



ВЕСТНИК Машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

8
2015

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2
Телефон: 8-(499)-269-52-98
Факс: 8-(499)-269-48-97

Адрес редакции:

107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2А, стр. 2
Телефон: 8-(495)-661-38-80.
E-mail: vestmash@mashin.ru
www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за № 77-12421 в Комитете Российской Федерации по печати

Учредитель: А.И. Савкин

Индексы: **70120** ("Роспечать"),
27841 ("Пресса России"),
60264 ("Почта России")

Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер",
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО «Авансед солишнз».
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.
Сайт: www.aov.ru

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Алешин Н.П., д-р техн. наук, акад. РАН, Братухин А.Г., д-р техн. наук, Воронцов А.Л., д-р техн. наук, Гусейнов А.Г., д-р техн. наук, Дмитриев А.М., д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), Драгунов Ю.Г., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Древаль А.Е., д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), Кутин А.А., д-р техн. наук, Омельченко И.Н., д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), Кузин В.В., д-р техн. наук, Попов Д.Н., д-р техн. наук, Попов А.В., д-р техн. наук, Рыбин В.В., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Трегубов Г.П., д-р техн. наук, Скугаревская Н.В. (ответственный секретарь)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Московскому государственному технологическому университету
"СТАНКИН" 85 лет

85th Anniversary
of Moscow State Technical University "STANKIN"

Григорьев С. Н., Козочкин М. П. — Виброакустическое диагностирование электрофизических процессов как метод повышения качества обработки	3
Бушуев В. В., Молодцов В. В. — Методика моделирования механизмов приводов подачи станков с ЧПУ	8
Сабиров Ф. С., Шемякин С. С. — Оперативная оценка виброустойчивости станков и состояния шпиндельных подшипников	14
Гречишников В. А., Маслов А. Р., Пивкин П. М. — Инструментальная система для обработки торцевых канавок на станках с ЧПУ	16
Жигалов А. Н., Маслов А. Р., Шатуров Г. Ф. — Повышение эффективности фрезерования путем совершенствования структуры режущих твердых сплавов	20
Смулов И. Ю., Сова А. А., Окунькова А. А., Котобан Д. В., Подрабинник П. А. — Разработка микрофорсунок для ускорения частиц композитных порошковых материалов при холодном газодинамическом напылении	24
Тарасова Т. В., Назаров А. П., Пересторонина А. В. — Исследование процесса селективного лазерного плавления коррозионно-стойкой хромистой стали 20X13	27
Еленева Ю. Я., Андреев В. Н. — Организационный капитал предприятия, его формирование и анализ с позиций ресурсного подхода к управлению	31
Кропоткина Е. Ю., Флегентов В. К. — Упрочнение деталей из порошковых сплавов обкатыванием	35

Grigor'yev S. N., Kozochkin M. P. — Vibroacoustic diagnostic of electro-physical processes as method of improvement of processing quality	3
Bushuev V. V., Molodtsov V. V. — Methodic of modeling of feed drive system mechanisms of NC machines	8
Sabirov F. S., Shemyakin S. S. — Operative assessment of vibration resistance of machines and spindle bearings	14
Grechishnikov V. A., Maslov A. R., Pivkin P. M. — Tooling system for processing of end grooves on NC machines	16
Zhigalov A. N., Maslov A. R., Shaturov G. F. — Effectiveness increase of milling by improvement of structure of cutting hard alloys	20
Smurov I. Yu., Sova A. A., Okun'kova A. A., Kotoban D. V., Podrabinnik P. A. — Development of micronozzles for acceleration of composite powder materials' particles for cold gas-dynamic spraying	24
Tarasova T. V., Nazarov A. P., Perestoronina A. V. — Research of selective laser melting process of "20X13" corrosion resistant chromous steel	27
Eleneva Yu. Ya., Andreev V. N. — Enterprise organization capital, its formation and analysis from positions of resource-based view to management	31
Kropotkina E. Yu., Phlegentov V. K. — Strengthening of parts from powder alloys by rolling	35

