел.....	527
Григорьев С. Н., Соболев О. В., Береснев В. М., Сердюк И. В., Погребняк А. Д., Колесников Д. А., Немченко У. С. Триботехнические характеристики (TiZrHfVNbTa)N покрытий, полученных методом вакуумно-дугового осаждения.....	539
Тарасова Т. В., Назаров А. П., Шалапко Ю. И. Износостойкость в условиях абразивного изнашивания и фреттинга образцов из жаропрочного кобальтового сплава, полученных методом селективного лазерного плавления.....	546
Береснев В. М., Бондар О. В., Постольный Б. А., Лисовенко М. А., Abadias G., Chartier P., Колесников Д. А., Борисюк В. Н., Мукушев Б. А., Жолдыбеков Б. Р., Андреев А. А. Сравнение триботехнических характеристик наноструктурных Agc-PVD покрытий из TiN, MoN и TiN/MoN.....	557
Гоголева О. В., Охлопкова А. А., Петрова П. Н. Разработка самосмазывающихся антифрикционных материалов на основе политетрафторэтилена и модифицированных цеолитов.....	568
Козочкин М. П., Порватов А. Н. Влияние адгезионных связей во фрикционном контакте на виброакустический сигнал и автоколебания.....	575
Зернин М. В., Мишин А. В., Рыбкин Н. Н., Шилько С. В. Гидродинамический анализ подшипников скольжения. Часть 1: Учёт нецилиндричности рабочих поверхностей.....	584
Адашкин А. М., Бутрим В. Н. Исследование интенсивности изнашивания режущего инструмента при обработке жаропрочного сплава на основе хрома в зависимости от свойств инструментального материала и скорости резания.....	596
Мигаль Ю. Ф., Майба И. А., Назаренко Д. К. Взаимодействие силикатных присадок с поверхностью железа.....	605

Маслов А. Р., Жигалов А. Н. Повышение сопротивления изнашиванию твёрдых сплавов методом аэродинамического воздействия.....	613
Шугуров А. Р., Панин А. В., Евтушенко О. В., Сергеев В. П., Мартыняк Р. М. Влияние количества слоёв в многослойных покрытиях на основе систем Zr–Y–O/Si–Al–N на их механические свойства и износостойкость.....	620
Бударова О. П., Болдырев С. В. Разработка математической модели гидроэрозийного изнашивания поршневых пар гидравлических машин. Часть 1.....	630
Мирзаев К. К., Иргашев А. Износостойкость шариковых подшипников качения, работающих в абразивной среде.....	638
Матлин М. М., Мозгунова А. И., Казанкина Е. Н., Казанкин В. А. Расчёт фактической площади в контакте единичного микровыступа, моделируемого конусом, с гладкой поверхностью детали.....	643
ЛЮДИ НАУКИ	
Станислав Пыгко (к 85-летию со дня рождения).....	650
ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ	652

Подписано в печать 03.07.2014. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Напечатано на ризографе. Усл. печ. л. 13,0. Тираж 200 экз. Заказ № 12-14

ИММС НАН Беларуси, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32-а. Регистрация № 1/244 от 25.03.14.

© ИММС НАН Беларуси

© Редакторы-составители: Мышкин Н. К., Свиридюнок А. И., Ковалёва И. Н., 2014

УДК 621.9.025.6

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗНАШИВАНИЮ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. Р. МАСЛОВ^{а+}, А. Н. ЖИГАЛОВ^б

Приведены результаты исследований эффектов повышения сопротивления изнашиванию после нескольких циклов обработки твёрдосплавных пластин, включающих нагрев до трети температуры плавления её материала и направленного воздействия колебаний воздушной среды с частотой 160...800 Гц. В работе изложена гипотеза о механизме аэродинамического воздействия на поверхности твёрдых сплавов. Дано описание экспериментальной технологии упрочнения поверхностного слоя металлорежущих пластин из твёрдых сплавов. Показано, что в производственных условиях обработанные описываемым способом твёрдосплавные пластины при торцовом фрезеровании стальных заготовок имеют наработку на отказ в 1,8...2,2 раза больше, чем стандартные в состоянии поставки.

Ключевые слова: сопротивление изнашиванию, твёрдые сплавы, металлорежущая пластина, аэродинамическое воздействие.

