

**Ключевые слова:**

стойкость,
твердый сплав,
концевая фреза,
нанопокрытие

Keywords:

resistance,
carbide, end mill,
nanocoating

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОНЦЕВЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ФРЕЗ С НАНОПОКРЫТИЕМ

Сергей Фёдоров

В статье приведены результаты сравнительных исследований стойкости концевых твердосплавных фрез диаметром 6 мм без покрытия и с нанопокрытием $\text{AlTiN/Si}_3\text{N}_4$, нанесенным на установке фирмы Platit $\pi 80$ (Швейцария), при резании титанового сплава VT20.

The results of comparative studies carbide end mill diameter 6 mm without coating and with Nano $\text{AlTiN/Si}_3\text{N}_4$, engraved on the equipment of company Platit $\pi 80$ (Switzerland), at cutting titanium alloy VT20.

Современные методы нанесения покрытий и модификации поверхностей изделий позволяют быстро, разнообразно и целенаправленно изменить поверхностные свойства материала, конструкции или уже готового инструмента.

В процессе нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей деталей машин и инструментов используют существенно различающиеся источники энергии, впрочем, ожидаемый эффект от их применения всегда связан с улучшением наиболее важных эксплуатационных показателей изделий.

В зависимости от решаемых задач поверхностный слой, сформированный каким-либо из методов поверхностной обработки, может выполнять функции [1]:

- высокотвердого поверхностного слоя, препятствующего абразивному изнашиванию рабочих поверхностей изделия в процессе эксплуатации;
- промежуточной среды, обладающей низким средством с контактируемым материалом и препятствующей интенсивному схватыванию в условиях адгезионного изнашивания;
- антифрикционной твердой смазки, минимизирующей налипание контактируемого материала на изделие в процессе эксплуатации;
- барьерного слоя, препятствующего отпуску поверхностного слоя изделия в результате воздействия повышенных теплосиловых нагрузок;
- барьерного слоя, способного тормозить или останавливать распространение сетки усталостных трещин, приводящей к выкрашиванию рабочих поверхностей инструмента.

Широко применяемые в инструментальном производстве покрытия типа TiAlN , TiCrN характеризуются высокими значениями микротвердости (до 35 ГПа) и значениями коэффициента трения менее 0,03. Но в то же время, эти покрытия характеризуются значительной хрупкостью, что значительно сужает область их рационального применения. Именно поэтому сегодня особый интерес во всем мире вызывают исследования, связанные с получением нанопокровтий, с размерами зерен менее 100 нм, позволяющие реализовать в одном покрытии уникальный комплекс свойств [2].

Практика показывает, что механические свойства наноматериалов можно варьировать в широких пределах путем изменения формы и структуры входящих в них наночастиц, а также структуры и свойств границ их раздела. У наноматериалов с уменьшением размеров частиц наблюдается рост теплоемкости и, как следствие, внутренней энергии и энтропии системы. Это означает, что у поверхности при увеличении внутренней энергии и повышении твердости может увеличиваться пластичность вследствие роста энтропийного фактора, в то время как в обычных материалах с увеличением микротвердости возрастает хрупкость.

Все без исключения материалы в виде тонкой пленки имеют характеристики, значительно отличающиеся от объемного (монокристаллического) материала, и чем тоньше покрытие, тем сильнее отличаются его свойства [3]. На рис. 1 показана тенденция изменения предела прочности материала σ_b (а) от толщины B пленки. Такая тенденция связана с тем, что

Максимальная микротвердость, получаемая для покрытия TiN/NbN с толщиной отдельных слоев 4 нм, составляет 50 ГПа, а для TiN/VN – около 55 ГПа [4].

В качестве примера может быть приведена структура многослойного нанопокрyтия с общей толщиной покрытия ~ 2 мкм, состоящего из 60 слоев при толщине каждого из слоев ~ 33 нм. Из-за того, что зерна каждого слоя не успевают коагулировать в процессе осаждения, покрытие имеет высокую микротвердость порядка 50 ГПа. С увеличением количества слоев покрытия до 180 (т.е. с уменьшением толщины каждого из слоев до ~ 10 нм) размеры зерен уменьшаются сильнее и микротвердость покрытий TiN/NbN и TiN/ZrN достигает значений 70 ГПа, в то время как микротвердость традиционных однослойных покрытий на основе этих же соединений (в зависимости от режимов их осаждения) находится в пределах 25...30 ГПа (рис. 2).