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Маленков М. И., Волос В. А., Гусева Н. К., Лазарев Е. А. — Повышение подвижности марсоходов путем совершенствования систем передвижения и алгоритмов их управления	37
Иванов А. С., Смирнов Н. И., Муркин С. В. — Повышение надежности резьбовых соединений погружных центробежных насосов	45
Кирсанов М. Н. — Расчет жесткости стержневой решетки	48
Кречетов А. А., Трухманов Д. С. — Наносети из углеродных нанотрубок для тензометрических датчиков систем структурного мониторинга состояния ответственных конструкций	52
Ивашов Е. Н., Князева М. П., Федотов К. Д., Ягovieв В. О. — Решение задачи оптимизации пьезопривода для нанотехнологии	55
Куренков А. С., Синеv И. М., Гаврилов С. А., Щедрин А. В. — Проектирование инструмента со сферическими деформирующими элементами для охватывающей комбинированной обработки длинномерных заготовок	59
Бровман М. Я. — Анализ размерной точности заготовок при их изготовлении деформацией изгиба	61
Ямников А. С., Чуприков А. О. — Токарные патроны для закрепления тонкостенных заготовок	64

Malenkov M. I., Volkov V. A., Guseva N. K., Lazarev E. A. — Mobility analysis of mars rovers for the purpose of development of mobility systems and control algorithms of planet rovers of new generation	37
Ivanov A. S., Smirnov N. I., Murkin S. V. — Reliability improvement of threaded joints of sinking centrifugal pumps	45
Kirsanov M. N. — The calculation of the stiffness of the rod grille	48
Krechetov A. A., Trukhmanov D. S. — Nanonetworks from carbon nanotubes for strain gauges of structural state monitoring systems of critical structures	52
Ivashov E. N., Knyazeva M. P., Fedotov K. D., Yagovtsev V. O. — Solution of optimization problem of piezodrive for nanotechnology	55
Kurenkov A. S., Sinev I. M., Gavrillov S. A., Schedrin A. V. — Design of tool with spherical deforming elements for wraparound combined processing of long billets	59
Brovman M. Ya. — Analysis of dimensional accuracy of billets at their production by bending deformation	61
Yamnikov A. S., Chuprikov A. O. — Turning chucks for clamping-up of thin-walled workpieces	64

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

MANUFACTURING ENGINEERING

Петрова П. Н., Аргунова А. Г., Исакова Т. А. — Разработка триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена	67
Герасимов Д. Г. — Активный контроль при сборочных операциях	71
Рева В. П., Мансуров Ю. Н., Куряvий В. Г., Петров В. В., Ким В. А. — Изготовление твердосплавных пластин повышенной стойкости для режущего инструмента	74
Домбровский Ю. М., Степанов М. С. — Новые возможности поверхностного легирования стали в порошковых средах	79
Захаров М. Н., Морозов Е. М., Насонов В. А. — Оценка опасности сварочных дефектов методом приведения к эквивалентной трещине	82

Petrova P. N., Argunova A. G., Isakova T. A. — Development of tribotechnical materials on the base of polytetrafluoroethylene	67
Gerasimov D. G. — Active control at assembly operations	71
Reva V. P., Mansurov Yu. N., Kuryaviy V. G., Petrov V. V., Kim V. A. — Production of hard-alloy plates of increased resistance for cutting tools	74
Dombrovskiy Yu. M., Stepanov M. S. — New facilities of surface alloyage of steels in powder environments	79
Zakharov M. N., Morozov E. M., Nasonov V. A. — Risk assessment of welding defects by the method of reduction to the equivalent crack	82

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

TECHNICAL INFORMATION

Ахмедов Х. И., Жумаев А. А. — Производственные испытания фрез	85
Сулаймонов Р. Ш., Мардонов Б. М., Лугачев А. Е. — Модель движения слоя зернистой среды при линтеровании	87

Akhmedov Kh. I., Zhumaev A. A. — Production tests of mills	85
Sulai'monov R. Sh., Mardonov B. M., Lugachev A. E. — Model of movement of seed rollers at lintering	87

Технический редактор Т. А. Шацкая
Корректор Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 05.05.2015. Подписано в печать 14.06.2015.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Повышение эффективности фрезерования путем совершенствования структуры режущих твердых сплавов¹

Предложено повышение эффективности фрезерования методом аэродинамического воздействия (АДВ) на структуру поверхностного слоя твердосплавного инструмента. Изложена гипотеза физических процессов данного метода, приведены результаты сравнительных испытаний стандартного и инструмента, прошедшего АДВ.