Введение. Эффективность технологического процесса механической обработки и качество обработанных поверхностей деталей существенно связаны с повышением сопротивления изнашиванию рабочих поверхностей режущей части инструмента, находящихся в фактическом контакте с обрабатываемым материалом и подвергающихся износу трением, адгезионному и ударному износу (хрупкому разрушению) [1]. Хрупкое разрушение предваряют деформационное упрочнение и тепловое разупрочнение. Интенсивность перечисленных видов износа зависит от истирающей способности обрабатываемого материала, микроструктуры рабочих поверхностей режущей части инструмента, а также температуры в зоне резания и теплопроводности как обрабатываемого, так и обрабатывающего материалов [2—4]. Сопротивление изнашиванию инструмента может быть определено из зависимостей величины износа h , от в зависимости от времени работы инструмента до достижения им одного из критериев затупления, так называемой стойкостью T .

Основными методами повышения сопротивления изнашиванию в настоящее время являются упрочнение и модификация рабочих поверхностей путём нанесения износостойких покрытий и ионной имплантации [5—8]. Однако, как правило, эти методы не влияют на ударную вязкость твёрдых сплавов, которые являются наиболее распространённым режущим материалом.

Одно из уникальных свойств твёрдых сплавов — высокая прочность при сжатии (3,5...7,0 ГПа), большая, чем у других материалов [9]. Для определения характеристик инструмента при точении проводят испытания на прочность при поперечном изгибе и определяют корреляционные связи между ними [10—12]. При фрезеровании, во время которого режущая кромка инструмента подвергается термическому удару и растягивающим напряжениям, особенно, когда выходит из зоны резания, высокая прочность при поперечном изгибе только косвенно говорит о сопротивлении разрушению [12].

а Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". Россия, 127994, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

б ЗАО "Промлизинг". Беларусь, 212004, г. Могилев, Витебский просп., 14.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: vestnik@stankin.ru.

Ударная вязкость лучше характеризует прочность твёрдых сплавов, чем прочность при изгибе. Она определяется критической интенсивностью напряжения K_{Ic} , которая возрастает с увеличением содержания кобальта и размеров зёрен WC (рис. 1) [13, 14].

Обнаружено, что циклическая прочность спечённых твёрдых сплавов уменьшается с повышением температуры, а усталостные характеристики WC-Co материалов в основном зависят от микроструктуры. Скорость роста усталостной трещины уменьшается с увеличением размеров зёрен WC и/или количества кобальта [15].

Гипотеза. Интенсификация процесса изнашивания контактных поверхностей твёрдых сплавов связана с неоднородным распределением дислокаций в зернах карбидной фазы, повышением их плотности в локальных объемах и образованием термодинамически неустойчивых дислокационных структур — полос скольжения, инициирующих микроскоп и вырыв зерен карбидной фазы [1, 15].

В сильно деформированном материале, каким является твёрдый сплав, дислокации распределены внутри субзёрен, в меньшей степени, по их границам. При малых степенях деформации плотности дислокаций по величине микроискажений решётки и блоков имеют приблизительно одинаковые значения.

Инструментальные материалы, имеющие мелкодисперсную поликристаллическую структуру и подвергаемые в процессе резания деформированию и нагреву, накапливают в большом количестве дислокации и вакансии, что приводит к росту адгезии и диффузионной активности. Поликристаллическое строение в сочетании с большим количеством дефектов структуры, формируемых при резании, становится фактором, ускоряющим диффузию в условиях взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов.

Увеличение плотности дислокаций в металле приводит к росту его твёрдости, а твёрдость деформированного тела пропорциональна в среднем напряжению, действующему в процессе деформации. Из теории дислокаций известно, что напряжение деформирования при различных механизмах упрочнения пропорционально квадратному корню из плотности дислокаций. От плотности и характера распределения дислокаций зависят остаточные напряжения, величина скрытой энергии. По глубине деформированного слоя плотность полос скольжения уменьшается почти по экспоненциальному закону.

Повышение твёрдости материала сопровождается ростом различных видов дислокаций в плотноупакованных плоскостях исходной структуры, которые образуются за счёт высокоэнергетических воздействий на изделие при изготовлении или упрочнении.

Сами дислокационные образования, имеющиеся в материале, с одной стороны, являются барьерами для перемещения самих дислокаций, а с другой — препятствиями для упругих перемещений элементов структуры, что существенно снижает способность материала быстро поглощать механическую энергию под воздействием ударной нагрузки, т. е. его ударную вязкость.