Отмеченная закономерность не является универсальной и применимой для всех химических соединений. Например, при увеличении количества слоев многослойного покрытия TiN/CrN свыше 80 (уменьшении их толщины менее 25 нм) его микротвердость, наоборот, снижается.

Осаждение многофазных покрытий в виде комбинации двух или более нанокристаллических фаз в составе одного покрытия обеспечивает сложную конфигурацию межзеренных границ, что приводит к повышению микротвердости. Такие покрытия состоят из основной твердой нанокристаллической фазы, на границах зерен которой располагается тонкий слой второй нанокристаллической или аморфной фазы, препятствующий росту зерен основной фазы. Другими словами, твердые зерна первой фазы отделены друг от друга, покрыты тонкой сетью атомов другой фазы, сегрегированных на их поверхностях [5].

Структурные составляющие таких покрытий должны удовлетворять целому ряду требований:

- иметь ограниченную смешиваемость в твердом состоянии;
- иметь термодинамически обусловленную сегрегацию в ходе синтеза;
- обладать определенным химическим сродством между собой для усиления межфазного взаимодействия на границах нанозерен.

В качестве удачных примеров можно привести покрытия, синтезированные на основе систем TiN/TiB, (TiSiAl)N, TiN/Cu, ZrN/Cu, AlN/Cu, а также некоторые другие системы на основе комбинаций металл-нитриды, карбид-бориды и др. Например, при осаждении покрытия TiN/Cu, добавление меди в количестве 1,5% (ат.) Cu обеспечивает формирование покрытий с размерами зерен 22 нм и приво-

дит к увеличению микротвердости с 22 до 30 ГПа. При этом покрытие обладает большей трещиностойкостью, чем чистый TiN. При дальнейшем увеличении содержания меди до ~ 2% и более размеры зерен снижаются примерно до 5 нм, но в то же время уменьшается микротвердость покрытия до 10...12 ГПа, а ориентация зерен TiN и Cu становится хаотичной. При содержании меди около 12% уровень пластической деформации покрытия составляет 53% (почти как у чистой меди). Таким образом, присутствие атомов меди (~ 2%) на поверхности растущих зерен TiN приводит к их измельчению, но в то же время увеличивает трещиностойкость и пластичность покрытий за счет скольжения к границам зерен.

Другим примером является покрытие ZrN/Cu, максимальная микротвердость которого составляет 54 ГПа. Его высокая трещиностойкость может быть достигнута введением Cu в количестве 1,2% (ат.). При этом размеры зерен покрытия составляют около 35...38 нм. При увеличении содержания меди свыше 6% (ат.) физико-механические характеристики покрытия значительно ухудшаются.

Следующим вариантом формирования многофазных покрытий зерна нанокристаллической фазы является внедрение в аморфную матрицу. В данном случае могут быть использованы различные твердые материалы для создания разнообразных композиций, например, таких как система AlTiN/Si₃N₄, признанная одной из наиболее удачных.

Преимуществами этого покрытия являются: а) высокая твердость; б) высокая теплостойкость; в) возможность обработки труднообрабатываемых материалов; г) возможность высокопроизводительной обработки (НРС).

С целью определения влияния нанопокрyтия на износостойкость твердосплавных концевых фрез был проведен многофакторный планируемый эксперимент [6].

В качестве заготовок фрез использовали стержни из мелкозернистых твердых сплавов фирмы «Güting» (Германия). Исследования качества твердых сплавов проводились по фотографиям, полученным на металлографическом микроскопе отраженного света Carl Zeiss Axiovert 40 MAT (Германия) (рис. 4).