Ключевые слова: фрезерование, твердый сплав, структура, аэродинамическое воздействие, звук, стойкость, производительность.

The efficiency improvement of milling by method of aerodynamic action (AAD) on surface layer structure of a hard alloy tool is suggested. The hypothesis of physical processes of this method is described, the results of comparative tests of a standard tool and a tool after AAD are presented.

Keywords: milling, hard alloy, structure, aerodynamic action, sound, resistance, capability.

Важнейшей из задач по совершенствованию процессов механической обработки является повышение эффективности обработок резанием и, в частности, фрезерованием [1–5]. Фрезерование заключается в снятии материала обрабатываемой детали многолезвийными режущими элементами в результате кратковременных прерывистых контактов [6]. Значения окружной составляющей силы резания из-за переменности толщины срезаемого слоя, динамических ударов и вибраций колеблется со значительной амплитудой. При этом с уменьшением числа зубьев и увеличением таких показателей обработки, как толщина срезаемого слоя, ширина фрезерования, подача на зуб и скорость резания, диапазон изменения данной составляющей силы резания увеличивается. Кроме того, она увеличивается при увеличении погрешностей базирования сменных многогранных пластин (СМП) в корпусе сборной фрезы и биения зубьев, вызванного несоосностью установки фрезы на станке [7].

При фрезеровании с большими ударными циклическими нагрузками возникают усталостные повреждения фрезы и разрушения поверхности СМП. Для их предотвращения необходимо повысить износостойкость инструмента путем упрочнения и модификации их рабочих поверхностей нанесением износостойких покрытий и ионной имплантацией [8–10].

На сегодняшний день еще не создано инструментального материала для фрезерования с одновременно высокими показателями таких механических свойств, как твердость, износостойкость и ударная вязкость, и не разработаны методы повышения ударной вязкости материала при сохранении его высокой твердости и износостойкости.

Особенности силового фрезерования

В качестве инструментальных материалов при фрезеровании используют твердые сплавы, представляющие собой гетерогенные композиции и состоящие из карбидов вольфрама, титана и тантала, сцементированных кобальтовой связкой для удержания хрупких и тугоплавких карбидных зерен. Крупнозернистая неоднородная структура твердого сплава состоит из граненых зерен (кристаллов) карбидов с расположенной между ними кобальтовой связкой. Размеры кристаллической решетки составляют $0,2 \div 0,7$ нм. Недостатки твердых сплавов: повышенная хрупкость, увеличивающаяся с уменьшением содержания в сплаве кобальта (Co), невысокие прочность на изгиб ($0,9 \div 2,1$ ГПа) и ударная вязкость ($25 \div 75$ кДж/м²) [11].

При фрезеровании с большими переменными ударными и вибрационными нагрузками имеют место различные виды изнашивания, в результате которых накапливаются повреждения и разрушения поверхностного слоя СМП. Изнашивание твердосплавного инструмента значительно зависит от температуры резания — при температуре до 600 °С происходят адгезионное и абразивное изнашивание, при температуре $600 \div 900$ °С абразивное изнашивание повышается в результате окисления поверхности твердого сплава и происходит диффузионное изнашивание, при температуре более 900 °С кроме повышения указанных видов изнашивания снижается устойчивость формы режущей кромки инструмента и развивается высокотемпературная ползучесть.

Интенсивность изнашивания твердых сплавов зависит от теплопроводности, т. е. от скорости передачи теплоты от режущей части инструмента в обрабатываемую заготовку в зоне контакта, в результате чего в зоне контакта снижается температура. Неоднородность микроструктуры сплава снижает его теплопроводность. Суммарная теплопроводность инструментального материала складывается из проводимости пространственной ре-

¹ Статья подготовлена в рамках государственного задания № 9.1557.2014/К.

шетки твердого тела и тепловых колебаний свободных электродов.