Методика эксперимента. Процедура разработанного метода включает равномерный прогрев твёрдосплавных пластин по всему объёму до температуры, при которой возрастает собственная энергия подвижных дислокаций на дефектах кристаллической решётки без структурного изменения самого материала.

Режимы аэродинамического воздействия должны быть подобраны таким образом, чтобы энергия звуковых колебаний рассеивалась и поглощалась в основном дефектами кристаллического

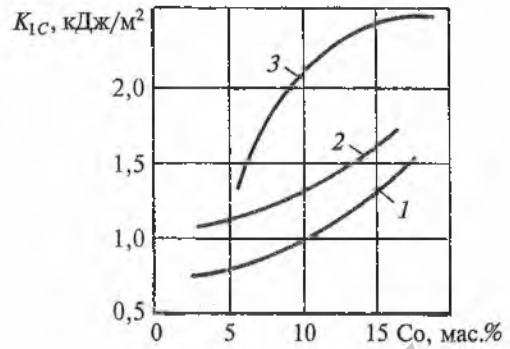


Рис. 1. Зависимость критической интенсивности напряжения K_{Ic} твердого сплава на основе WC от содержания кобальта для различных размеров зерна: 1 — 1,5 мкм; 2 — 2,8 мкм; 3 — 7,5 мкм

строения. Поглощённая в местах дефектов кристаллической решётки она снимает локальные напряжения и блокировку подвижности дислокаций, увеличивает подвижность замороженных дислокаций и обеспечивает интенсивность их перемещений. Звуковые колебания на подобранных режимах вызывают не только подвижность дислокаций, но и увеличение плотности подвижных дислокаций, в результате чего в деформируемой структуре происходит расщепление имевшихся субграниц и образование новых, которые перемещаются в направлении распространения колебаний звука.

Напряжения, действующие на дислокации, при наложении звуковых колебаний меняют величину и знак. При изменении напряжения как по величине, так и по знаку дислокации отходят от части препятствий и при новом импульсе начинают преодолевать их последовательно. Кроме того, звуковые колебания оказывают сильное влияние на имеющуюся оксидную плёнку, которая при большой интенсивности облучения деформируется и разрушается. Таким образом, создаются необходимые и достаточные условия для выхода дислокаций на поверхность.

Предложенное авторами двухцикловое аэродинамическое воздействие с различной интенсивностью звуковых колебаний в каждом цикле приводит во втором цикле к выходу на поверхность менее подвижных дислокаций, в то время как на первом цикле отходят более подвижные.

Создание звуковых колебаний с давлением воздуха в диапазоне 1,5...2,0 бар с потреблением воздуха 2,5...2,9 м³/ч на первом цикле воздействия и 4,4...5,0 м³/ч — на втором позволяет осуществлять оптимальные по плотности энергий и совокупности наложений звуковых волн воздействия для различного вида дислокаций, отличающихся как по величине, так и по плотности, а также адаптировать предложенный процесс к производственным условиям, что делает его экономически состоятельным.

Результаты исследований и их обсуждение. Исследовали влияние аэродинамического воздействия на фазовые превращения структуры стандартных образцов в виде 5-гранных пластин из твёрдого сплава T15K6 по ГОСТ 3882–74.

На торцевой поверхности пластин приготавливали шлифы. Микроструктуру материала изучали на нетравленных и протравленных образцах. Травление шлифов осуществляли 4%-м раствором пикриновой кислоты в воде. Изображение фиксировали на металлографическом комплексе "Микро 200" с использованием видеокамеры и выводом изображения на монитор персонального компьютера.

В программе обработки "ImageSP" было проведено определение размеров структурных составляющих, которое основано на выделении цветом изучаемых объектов, в данном случае карбидных фаз. На снимках микроструктуры выделяли карбиды WC и (Ti, W)C и определяли долю площади, занимаемой определяемой фазой, по отношению к площади снимка.

Полученные данные показывают, что в результате аэродинамического воздействия возрастает доля карбида состава (TiC–WC), доля карбида (WC) и связки уменьшается (табл. 1).

Таблица 1. Доли площади, занимаемой определяемой фазой, по отношению к площади снимка

Образец	Доля площади WC, %	Доля площади (TiC–WC), %	Доля площади карбидов, %	Доля связки, %
Стандартный	21	69,48	90,48	9,52
Обработанный	17,73	76,60	94,33	5,67

На рис. 2, видно, что в результате аэродинамического воздействия удаляются треки, созданные в процессе шлифования пластин, а также царапины различного происхождения.

Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактомере "ДРОН-3" с фокусировкой по Брегу—Брентано с применением β-фильтра. Исследование позволило установить фазовый состав образцов (табл. 2).

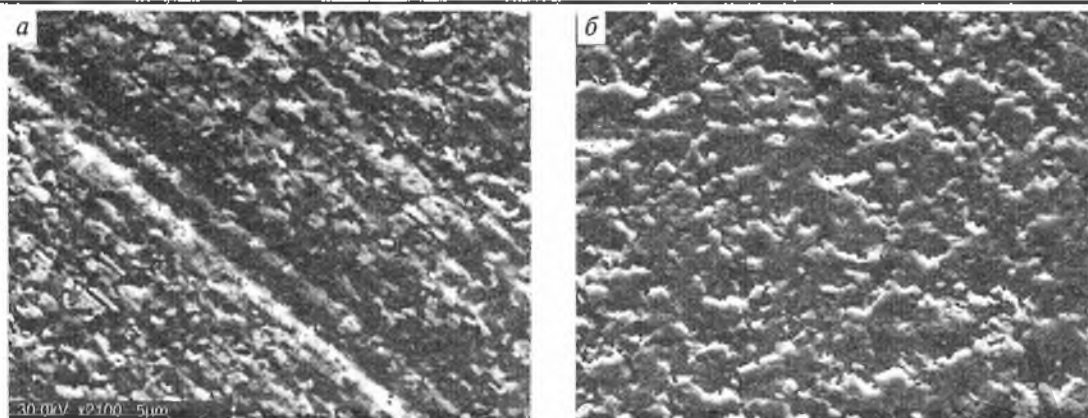


Рис. 2. Снимки поверхности образцов, полученные на сканирующем электронном микроскопе:
a — стандартный; *б* — обработанный

Таблица 2. Интенсивность линий фаз стандартного и обработанного образцов сплава Ti5K6

Линия	Фаза	Интенсивность линии, мм	Линия	Фаза	Интенсивность линии, мм
Стандартный образец					
1	WC	67	8	WC, TiC	45
2	WC, TiC	235	9	WC	20
3	TiC	95	10	TiC	21
4	WC	135	11	WC	30
5	TiC	45	12	WC	20
6	WC	27	13	TiC	6
7	WC	12	14	WC	15
Обработанный образец					
1	WC	70	8	WC, TiC	30
2	WC, TiC	197	9	WC	14
3	TiC	70	10	TiC	12
4	WC	87	11	WC	17
5	TiC	35	12	WC	15
6	WC	19	13	TiC	6
7	WC	7	14	WC	10

При равном соотношении количества карбидов WC и (TiC–WC) происходит перераспределение интенсивности линий, что может быть связано с изменением схемы напряжённого состояния сплавов вследствие перестройки структуры и изменения взаимного расположения фаз в результате аэродинамического воздействия. Изменение соотношения карбидных фаз объясняется упорядочиванием и уравниванием искажений на дислокационном уровне при обработке аэродинамическим методом.

Маски выделения зёрен карбида вольфрама WC и гистограммы их распределения согласно размерного класса по площади, представлены на рис. 3, 4. По данным обьсчета площадь зерен карбида вольфрама во всех образцах не превышает 16 мкм². Видно, что на пластинах, подвергнутых аэродинамическому воздействию, наблюдается измельчение фаз, их перераспределение. Так для стандартного образца (рис. 3, *a*) на исследуемом участке число зерен с площадью 1...2 мкм² равно 35...43 шт., площадью 14...16 мкм² — 1...2 шт. В тоже время для обработанного образца (рис. 3, *б*) число зерен площадью 1...2 мкм² равно 75...82 шт., а площадью 12...14 мкм² вообще отсутствуют.

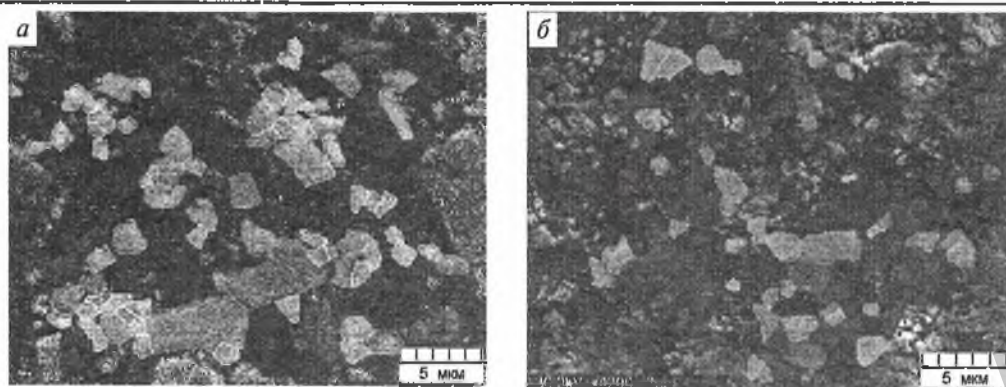


Рис. 3. Маски выделения зёрен карбида вольфрама в образцах из сплава Т15К6: *а* — стандартный; *б* — обработанный

