

УДК 621.9.015

**Н. В. Новиков**, акад. НАН Украины, **С. А. Клименко**, д-р техн. наук, **М. Ю. Копейкина**,  
**А. С. Мановицкий**, **А. С. Манохин**, **Ю. А. Мельничук**, кандидаты технических наук

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

## **ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХТВЕРДЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ МЕХАНООБРАБОТКИ**

*Показаны преимущества материалов на основе алмаза, кубического нитрида бора и твердых сплавов, используемых в инструментах для механической обработки труднообрабатываемых материалов. Приведены положительный 50-летний опыт и современные направления деятельности Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины в разработке, изготовлении и внедрении прогрессивных материалов, инструментов и оптимальных режимов механообработки труднообрабатываемых материалов.*

**Ключевые слова:** *сверхтвердый материал, инструмент, процессы и технологии обработки, скорость резания, шероховатость поверхности, качество, производительность.*

К основным направлениям деятельности Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля (ИСМ) НАН Украины относятся развитие научных принципов создания технологий обработки металлов и неметаллов инструментом на основе сверхтвердых материалов (СТМ), разработка методов и технологий применения новых инструментальных материалов в базовых областях промышленности.

Организация и активная деятельность ИСМ НАН Украины определялись потребностью многих отраслей промышленности страны в новых инструментах для высокотехнологичных производственных процессов обработки металлов и сплавов, строительной индустрии, добычи полезных ископаемых, ускорения выпуска новой атомной техники, изделий радиоэлектроники, техники освоения космоса. В условиях действия системы плановой директивной экономики правительство страны выделило значительные объемы ассигнований для строительства института, проектирования и изготовления основного оборудования, прессов, станков, печей, приобретения точного аналитического и другого научно-производственного оборудования и материалов в целях быстрого масштабирования зародившегося принципиально нового для страны процесса получения синтетических алмазов в промышленных условиях и их применения в производстве инструментов.

По сравнению с обычными абразивными отечественными инструментами один карат алмаза в инструменте приносил экономический эффект до 50 руб., в отдельных случаях – до 200 руб. Это был настоящий прорыв в качестве и производительности технологических процессов сотен видов производств. Промышленное изготовление и применение синтетических алмазов в больших объемах, их широкая доступность по сравнению с природными стали реальным двигателем научно-технического прогресса XX века.

В 2011 году, ИСМ НАН Украины, носящий имя своего основателя Валентина Николаевича Бакуля, отпраздновал 50-летний юбилей. За прошедший период в институте создано около 100 марок (разновидностей) сверхтвердых материалов – алмазов, кубического нитрида бора, композитов на их основе, порошков, поликристаллов, пленочных материалов, созданы лицензионные технологии получения нано- и микропорошков, выращивания крупных алмазных кристаллов.

Как свидетельствуют результаты анализа мирового опыта, в недалеком будущем произойдут революционные изменения технического и технологического уровней

станкостроения, инструментального производства и механообработки в целом. После широкого внедрения конвейерных технологий, заводов-автоматов, гибких автоматизированных линий, обрабатывающих центров наметилась новая тенденция производства с применением мощных систем компьютерной техники и программного обеспечения. Основу гибкого машиностроительного производства уже с начала XXI века составляют системы нового поколения станков и инструментов.

В механообработке развивается переход к применению кинематически развитых систем со множеством степеней свободы, при использовании которых ожидаемый результат связан не только с высокой производительностью съема материала припуска, но и с формированием в поверхностных слоях изделия такого состояния, которое наилучшим образом будет обеспечивать работоспособность изделия в эксплуатации. Минимизация затрат за жизненный цикл изделия не только распространяется на снижение себестоимости процесса их обработки, но касается и стоимости эксплуатации.

Расход инструмента на подобном оборудовании в 2–3 раза выше, чем на обычном. При этом необходимо учитывать, что дальнейшее увеличение удельного веса использования труднообрабатываемых материалов неизбежно приводит к увеличению расхода инструмента: на обработку таких материалов его требуется в 2–10 раз больше, а стоимость простоев автоматического оборудования по вине инструмента на два порядка выше, чем универсального.