Рис. 4. Металлографический микроскоп отраженного света Carl Zeiss Axiovert 40 MAT

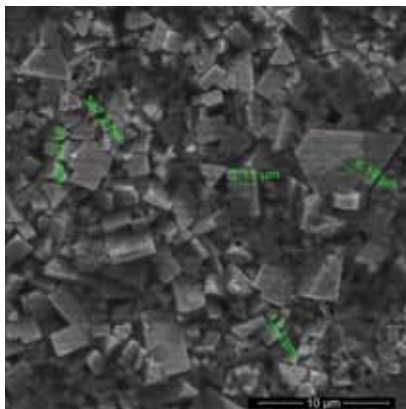


Рис. 5. Результат измерений размеров частиц крупных карбидов

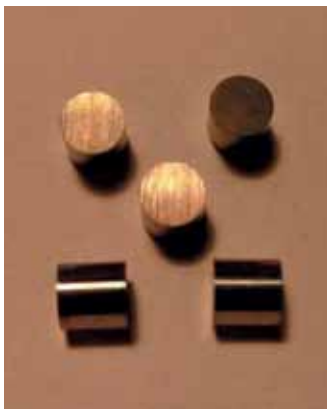


Рис. 6. Образцы стержней для испытаний на сжатие



Рис. 7. Испытательная машина Fritz Heckert

Размер карбидов определялся методом секущей по ГОСТ 21073.3-75. Выбиралось пять непараллельных секущих, длина которых составляла не менее 10 карбидных частиц. Длина промежутков или кобальтовой связи между частицами вычиталась из длины секущей. Для определения длин секущей и промежутков между частицами использовалась программа обработки изображений Image Expert Pro 3 (рис. 5). Далее длина секущей за вычетом промежутков, не относящихся к карбидным частицам, делилась на количество карбидных границ, и определялись среднее значение и отклонение по пяти секущим линиям. Установлено, что средний размер карбидов с вероятностью 0,9 равен 0,65 мкм при твердости HRC 70.

Для определения максимальной силы, воспринимаемой образцами при нагружении до разрушения, были проведены испытания образцов стержней (рис. 6) на сжатие.

Испытания сплава на сжатие проводились на машине Fritz Heckert (Германия), предназначенной для статических испытаний на сжатие, растяжение, разрыв и изгиб (рис. 7). Развиваемое усилие до 200 кН. Скорость перемещения активного захвата (подвижной траверсы) составляла 0,5 мм/мин. Механическая характеристика сплава по ГОСТ 25.503-97 составила 108 кН.

Из проверенных стержней на инструментальном заводе «ТВИНТОС» (г. Серпухов) были изготовлены концевые фрезы по технологии скоростного вышлифовывания канавок кругами простой цилиндрической формы на шлифовально-заточном станке с ЧПУ ВЗ-392Ф4 (рис. 8).

Шлифовально-заточной полуавтомат с ЧПУ ВЗ-392Ф4 позволяет с одной установки выполнять операции заточки и шлифовки стружечных канавок различных режущих инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов высо-

костойкими абразивными, эльборовыми и алмазными кругами.

К особенностям станка следует отнести:

- управление по пяти координатным осям: X, Y, Z, A, C;
- компактная конструкция станка;
- система ЧПУ SINUMERIK фирмы SIEMENS, допускающая управление через персональный компьютер;
- полностью закрытая защитным кожухом зона обработки.

Бабка изделия (координата A) смонтирована на поворотном столе (координата C), узел поворота которого закреплен на поперечных салазках (координата Z). Высокопрецизионные червячные зацепления и подшипники позволяют осуществлять точное деление изделия и его разворот относи-



Рис. 8. Шлифовально-заточной станок ВЗ-392Ф4:
1 — бабка изделия; 2 — бабка инструмента;
3 — панель управления

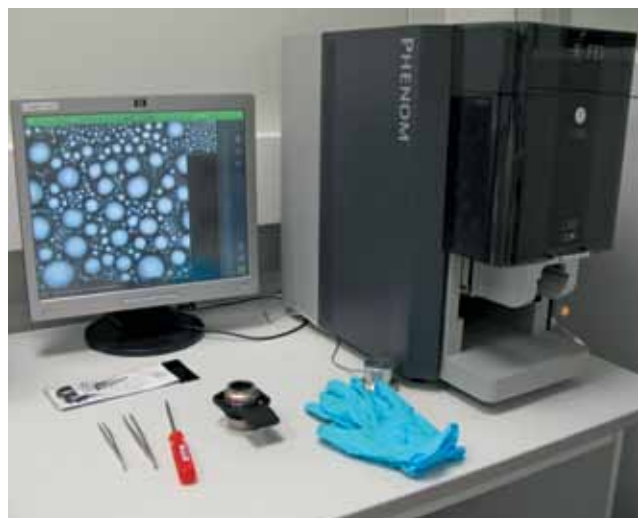


Рис. 9. Сканирующий электронный микроскоп FEI Phenom



Рис. 10. Нанотехнологический комплекс «Нанофаб 100»