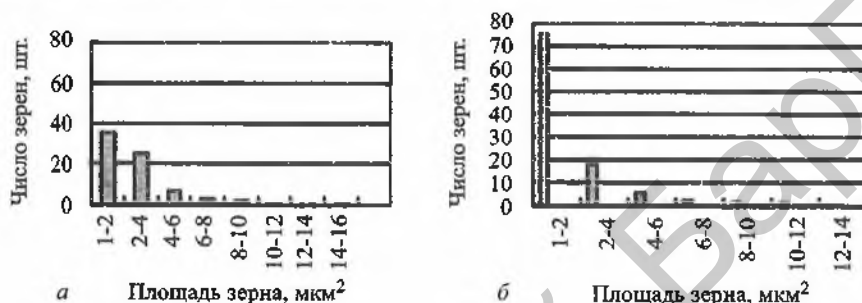


Рис. 4. Гистограммы распределения зёрен по площади в образцах: *а* — стандартном; *б* — обработанном

Исследования износостойкости твёрдосплавных пластин Т15К6, обработанных методом аэродинамического воздействия и стандартных, показали (рис. 5), что метод аэродинамического воздействия способствует снижению износа по задней поверхности и незначительно (на 15—20%) повышает стойкость твёрдосплавного инструмента при работе в зоне, когда превалирует влияние адгезионного износа.

Сравнительные испытания выполняли на заводе “СтанкоГомель” (г. Гомель, Беларусь) при фрезеровании заготовок из стали 40Х на фрезерно-карусельном станке ГФ2122 торцевой фрезой диаметром 200 мм с 12 зубьями, оснащёнными твёрдосплавными пластинами PNUM-110408 из сплава Т15К6 (прерывистое фрезерование с переменной глубиной резания 3,0...5,0 мм; частота вращения шпинделя станка — 500 мин⁻¹; скорость подачи — 450 мм/мин). Установлено, что обработанные аэродинамическим способом твёрдосплавные пластины имеют наработку на отказ в 1,8...2,2 раза больше, чем стандартные в состоянии поставки.

Заключение. При прерывистом фрезеровании сопротивление изнашиванию твёрдого сплава определяет его ударная вязкость, поэтому задачей является обеспечение высокой твёрдости поверхностных слоёв без снижения ударной вязкости. Разработанный и исследованный авторами новый положительный эффект — повышение ударной вязкости при одновременном сохранении исходной высокой твёрдости — является весьма эффективным применительно к твёрдосплавному инструменту, работающему в тяжёлых энергетических условиях.

Производственные испытания твёрдосплавного инструмента, обработанного по методу аэродинамического воздействия, в условиях знакопеременных ударных нагрузках в зоне влияния

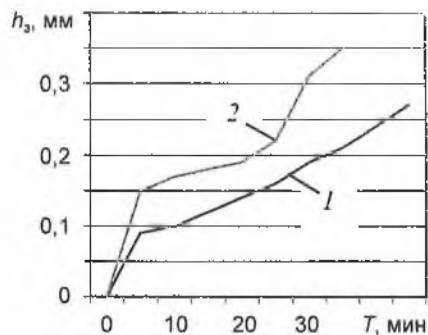


Рис. 5. Зависимость износа по задней поверхности h_2 стандартных (1) и обработанных (2) пластин из твёрдого сплава Т15К6 от времени резания T при фрезеровании деталей из стали 40Х

хрупкого разрушения и пластического деформирования контактных частей режущей части инструмента показали повышение сопротивления изнашиванию в 2...3 раза.

По мнению авторов этот эффект достигается путём воздействия на дислокационные структуры внутренних слоёв инструмента за счёт применения нескольких циклов температурного, в диапазоне 10...30% температуры плавления нагреваемого изделия, и аэродинамического воздействия путём образования направленных колебаний звуковой частоты в пределах 160...800 Гц в течение установленного периода времени.

Данная работа финансировалась Министерством образования и науки РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Григорьев С. Н., Волосова М. А. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента: Учебное пособие. — М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН», Янус-К. — 2007
2. Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigoriev S. N., et al. Vacuum-Arc Multilayer Nanostructured TiN/Ti Coatings: Structure, Stress State, Properties // *Metal Science and Heat Treatment*. — 2012 (54), nos. 1–2, 28–33
3. Терёшин М. В., Туманов А. А., Черкасова Н. Ю. Развитие системы диагностирования процесса резания // *Вестник МГТУ Станкин*. — 2012 (23), № 4, 64–67
4. Grigoriev S. N., Mandel A. M., Oshurko V. B., et al. On the Mechanism of Friction Reduction of Nanosize Multilayer Coatings // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. — 2013 (35), no. 7, 933–942
5. Grigoriev S. N., Gurin V. D., Volosova M. A., and Cherkasova N. Y. Development of Residual Cutting Tool Life Prediction Algorithm by Processing on CNC Machine Tool // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. — 2013 (44), no. 9, 790–796
6. Григорьев С. Н., Маслов А. Р. Обработка резанием в автоматизированном производстве (учебник для ВУЗов) — М.: Машиностроение. — 2008
7. Andreev A. A., Volosova M. A., Gorban V. F., et al. The Use of Pulsed Ion Stimulation to Modify the Stressed Structure State and Mechanical Properties of Vacuum-Arc TiN Coatings // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. — 2013 (35), no. 7, 953–963
8. Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigoriev S. N., Gorban' V. F., Volosova M. A., Aleshin S. V., and Stolbovoi V. A. Effect of High-Voltage Pulses on the Structure and Properties of Titanium Nitride Vacuum-Arc Coatings // *Metal Science and Heat Treatment*. — 2012 (54), no. 3–4, 195–203
9. Анисименко Г. Е., Лопатин Ю. М. Новые твердые сплавы для сменных многогранных пластин // *Обработка материалов*. — 2008 (41), № 4, 25–33
10. Adaskin A. M., Vereshchaka A. A., and Vereshchaka A. S. Study of Wear Mechanism of Hard-Alloy Tools During Machining Of Refractory Alloys // *Journal of Friction and Wear*. — 2013 (34), no. 3, 208–213
11. Fedorov S. V., Pavlov M. D., and Okunkova A. A. Effect of Structural and Phase Transformations in Alloyed Subsurface Layer of Hard-Alloy Tools on Their Wear Resistance during Cutting of high-Temperature Alloys // *Journal of Friction and Wear*. — 2013 (34), no. 3, 190–198
12. Grigor'ev S. N., Fedorov S. V., Pavlov M. D., Okun'kova A. A., and So Y. M. Complex Surface Modification of Carbide Tool by Nb Plus Hf Plus Ti Alloying Followed by Hardfacing (Ti Plus Al)N // *Journal of Friction and Wear*. — 2013 (34), no. 1, 14–18
13. Santhanam A. T. and Tierney P. Cemented Carbides, *Metals Handbook*, 9th ed. — ASM International, Metals Park, OH, 1989 (16), 71–89
14. Шейнман Е. Износ вольфрамо-кобальтового инструмента // *Комплект ИТО*. — 2009, № 3, 45–51

15. Vereschaka A. A., Vereschaka A. S., Grigoriev S. N., et al. Development and Research of Environmentally Friendly Dry Technological Machining System with Compensation of Physical Function of Cutting Fluids // Conference: 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS), Location: Setubal, Portugal, Date: May 29–30, 2013. Book Series: Procedia CIRP. — 2013 (7), 311–316

Поступила в редакцию 05.05.14.

Maslov A. R. and Jigalov A. N. **Increased Abrasion Resistance of Hard Alloys by Aerodynamic Effects.**

The study of the effects of wear resistance increasing after a few cycles of treatment of the cutting inserts, including heating up to a third of the material melting point and the attacking by fluctuations at 160–800 Hz is presented. The hypothesis of the aerodynamic effects on the hard alloys surface is get across. The experimental technology of carbide surface hardening is described. It is shown that the carbide treated by described technology at plant conditions of steel billets face milling have mean time between repairs in 1.8–2.2 times more than standard inserts as supplied..

Keywords: wear resistance, hard alloys, cutting Inserts, aerodynamic effects.