Практика производства показывает, что чем сложнее и точнее производство, тем более совершенного и разнообразного инструмента оно требует. По данным специалистов Харьковского НИИ технологии машиностроения при подготовке производства сложных конструкций машин в условиях серийного производства трудоемкость проектирования и изготовления специального инструмента составляет 20–75% общей трудоемкости, его стоимость – 85% общей суммы затрат на технологическую подготовку производства новой продукции. Примерно 1/13–1/17 часть расходов предприятия составляют затраты на инструмент. Трудоемкость выпуска инструмента колеблется от 4 до 12% трудоемкости изготовления основной продукции. В свою очередь, затраты, связанные с изготовлением инструмента и технологической оснастки, составляют 3–10% себестоимости продукции, а оборотные средства, вложенные на его приобретение и изготовление, – 12–5% общей суммы оборотных средств предприятия. На ряде предприятий стоимость находящегося в обращении инструментария составляет 25–32% балансовой стоимости оборудования.

Сегодня основными тенденциями развития процессов механической обработки представляются следующие:

- высокоскоростная (скорость резания в несколько раз превышает скорость резания при обычной обработке) и высокопроизводительная (высокая скорость резания и подача) обработка;
- обработка без охлаждения или с минимальным применением смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), например, подача СОТС в распыленном виде, применение твердых смазок;
- применение инструментов с функциональными защитными покрытиями (покрытия на инструментах, оснащенных режущей частью с СТМ, и покрытия из СТМ на инструментах, оснащенных керамикой и твердыми сплавами) и модифицированным поверхностным слоем;
- обработка с высокими динамическими нагрузками (нестабильные механические свойства материала обрабатываемой детали, переменный припуск на обработку, конструктивные особенности обрабатываемых деталей);
- уход от дискретных методов обработки и совмещение операций, например, резания и поверхностного пластического деформирования (ППД) за счет кинематики процесса, геометрических параметров и особенностей конструкции инструмента;

- многокоординатная обработка сложнопрофильных изделий одним инструментом, обработка инструментом с переменной режущей вершиной, методом обката рабочей части режущего инструмента;
- обработка «сырых» сталей инструментами, оснащенными СТМ, обработка вязких специальных сталей, например, с аустенитной структурой, литых высокомарганцовистых;
- оптимизация обработки за счет применения компьютеризированного оборудования, широкого использования управления процессами обработки, диагностики состояния режущего инструмента и состояния поверхностного слоя обработанных изделий на базе современных компьютерных программных продуктов.

Актуальной задачей современной технологической науки, решение которой обуславливает соответствие создаваемых технологий мировым тенденциям, является развитие фундаментальных и прикладных исследований в области разработки и производства режущих инструментов, обеспечивающих высокоэффективную и экономичную обработку деталей из перспективных конструкционных материалов с повышенными механическими свойствами. Это касается как материалов, используемых в инструментах, так и их конструкций.

О большом внимании индустриально развитых стран к сверхтвердым материалам, как наиболее прогрессивным для оснащения инструментов, а в ряде случаев и конструкционным материалам, свидетельствует тот факт, что в настоящее время ведущие промышленно развитые страны используют около 80% объема добываемых природных и производимых синтетических алмазов. При этом одной из основных областей применения СТМ является механообработка, где используют 70% их общего объема (см. таблицу).

Инструментально-технологические разработки ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины убедительно доказывают, что конкурентоспособность инструментов с СТМ является тем краеугольным камнем, на котором должна базироваться разработка высокопроизводительных технологических процессов обработки, перспективных для инновационного развития базовых отраслей промышленности Украины.

В целях совершенствования технологий механической обработки с использованием инструментов, оснащенных сверхтвердыми материалами, необходимо согласовать материаловедческие представления об эффективных структурах и оптимальных свойствах инструментальных и обрабатываемых материалов с выявлением закономерностей процессов обработки резанием. Основу такого подхода составляют современные представления о механике, теплофизике, кинетике, термодинамике и физико-химии контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов с учетом действия окружающей среды (рис. 1), которые, в свою очередь, базируются на положениях теории резания, высокотемпературного структурообразования с учетом силового воздействия, вычислительной термодинамики, представлениях о возможностях управления технологическими параметрами, диагностики *in situ*, анализе состояния поверхностного слоя обработанных изделий.