Для твердого сплава Т15К6 исследовано изменение суммарной теплопроводности при повышении температуры θ резания до 500 °С и выше. На рис. 1 показаны зависимости изменения коэффициента λ теплопроводности и коэффициента α линейного расширения от температуры θ для компонентов материала СМП и заготовки. Коэффициент λ теплопроводности Со в 1,76 раза увеличивается, что повышает теплопередачу от режущего элемента в заготовку, однако коэффициент теплопроводности вольфрама (W) уменьшается в 1,35 раза, при этом суммарная теплопроводность в зоне контакта увеличивается в 1,3 раза, что повышает износостойкость инструмента [12].

При скорости резания $v = 180$ м/мин температура в зоне резания достигает 850 °С. Теплопроводности обрабатываемого материала, например стали 45, и компонентов твердого сплава при увеличении температуры с 500 до 850 °С изменяются следующим образом: коэффициент λ теплопроводности стали 45 уменьшается в 1,54 раза (см. рис. 1), кобальта — в 1,23 раза, вольфрама — в 1,3 раза. Суммарная теплопроводность сплава Т15К6 при повышении температуры с 500 до 850 °С уменьшается в 1,3 раза, что обуславливает резкое повышение

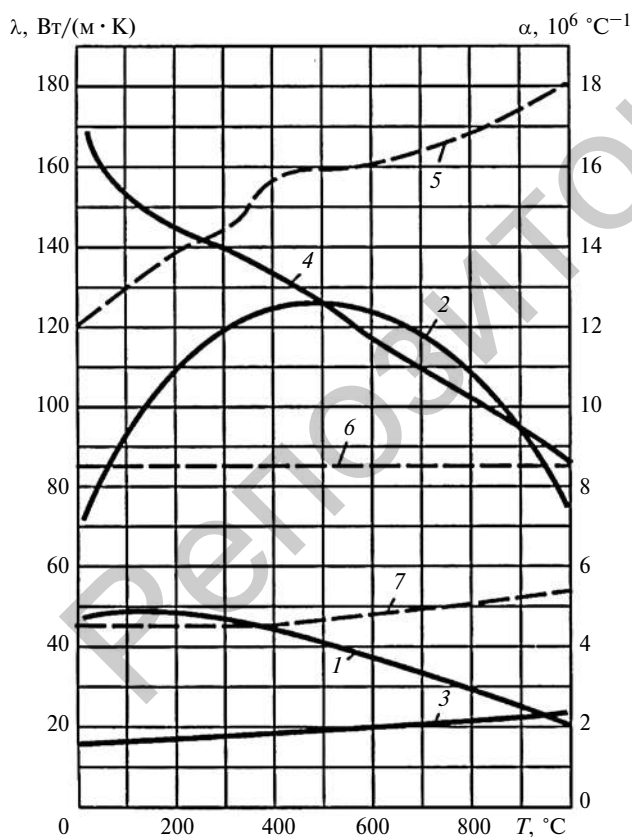


Рис. 1. Зависимости изменения коэффициента λ теплопроводности (—) и коэффициента α линейного расширения (- - -) от температуры θ компонентов СМП и материала заготовки: 1 — стали 45; 2, 5 — Со; 3, 6 — Ti; 4, 7 — W

температуры СМП и скорости ее изнашивания. В результате кобальтовая связка в зоне контакта имеет максимальную температуру по сравнению с остальными составляющими сплава, что уменьшает его твердость. При этом карбидные зерна испытывают напряжения растяжения, а связка — напряжения сжатия.

Кобальтовая связка при достижении температуры 850 °С расширяется в 3,4 раза больше, чем зерна карбида вольфрама (WC) и в 2 раза больше, чем зерна карбида титана (TiC).

Предположим, что зерно карбида на поверхности СМП удерживается полусферической оболочкой из Со. Тогда механизм изнашивания можно объяснить тем, что в результате снижения сцепления зерен TiC и WC при взаимодействии с обрабатываемой деталью и стружками они вырываются из кобальтовой связки и выносятся из зоны контакта более интенсивно, чем при обработке при скорости резания менее 100 м/мин.

Таким образом, повысить эффективность фрезерования кроме совершенствования микроструктуры поверхностного слоя инструментального сплава можно увеличением его теплопроводности путем создания на поверхности твердосплавной СМП однородной мелкозернистой структуры с уменьшенными зёрнами карбидов и обеспечения прочного их сцепления с кобальтовой связкой. Это увеличит теплопередачу от задней поверхности режущего элемента в обрабатываемую заготовку и снизит температуру резания.