тельно двух взаимно перпендикулярных осей. Бабка шлифовальная смонтирована на вертикальном ползуне (координата Y), который перемещается по колонне, установленной на продольных салазках (координата X).

Все перемещения по линейным координатам осуществляются в безззорных направляющих линейного перемещения через высокоточные предварительно натянутые ходовые пары винт-гайка качения.

Всего было изготовлено 20 шт. экспериментальных образцов концевых фрез конструкции, рекомендованной заводом-изготовителем для обработки титановых сплавов. На половину образцов было нанесено наноструктурное покрытие $AlTiN/Si_3N_4$.

Исследования качества нанесенных покрытий проводились на сканирующем электронном микроскопе FEI Phenom (Нидерланды) (рис. 9) и на нанотехнологическом комплексе «Нанофаб 100» (Россия) (рис. 10).

Сканирующий электронный микроскоп FEI Phenom позволяет получать изображение поверхности образца с очень высоким разрешением, что дает возможность провести измерения различных параметров, в том числе морфологию поверхности, ориентации, формы и размер микро- и нано-объектов в диапазоне от нескольких сантиметров до десятков нанометров с увеличением до $\times 24\,000$. В FEI Phenom соединились лучшие технологии световой и электронно-оптической микроскопии, что превратило его в единую интегрированную, легкую в обращении микроскопную систему. Основные технические характеристики сканирующего электронного микроскопа FEI Phenom приведены в табл. 1.

Нанотехнологический комплекс «Нанофаб 100» включает модуль сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), модуль фокусированного ионного пучка (ФИП), камеру загрузки зондов и камеру загрузки образцов. Установка позволяет обрабатывать и исследовать образцы диаметром до 100 мм в условиях сверхвысокого вакуума.

Таблица 1. Основные технические характеристики сканирующего электронного микроскопа FEI Phenom

Диапазон увеличения	$\times 20 - \times 24\,000$
Пространственное разрешение	30 нм
Источник электронов	кристалл CeB_6
Ускоряющее напряжение электронов	5 кВ
Рабочее давление	10 мкПа
Хранение информации	USB2.0 Flash Drive
Время загрузки образца	менее 30 с
Размер образца (диаметр — высота)	вплоть до 25 мм в диаметре и до 35 мм в толщину
Опции формата изображения	JPEG, TIFF с разрешением до 2048×2048 пикселей
Габариты и вес модуля получения изображения	286 x 566 x 495 мм; 52 кг (помещается на поверхности стола)

Таблица 2. Основные технические характеристики нанотехнологического комплекса «Нанофаб 100»

Параметры модуля СЗМ	
Тип сканирования	Сканирование зондом
Область сканирования	50 x 50 x 6 мкм
Область позиционирования координатного стола XY	Ø 100 мм
Уровень шумов по осям XY	< 1нм
Уровень шумов по оси Z	< 0.1 нм
Вакуум	1 x 10 ⁻⁷ Па
Активная виброзащита	1–200 Гц
Параметры модуля ФИП	
Источник ионов	Ga
Мин. диаметр пучка	10 нм
Рабочее поле	300 x 300 мкм
Энергия пучка	3–30 кэВ
Ионный ток	от 1 пА до 20 нА
Вакуум	1 x 10 ⁻⁷ Па
Активная виброзащита	1–200 Гц

Основные технические характеристики нанотехнологического комплекса «Нанофаб 100» приведены в табл. 2.

Для измерения были также изготовлены специальные образцы срединных частей режущих частей фрез. Подготовка металлографических шлифов осуществлялась на оборудовании фирмы Struers (Дания), в состав которого входят электроэрозионный отрезной станок, устройства для шлифования и последующей полировки микрошлифов.

Для запрессовки использовали запрессовочный станок фирмы Struers – ProntoPress-20 (Дания) (рис. 11).



Рис. 11. Запрессовочный станок Struers — ProntoPress-20



Рис. 12. Образец для измерения

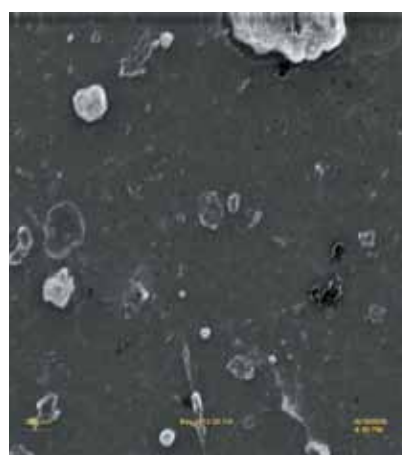


Рис. 13. Снимок поверхности образца-свидетеля с нанесенным нанопокрывом AlTiN/Si₃N₄ (x15000)



Рис. 14. Концевые фрезы



Рис. 15. Рабочая зона станка Roeders RXP600DSH во время эксперимента

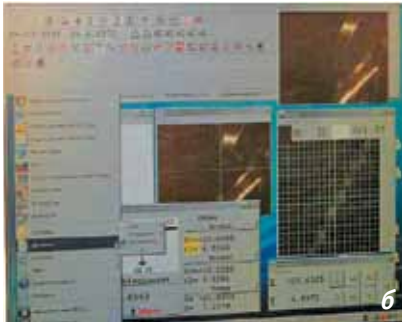
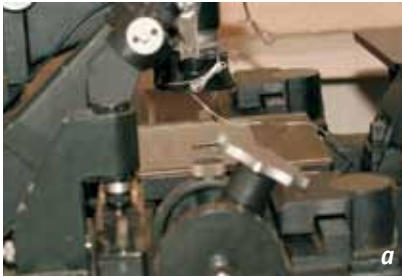


Рис. 16. Большой инструментальный микроскоп, оснащенный специализированным программным комплексом (а) и окно дисплея (б)

Для шлифовки образцов брали шлифовальную бумагу фирмы Struers. Шлифование выполняли на станке Tegra Force-5 для подготовки единичных образцов и образцов в специальных держателях.

Применяли круг для тонкого шлифования MD-DAC (алмазное полирование) с размером зерна 6 мкм (алмазная суспензия). Далее использовали шлифовальный круг MD-NAP с размером зерна 1 мкм. Полученные образцы для измерения показаны на рис. 12. На рис. 13 представлена фотография поверхности образца-свидетеля с нанопокрывтием AlTiN/Si₃N₄, нанесенным на установке фирмы Plaitit π80 (Швейцария).

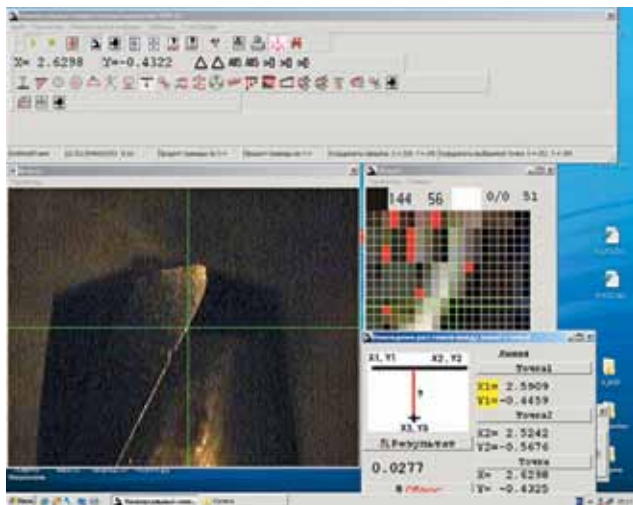


Рис. 17. Окно с результатом промежуточного измерения износа на фрезе с покрытием (показана величина износа — 0,0277 мм)