Количественное описание текущего физико-химического и механического состояния инструментального и обрабатываемого материалов в контактной зоне для конкретных условий процесса механической обработки, изучение эволюции и возможности трансформации поверхностей инструмента в контактной зоне под действием термобарических условий процесса резания, составляют фундаментальную основу совершенствования режущих инструментов и процессов механической обработки, мотивируют выбор существующего или разработку нового инструментальных материалов.

**Инструменты и их рабочие элементы из СТМ**

Вид СТМ	Состояние абразива	Вид инструмента	Область применения
Порошки СА	Связанный	На металлической связке	Предварительные операций, требующие съёма сравнительно больших припусков, заточка инструмента из твердого сплава, профильное шлифование, резка и шлифование изделий из специальной керамики, труднообрабатываемых материалов
		На гальванической связке	Резка и шлифование кремния, германия и других полупроводниковых материалов, ситала, различных видов технического стекла, фактурная обработка камня; изготовление алмазных головок, притиров различной формы ручного инструмента для доводки штампов из твёрдых сплавов, штамповых и легированных сталей; правящего инструмента
		На керамической связке	Шлифование твердосплавных деталей (пуансонов, калибров, валков и др.), режущих пластин из композитов, деталей из сочетания стали и твердого сплава
		На органической связке	Заточка режущего инструмента из твердых сплавов, деталей из композита и керамики; высокоточная резка твердого сплава, технической керамики, цветных металлов, кварцевого стекла, ферритов, кварца
		На бумажной и тканевой основе	Финишные операции, притирка и полирование с целью получения поверхностей шероховатостью $Ra\ 0,02-0,08$
	Паста, суспензия	Особо точное изготовление металлических и неметаллических деталей с высоким требованием к чистоте поверхности	
	Свободный	Порошок СА	
Порошки КНБ	Связанный	На керамической связке	Обработка высокоточных деталей из сталей и сплавов высокой твердости, износостойких покрытий
		На органической связке	Заточка инструмента (сверел, фрез, резцов и т.д.) из быстрорежущих сталей, вышлифовывание стружечных канавок, отрезка и прорезка пазов; всухую или с охлаждающей жидкостью
		На бумажной и тканевой основе	Финишные операции, притирка и полирование с целью получения поверхностей шероховатостью $Ra\ 0,02-0,08$
	Паста, суспензия	Особо точное изготовление металлических и неметаллических деталей с высоким требованием к чистоте поверхности	
	Свободный	Порошок КНБ	

ПСТМ на основе СА	ПСА на связке Co	Лезвийная обработка цветных металлов и сплавов, Ti-сплавов, твердых сплавов, армированного стекло- и углеволокном пластика, необожженной керамики, древесно-стружечных композитов
	ПСА на связке SiC	
	ПСА на других связках	
	Монокристалл СА	
ПСТМ на основе КНБ	CVD-алмаз	Обработки наиболее абразивных композитов, цветных металлов и пластиков, правка шлифовальных кругов
	ПКНБ с Al-керамикой	Лезвийная обработка твердых черных металлов в диапазоне от черновой до чистовой обработки, обработка износостойких покрытий
	ПКНБ с Ti-керамикой	
	ПКНБ на связке Co	
ПКНБ на других связках		