Метод АДВ и механизм его воздействия

Для повышения сопротивления изнашиванию стандартных СМП разработан метод аэродинамического воздействия (АДВ) [13]. Обработку СМП из сплава Т15К6 с режущей кромкой длиной 12,7 мм осуществляют АДВ за два цикла, каждый из которых состоит из нагревания до температуры 840 °С, выдержки в течение 20 мин и аэродинамического воздействия — колебаний технически чистого воздуха с частотой 8 кГц в течение 6÷8 мин, который подается под давлением $(1,5 \div 2) \cdot 10^5$ Па; расход воздуха на первом цикле — 2,7 м³/ч, на втором — 4,9 м³/ч. После АДВ выполняют два цикла снятия напряжений при температуре 150÷170 °С в течение 20 мин с последующим охлаждением на воздухе до полного остывания.

При АДВ стандартных СМП из сплава Т15К6 в поверхностных слоях происходит измельчение фаз карбидов и их перераспределение: число зерен WC площадью менее 2 мкм² увеличилось с 43 до 82 и полностью исчезли зерна площадью более 10 мкм², а до АДВ наблюдались зерна площадью до 14 мкм².

Структурно-фазовое состояние образцов из сплава Т15К6 исследовали на дифрактометре ДРОН-2.0 в монохроматизированном кобальтовом излучении

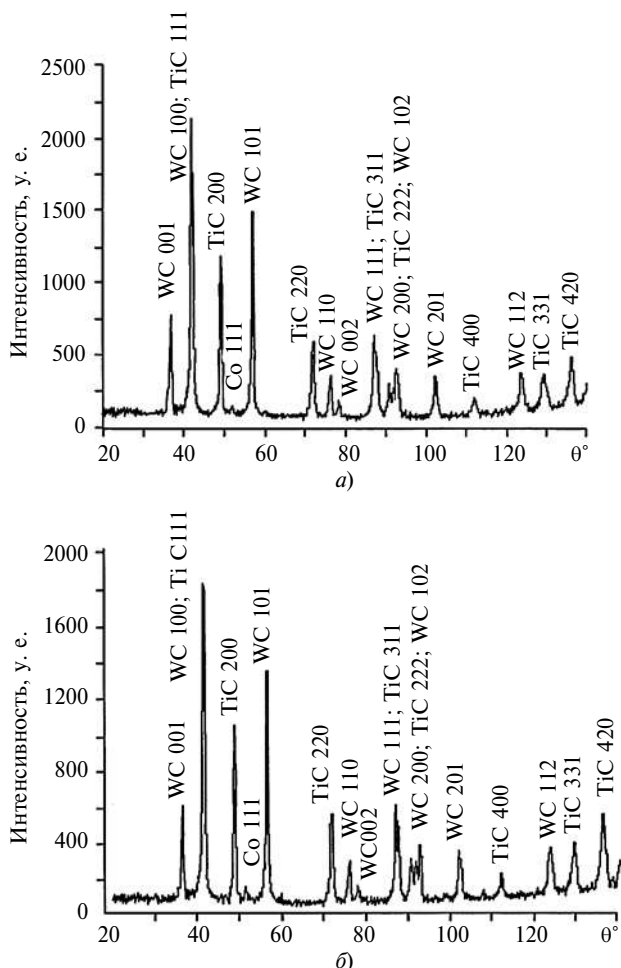


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм поверхностей стандартных (а) и прошедших АДВ (б) СМП из сплава Т15К6

в геометрии по Брэггу—Брентано. Исследование заключалась в рентгеновской съемке в сканирующем режиме с шагом $0,1^\circ$ при напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА [14]. Межплоскостные расстояния определяли из соотношения Вульфа—Брэгга:

$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$ и $2d \sin \theta = n\lambda$, где d — межплоскостное расстояние; λ — длина волны излучения; θ — угол дифракции; a — сторона решетки; h, k, l — индексы дифракционной линии. Физическое расширение дифракционных линий определяли методом аппроксимации, а их интегральную интенсивность — с помощью программного приложения HS++, разработанного голландской фирмой PanAnalytical.

Анализ рентгеновских дифрактограмм (рис. 2) показал, что расширение дифракционных линий TiC обусловлено и высокой дисперсностью зерен, и высоким содержанием в них дефектов и дислокаций. Расширение дифракционных линий WC также обусловлено малым размером зерен. При этом плотность дислокаций в TiC намного выше, чем в WC.

В результате АДВ происходит некоторое снижение физического расширения дифракционных линий от карбидных фаз. Так, для линий WC 002 регистрируется незначительное расширение. При этом изменяется отношение дифракционных линий. В частности, отношение расширения линий TiC становится ближе к отношению секансов углов дифракции, что указывает на аннигиляцию дислокаций и уменьшение зерен TiC. Для WC отношение расширения дифракционных линий 001 и 002 находится в диапазоне между отношениями секансов и тангенсов соответствующих углов дифракции, что показывает на некоторое увеличение плотности дислокаций в зернах карбида вольфрама в образцах, прошедших АДВ.

При вибрационных и импульсных воздействиях дислокации, выходящие на поверхность, увеличивают поверхностные дефекты, которые углубляются в объем материала и дают начало образованию трещин, развитие которых ускоряется в результате динамической нагрузки.

Основной объем твердых сплавов составляет карбидная фаза, состоящая в основном из кристаллических зерен карбида вольфрама, сложного карбида титана и кобальтовой связки. Кристаллические решетки сплава имеют различные дефекты: точечные (вакансии в междоузлиях, атомы замещения и внедрения в кристаллических решетках), линейные (краевые, винтовые дислокации), поверхностные и объемные (зоны двойникования, границы зерен, поверхность кристалла, дефекты упаковки, границы раздела зерен, межфазные границы) и др. В зернах соблюдаются принципы упорядоченного расположения и стабильности атомов вплоть до границ зерен.

Под воздействием внешней силы расстояния между атомами по направлению растяжения изменяются, кристаллическая решетка искажается, что создает напряженное состояние, существенно влияющее на деформационные процессы и разрушение. При наличии дислокаций даже небольшое напряжение вызывает значительную деформацию кристалла. Трещины являются концентраторами напряжений, которые на порядок превышают напряжения, создаваемые рабочими нагрузками.

С учетом парности взаимодействия и справедливости закона Гука (упругое взаимодействие) для твердых сплавов применяли допущение: смещение атома подчиняется описанию плоской упругой волны, которая распространяется по линии, соединяющей атомы. Минимальная частота колебаний атомов кристаллической решетки определяется максимальным ее размером, максимальная частота ограничена расстоянием между ближайшими атомами решетки. Расчетами установлено, что спектр нормальных колебаний кристаллической решетки включает в себя акустические частоты колебаний. На этом и основано АДВ для твердых сплавов, т. е.

воздействие упругих волн такой величины, при которой инициируются процессы самоорганизации, приводящие к структурно-фазовым превращениям ввиду локализованного резонанса с кристаллической решеткой. Самоорганизация обеспечивает переход от беспорядочного движения флуктуаций и их хаотического состояния к новому порядку, улучшающему структуру сплава для требуемых условий эксплуатации.

Производственные испытания

Исследовали режущие свойства комплекта пятигрантных СМП из сплава Т15К6, установленных на зубья торцевых фрез с 12 зубьями диаметром 200 мм. Определяли число обработанных державок резцов из стали 45 размерами 25×16×140 мм до критического износа. Испытания проводили на фрезерно-карусельном станке ГФ2120. Обработку осуществляли прерывистым фрезерованием, т. е. с многочисленными выходами и входами зубьев фрезы в заготовку, что сопровождается ударными воздействиями. Через каждые 5 мин работы фрезы измеряли износ по задней поверхности на всех пластинах с помощью микроскопа MWD (Польша) и определяли параметр R_z шероховатости обработанной поверхности на микроскопе МИС-11. Фрезерование проводили до полного затупления пластин, на которое указывали: скрип, значительные вибрации и шероховатость обработанной поверхности вплоть до появления вибрационной сетки [15], образование нароста на передних поверхностях пластин и даже поломка одной из них. На рис. 3 представлены диаграммы стойкости (число N обработанных деталей), полученные по пяти экспериментам для стандартных и прошедших АДВ пластин.