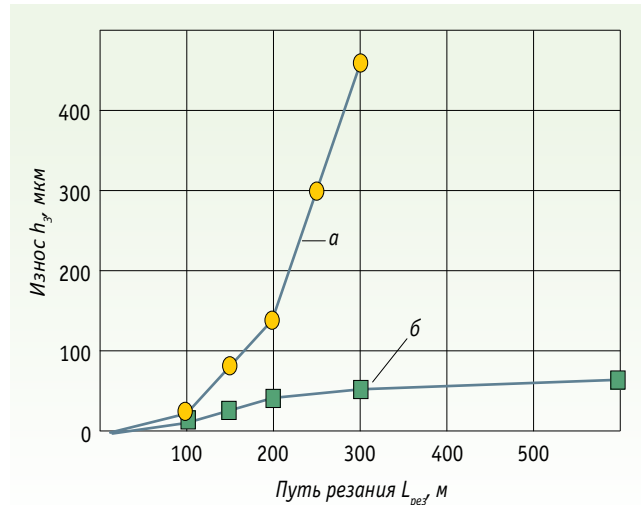


Рис. 18. Результаты измерения износа на цилиндрической части фрез:
а — без покрытия; б — с нанопокрывтием

Сравнительные исследования стойкости концевых фрез без покрытия и с покрытием (рис. 14) проводились в ГИЦ МГТУ «СТАНКИН» на пятикоординатном высокоскоростном станке Roeders RXP600DSH (Германия) (рис. 15) с максимальной частотой вращения шпинделя 32 000 мин⁻¹. Закрепление концевых твердосплавных фрез диаметром 6 мм производилось с помощью вспомогательного инструмента – термопатрона с полым коническим хвостовиком HSK 63F по DIN 69893-5.

Для испытаний использовалась заготовка из титанового сплава BT20. Критерием сравнения служил путь резания до достижения износа $h_3 = 0,3$ мм по задней поверхности зубьев концевых фрез на цилиндрической и на торцевой частях. Выполнялось попутное фрезерование уступа высотой $h = 6$ мм, при глубине резания $t = 0,65$ мм (по нормали к оси фрезы); без использования СОЖ на скорости резания $n = 130$ м/мин (6900 мин⁻¹) с подачей 0,072 мм/зуб.

Для измерения использовалась установка на базе большого инструментального микроскопа (рис. 16), оснащенная специализированным программным комплексом.

Окно компьютера специализированного комплекса показано на рис. 17. Помимо измерения величины износа инструмента, установка позволяет непрерывно измерять крутящие моменты силы резания. Графическая интерпретация результатов измерения износа фрез показана на рис. 18. Дальнейшее фрезерование показало, что для фрезы с нанопокрывтием величина износа $h_3 = 0,3$ мм достигается при пути фрезерования $L_{\phi} = 1100$ м.

ВЫВОДЫ

Существует несколько технологических приемов, обеспечивающих формирование нанопокровов с различными физико-механическими свойствами, необходимыми для современных высокоэффективных технологий обработки резанием.

Применение нанопокровов повышает стойкость и надежность режущего инструмента из твердых сплавов в тех областях применения, где возникают нагрузки, зачастую приводящие к разрушению обычных покрытий уже в самом начале работы инструмента.

Перспективным является использование инструмента с нанопокровом при высокоэффективной резании труднообрабатываемых материалов с большими толщинами среза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для вузов. — М.: Машиностроение. 2009. С. 368.
2. Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном произ-

водстве // Упрочняющие технологии и покрытия. — Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 6. С. 37–42.

3. Панфилов Ю.В. Нанотехнология в инженерии поверхности // Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 8. С. 1–24.
4. Ducros C., Benevent V., Savchette F. Deposition, Characterisation and Machining Performance of Multilayer PVD Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools // Surface and Coatings Technology. 2003. V. 163–164. P. 681–688.
5. Mayrhofer P.H., Willmann H., Mitterer C. Recrystallization and Grain Growth of Nanocomposite Ti-B-N Coatings // Thin Solid Films. 2003. V. 440. P. 174–179.
6. Волосова М.А., Григорьев С.Н., Могилевский А.М. Исследование эффективности нанесения нанопокровов на концевые твердосплавные фрезы // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 4 (17). С. 24–31.

Сергей Вольдемарович ФЕДОРОВ —
кандидат технических наук,
доцент МГТУ «СТАНКИН»