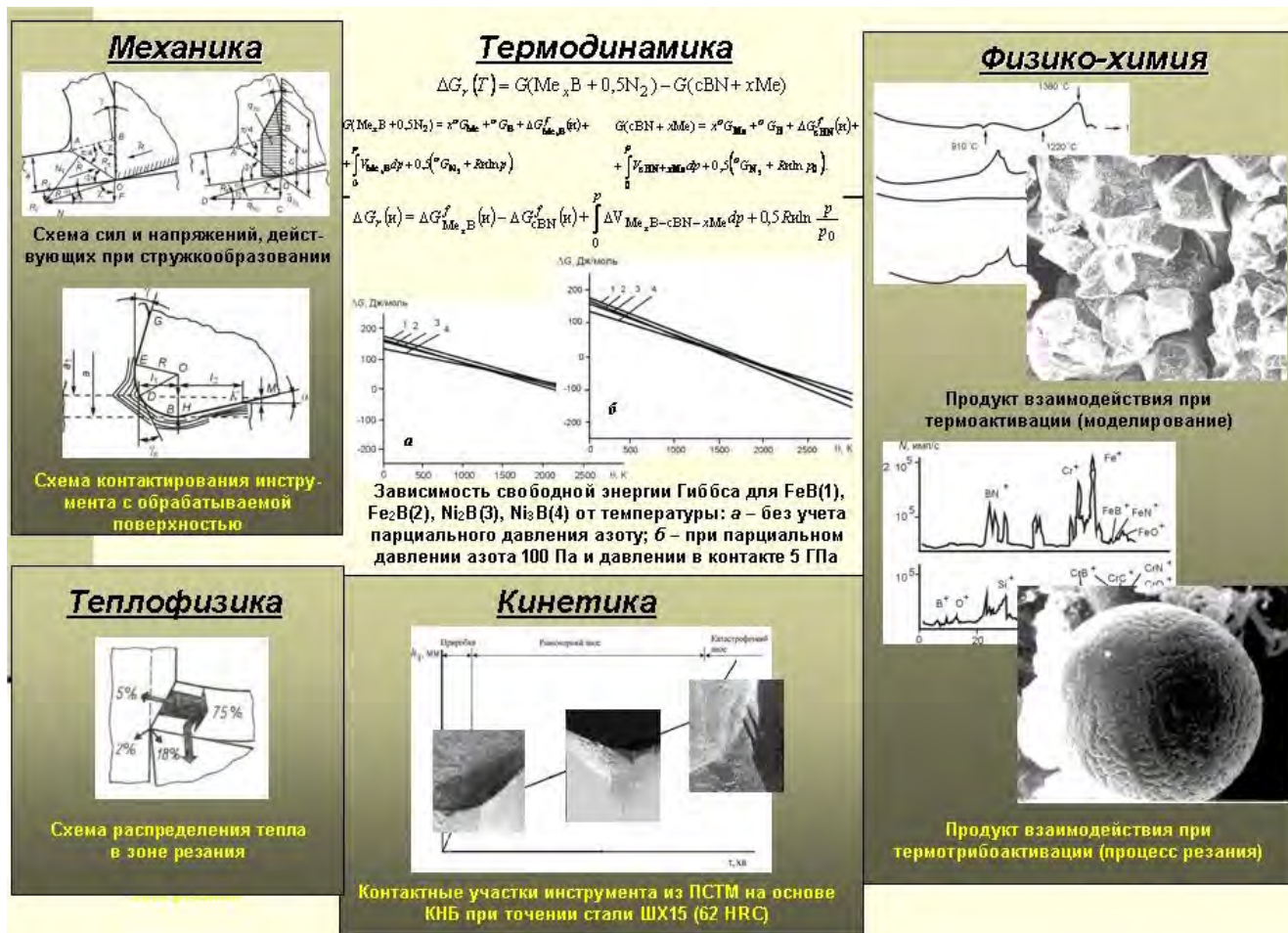


Рис. 1. Направления исследований контактного взаимодействия в зоне резания

Основным мировым тенденциям соответствуют следующие разработки ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины:

– создание композитов инструментального назначения с повышенными трибологическими свойствами и режущих инструментов на основе разработки представлений о контактном взаимодействии в зоне резания – разработка представлений об эволюции и адаптации структуры материалов режущих инструментов, самоорганизации на контактных участках инструментов при различных условиях эксплуатационного нагружения (фрактальная параметризация структуры и свойств твердых сплавов; абразивные инструменты со структурно-ориентированным рабочим слоем; эволюция микроструктуры силоксанового полимера в условиях термообработки);

– математическое и компьютерное моделирование теплофизического и напряженно-деформированного состояния рабочей зоны «инструмент – деталь» (оценка напряженного состояния в композите «ПСТМ на основе КНБ – покрытие»; моделирование процесса лазерного спекания алмаз- и КНБ-содержащих композитов);

– создание защитных покрытий для режущих инструментов на основе исследования контактного взаимодействия в зоне резания инструментами, оснащенными различными материалами;

– разработка комбинированных процессов формирования высококачественных поверхностей;

– создание механотронных высокоскоростных систем с ЧПУ и адаптивным управлением, микропроцессорное управление процессом обработки (стенд станка с параллельной кинематикой);

– диагностика состояния системы обработки резанием *in situ* (разработка методологии, приборного и программного обеспечения акустического контроля процесса обработки по параметрам стойкости режущего инструмента и качества обработанной поверхности).