Исследования показали, что при применении АДВ в результате резонансных нелинейных коле-

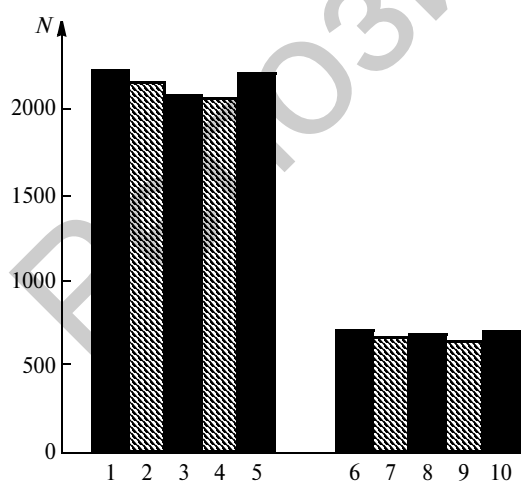


Рис. 3. Диаграммы стойкости (число N обработанных деталей) прошедших АДВ (1–5) и стандартных (6–10) пластин из сплава Т15К6 при точении заготовки из стали 45, глубине резания 1,5÷2 мм, частоте вращения 325 мин⁻¹ и подаче 1250 мм/мин

баний атомов в инструментальном материале происходит измельчение фаз и самоорганизация кристаллической решетки и зерен, в результате чего повышается эффективность фрезерования — средний период стойкости комплекта СМП торцевой фрезы из сплава Т15К6, подвергнутых АДВ, увеличился в 3,1 раза, число деталей, обработанных одним комплектом СМП, увеличилось с 590 до 2140 шт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Григорьев С. Н. Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3 (11). С. 7–13.
2. Grigoriev S. N., Kutin A. A., Turkin M. V. Modelling complex production processes in aerospace industry based on dimensional analysis // Procedia CIRP. 2013. V. 7. P. 473–478.
3. Григорьев С. Н., Завгородний В. И., Маслов А. Р. Обеспечение заданного качества деталей при высокоскоростной обработке // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 38–40.
4. Грибков А. А., Григорьев С. Н., Захарченко Д. В. Развитие зарубежного и российского станкостроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 1 (18). С. 8–11.
5. Бушуев В. В., Сабиров Ф. С. Направления развития мирового станкостроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 1 (9). С. 24–30.
6. Исаев А. В., Козочкин М. П., Купцов В. Р. Особенности встречного и попутного фрезерования при обработке тонкостенных деталей // Вестник МГТУ "Станкин". 2013. № 1 (24). С. 11–17.
7. Маслов А. Р. Инструментальная система для высокоскоростного фрезерования // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 1 (28). С. 20–23.
8. Григорьев С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2011. 368 с.
9. Волосова М. А. Исследование влияния комбинированной обработки на физико-механические характеристики оксидной и нитридной режущей керамики // Вестник МГТУ "Станкин". 2013. № 2 (25). С. 39–43.
10. Vacuum-arc multilayer nanostructured TiN/Ti coatings; structure, stress state, properties / O. V. Sobol, A. A. Andreev, S. N. Grigoriev et al. // Metal science & Heat Treatment. 2012. V. 54. № 1, 2. P. 28–33.
11. Adaskin A. M. Use of the Effect of Stress Relaxation for Changing the Shape of Articles From Nonplastic Steels and Alloys // Metal Science and Heat Treatment. 2012. V. 54. № 1, 2. P. 47–51.
12. Жигалов А. Н. Адаптивное управление при совмещенной обработке резанием и ППД. Могилев: УО "МГУП", 2013. 236 с.
13. Маслов А. Р., Жигалов А. Н. Повышение сопротивления изнашиванию твердых сплавов методом аэродинамического воздействия // Трение и износ. 2014. № 5. Т. 35. P. 461–466.
14. The problems of metrological support for the preparation of production in machine construction / S. N. Grigoriev, V. I. Teleshevskii, A. V. Glubokov et al. // Measurement Techniques. 2012. V. 55. № 5. P. 526–529.
15. Maslov A. R. Measurement of the Roughness Parameters of a Treated Surface in Turning Parts Fabricated from Heat-Resistant Alloys // Measurement Techniques. 2012. V. 54. № 10. P. 1–6.