Результаты работ по инструментально-технологическому направлению деятельности ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, разработок по конструированию, изготовлению и применению современного типажа инструментов для лезвийной, абразивной, деформирующей механообработки свидетельствуют о большом потенциале, инвестиционной привлекательности инструментального сектора техносферы Украины, показывают их высокую практическую значимость и востребованность промышленностью. Примеры таких разработок показаны на рис. 2.

Технологии механической обработки – неотъемлемая часть промышленного производства, использование возможностей которой непрерывно расширяется. Знание основных закономерностей проходящих в зоне обработки процессов с учетом принципов технологического обеспечения качества и технологической наследственности позволяет использовать в деталях машин современные конструкционные материалы с высокими потенциальными свойствами, формировать в поверхностном слое деталей требуемое состояние, обеспечивая тем самым их эксплуатационные свойства. Для этого прежде всего следует рассматривать проблему создания режущих инструментов и процессов механической обработки как актуальную задачу современного материаловедения, решение которой направлено на обеспечение прогресса металлообработки и машиностроения в целом.

Инновационное развитие рассматриваемого научного направления при надлежащей государственной поддержке и концентрации внимания на интеграции возможностей научных организаций и университетов со специалистами соответствующих отраслей промышленности и отдельных производств обеспечит Украине формирование собственного сектора в европейском индустриальном сегменте.

Приоритет развития инструментального направления в машиностроении Украины представляется весьма эффективным как по срокам окупаемости необходимых инвестиций и

их объемам, так и по коммерческой отдаче от реализации отечественной инструментальной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

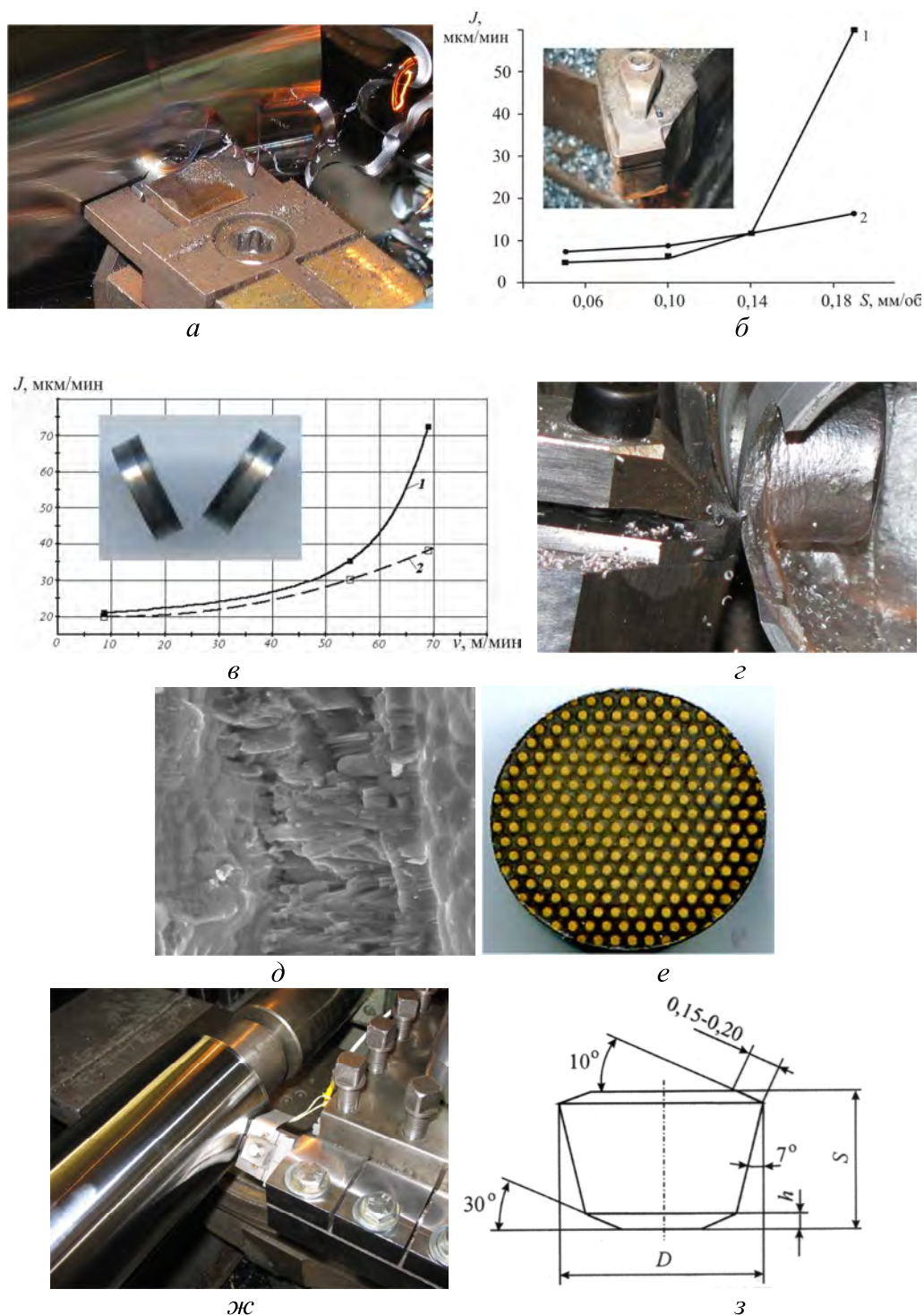


Рис. 2. Твердое точение стали инструментом с цилиндрической передней поверхностью, оснащенным ПСТМ борнитом (а), точения стали керамическим инструментом (1 – SS650, 2 –  $Al_2O_3-ZrC$ ) (б), точение напыленного покрытия  $Al_2O_3$  инструментом, оснащенным АТП (1) и АКП (2), (в), обработка силуминового поршня ДВС инструментом, оснащенным композитом с CVD алмазом (г), излом PVD-покрытия на режущей пластине из ПСТМ на основе КНБ (д), дискретное покрытие на твердосплавном инструменте (е), твердое «бреющее» точение стали (ж), режущая пластина из ПСТМ для оснащения резцов для обработки прокатных валков с ручьями (з)

*Зазначено переваги матеріалів на основі алмаза, кубічного нітрида бору та твердих сплавів, що використовуються в інструментах для механічної обробки важкооброблюваних матеріалів. Наведено позитивний 50-річний досвід та сучасні напрямки діяльності Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України щодо розробки, виготовлення та впровадження прогресивних матеріалів, інструментів та оптимальних режимів механообробки труднооброблюваних матеріалів.*

**Ключові слова:** надтвердий матеріал, інструмент, процеси і технології обробки, швидкість різання, шорсткість поверхні, якість, продуктивність.

*The advantages of Diamond, cubic Boron Nitride super-hard and Tungsten Carbides materials for equipping of tools for modern technologies of material machining are described in the article. The positive 50-year experience and main nowadays directions of scientific activity of the Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine to develop, manufacture and implement progressive materials and tools of them as well as optimized cutting regimes of hard-to-process materials machining are presented.*

**Key words:** super-hard materials, tools, processes and technologies of machining, cutting speed, surface roughness, quality, productivity.

Поступила 22.06.12

УДК 669.018.25

**Г. Ш. Упадхайя**, консультант, професор

*Индийский технологический институт, г. Канпур*

### **ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ СПЕКАНИЯ\***

*Время от времени ученые пытаются преодолеть разрыв между теорией и технологией спекания, но нерешенные вопросы остаются. Для объяснения процесса спекания порошковой прессовки рассматривают только тепловую энергию. Хотя для достижения уплотнения можно рассматривать также другие источники энергии (отдельно или в комплексе). Основная цель спекания – получить заданные свойства материала посредством изменения его микроструктуры. Однако при этом необходимо учитывать химическую природу спекаемого материала. Именно на этом этапе на авансцену выходит электронная структура материала. В настоящей статье разбирается этот аспект и показывается, что исследованиями нанокристаллических материалов можно проверить роль основных электронных процессов, происходящих в процессе спекания.*

**Ключевые слова:** спекание, модель, наноструктура, электронная структура.

#### **Введение**

Периодически ученые делали попытки привести определение понятие «процесс спекания». По мнению одних, это сцепление частиц в массе порошка силами молекулярного

---

\* Перепечатано с изменениями. Впервые опубликовано в «Proceedings of the 2010 World Powder Metallurgy Congress, Florence, organized by the European Powder Metallurgy Assotiation» под названием «Future Directions in Sintering Research» by G. S. Upadhyaya.

Перевод с английского А. В. Галкова, ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины.