



Ключевые слова:
ультрапрецизион-
ные технологии,
нанометровый
диапазон

Keywords:
extraprecision
technologies,
nanometer range

ЦЕНТР ИССЛЕДОВАНИЙ, РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ИМПОРТОНЕЗАВИСИМЫХ УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОСОБОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ТОЧНОСТЬЮ И КАЧЕСТВОМ В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Георгий БОРОВСКИЙ

В работе приведены сведения об исследованиях, разработке и внедрении технологий и ультрапрецизионного оборудования для обработки деталей с точностью и качеством в нанометровом диапазоне.

The work provides information on research, development and deployment of technologies and extraprecision equipment for machining of parts with precision and quality in the nanometer range.

Всероссийский научно-исследовательский инструментальный институт ОАО «ВНИИ-ИНСТРУМЕНТ» основан в Москве в 1943 г. В настоящее время является отраслевым научно-исследовательским центром в области станкостроения и инструментального производства Холдинговой компании АО «Станкопром» Государственной корпорации «Ростех». Высококвалифицированные специалисты института на собственной опытно-экспериментальной базе ведут комплексные научно-исследовательские, опытно-конструкторские и инновационно-технологические работы (НИОКТР) по созданию и внедрению эффективных технологий металлообработки и деревообработки, специального высокопроизводительного оборудования, режущего, вспомогательного, мерительного, слесарно-монтажного, абразивного и алмазного инструмента, оснастки, обеспечивают их оптимальную эксплуатацию и мониторинг.

Основные направления деятельности и развития ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»:

- проведение комплексных научно-исследовательских, опытно-конструкторских и инновационно-технологических работ (НИОКТР=R&D&E) в области обрабатывающих технологий, автоматизированного оборудования и наукоемкого инструмента, обеспечение их освоения и серийного выпуска и в институте, и с российскими предприятиями станкоинструментальной промышленности;
- технологический аудит предприятий, экспертиза проектов техперевооружения предприятий и предложений по закупкам оборудования, прежде всего, за счет средств госбюджета, обеспечивающих сокращение инвестиционных расходов, повышение качества проектов и результатов их реализации;
- создание инновационных технологий высокоточной обработки сложных деталей из металлических и композиционных материалов, разработка и реализация «под ключ» проектов технологического перевооружения предприятий, поставка,

пуско-наладка и сервисное обслуживание в течение всего жизненного цикла завершённых экологически чистых технологических систем, обеспечивающих повышение производительности до 10 и более раз, сокращение энергопотребления и производственных площадей в 2–3 раза;

- разработка максимально детализированных технических заданий на специальное высокопроизводительное оборудование для гарантированного достижения показателей инновационных технологий при минимальной себестоимости, поиск потенциальных изготовителей такого оборудования, согласование и отработка ТЗ;
- создание комплексных отечественных инновационных технологических решений для ультрапрецизионной обработки алмазным точением, фрезерованием и шлифованием особо точных ответственных деталей из труднообрабатываемых материалов с точностью формы $P-V < 100$ нм и оптическим качеством поверхности $Ra \leq 5$ нм (разработка и изготовление ультрапрецизионных технологических модулей с ЧПУ, сверхвысокоточного контрольно-измерительного оборудования, специального инструмента из сверхтвёрдых материалов, специальной технологической оснастки);
- исследование процессов резания металлических и композиционных материалов с получением объективной информации для научно обоснованной оптимизации параметров технологических процессов обработки деталей машин и характеристик необходимого оборудования;
- разработка конструкций, технологий изготовления и производство наукоемких инструментов из наноструктурных, субмикронных и ультрадисперсных инструментальных материалов, в том числе со специальными покрытиями, для высокопроизводительной экологически чистой обработки;
- стандартизация и сертификация инструмента и инструментальных материалов, метрологическая и патентная экспертиза.

Созданное институтом новое оборудование позволяет оптимизировать параметры проектов технологического перевооружения и покупаемых станков, базируясь на объективных научно обоснованных данных, полученных экспериментальным путем, с применением:

- многофункционального автоматизированного исследовательского комплекса, работающего с наноразмерной точностью и обладающего уникальными характеристиками и возможностями, разработанного и изготовленного совместно с компанией *Willemín-Macodel* (Швейцария);
- многокоординатного шлифовально-заточного технологического модуля с ЧПУ, созданного в

результате сотрудничества ОАО «ВНИИИН-СТРУМЕНТ», ОАО НИПТИ «Микрон» и МГТУ «СТАНКИН».

С каждым годом в мире производство ультрапрецизионных станков растет на 20–30%, а в России единственным разработчиком технологий и изготовителем Hi-Tech оборудования является ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ». Именно разработки его сотрудников помогут получить российской промышленности и науке современное высокотехнологичное импортонезависимое оборудование.

В течение последних пяти лет особое внимание в институте уделяется новому научному направлению — ультрапрецизионной тематике (создание комплексных отечественных инновационных решений: разработка технологических процессов и изготовление ультрапрецизионных технологических модулей с ЧПУ, сверхвысокоточного контрольно-измерительного оборудования, специального инструмента из сверхтвёрдых материалов, специальной технологической оснастки для ультрапрецизионной обработки алмазным точением, фрезерованием и шлифованием особо точных ответственных деталей из труднообрабатываемых материалов с точностью формы $P-V < 100$ нм и оптическим качеством поверхности $Ra \leq 5$ нм).

Современная высокотехнологичная промышленность нуждается в технологиях, позволяющих обрабатывать хрупкие материалы, в число которых входят и кристаллы, с оптическим качеством поверхности. Зачастую показатели качества обработанных деталей на самом деле должны быть на порядок выше заявленных, однако отсутствие методов обработки и оборудования необходимого класса точности приводит к тому, что производитель вынужден довольствоваться той шероховатостью поверхности и точностью формы деталей, которые могут быть обеспечены традиционными методами обработки.

На данный момент хрупкие материалы обрабатываются при помощи шлифования и полирования. Этот трудоемкий процесс осуществляется в несколько стадий и может занимать от нескольких дней до нескольких недель. Как правило, обработка ведется в следующей последовательности: поверхность обрабатываемой детали шлифуется абразивными кругами с постепенным снижением зернистости, а далее деталь дорабатывается полированием в агрессивной среде. Таким образом, обработка поверхности детали совмещает в себе обработку связанным и свободным абразивом. Описанный выше метод используется давно, однако имеет некоторые существенные недостатки:

- полировальник прижимается к обрабатываемой детали с определенным усилием, что приводит к выкалыванию частиц обрабатываемого материала и образованию трещин на обрабаты-

ваемой поверхности. Последующая обработка только увеличивает скорость распространения трещин и вызывает в итоге лавинообразное образование трещиноватого (поврежденного) слоя;

- из-за тесного взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов велика вероятность шаржирования обработанной поверхности, что приводит к визуальным дефектам. Эта проблема особо остро стоит для поверхностей оптических деталей;
- традиционная схема обработки имеет низкую производительность и не способна обеспечить современные максимально достижимые показатели качества, так как шероховатость поверхности менее 20 нм и точность формы менее 200 нм;
- традиционную схему трудно адаптировать для деталей произвольных (например, асферических) форм;
- применение химических сред при полировании деталей наносит вред окружающей среде и здоровью персонала.

Указанные недостатки критичны при современном мировом уровне требований к качеству выпускаемых деталей для оптической и электронной промышленности, следовательно, необходимо внедрять принципиально новые технологии обработки хрупких материалов.

Таким нововведением может стать обработка в квазипластичном режиме. Основой этого метода является способность обрабатываемого материала при определенных условиях в зоне резания менять свои свойства. Так, хрупкие материалы при специально созданном в зоне резания высоком контактом давлении ведут себя как пластичные и могут быть обработаны с показателями качества, которые сегодня достижимы только при обработке металлов и их сплавов.

Например, при обработке кварцевого стекла, кристаллов соли типа KDP (дигидрофосфат калия), германия резание в квазипластичном режиме позволяет достигнуть шероховатости поверхности не более 1 нм и точности формы не более 10 нм. Метод позволяет обрабатывать как плоские поверхности, так и поверхности произвольной (асферической) формы.

Квазипластичный режим резания обеспечивает целым рядом факторов. В их число помимо необходимой критической толщины срезаемой стружки, обеспечиваемой режимными параметрами процесса (подачей и глубиной резания) и геометрическими параметрами режущего инструмента, входят также технические характеристики оборудования.

Для квазипластичного режима обработки необходимо обеспечить:

- беспрецедентно высокую жесткость станочной системы, поскольку обеспечение режимных параметров связано не столько с показателями дискретности перемещений узлов станка, сколько с упругим отжатием режущего инструмента;
 - толщину срезаемой стружки обрабатываемого материала ниже критической, то есть в пределах 10...100 нм (в зависимости от свойств обрабатываемого материала). При этой толщине стружка обрабатываемого материала переходит в другое состояние (стружка скалывания переходит в сливную стружку), что является основным признаком изменения поведения обрабатываемого материала;
 - режимные параметры процесса, а именно подачу и глубину резания, в пределах от нескольких нм до 1...2 мкм (в зависимости от свойств обрабатываемого материала). В случае если значения режимных параметров не соответствуют установленному уровню, достижение критической толщины стружки невозможно, следовательно, обрабатываемый хрупкий материал не переходит в пластичное состояние;
 - соответствующие геометрические параметры режущего инструмента. В частности, для создания необходимого высокого давления в зоне резания передний угол режущего инструмента должен быть отрицательным (конкретное значение величины угла определяется теоретически и экспериментально); для обеспечения необходимой толщины срезаемой стружки необходимо, чтобы радиус при вершине инструмента был достаточно большим, а радиус округления режущей кромки составлял от единиц до десятков нанометров.
- Таким образом, для реализации квазипластичного режима обработки необходим специальный алмазный монокристаллический инструмент и уникальное сверхжесткое ультраточное оборудование.
- Основные преимущества данного метода:
- возможность обработки хрупких материалов (оптических стекол, германия, кристаллов KDP) с достижением значения шероховатости не более 1 нм и отклонения формы не более 10 нм;
 - возможность обработки деталей любой произвольной формы, в том числе асферической;
 - минимизация образования трещин на обработанных поверхностях вплоть до полного их исключения (особо важно для деталей, используемых в электронной промышленности);
 - более высокая производительность, так как требуемые показатели качества достигаются посредством одного вида обработки, а длительность операции зависит только от наследственных качеств заготовки;
 - экологичность.

В ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» последние несколько лет проводятся комплексные исследования по разработке инновационных технологий и созданию ультрапрецизионного оборудования для обработки широкой номенклатуры материалов. В их число входят: закаленные стали, твердые сплавы, цветные сплавы, а также хрупкие оптические материалы.

Основные принципы, реализуемые ОАО «ВНИИ-ИНСТРУМЕНТ» при создании ультрапрецизионного оборудования:

- использование аэростатических направляющих и опор с пористым дросселированием и вакуумным натягом;
- использование системы виброизоляции с собственной частотой колебаний не более 5 Гц;
- использование электроприводов прямого действия на базе встроенных маловиброактивных безжелезных двигателей в комплекте с датчиками обратной связи нанометрового разрешения.

Для обработки плоских поверхностей хрупких кристаллов группы KDP методом алмазного фрезерования сконструирован и изготовлен специаль-

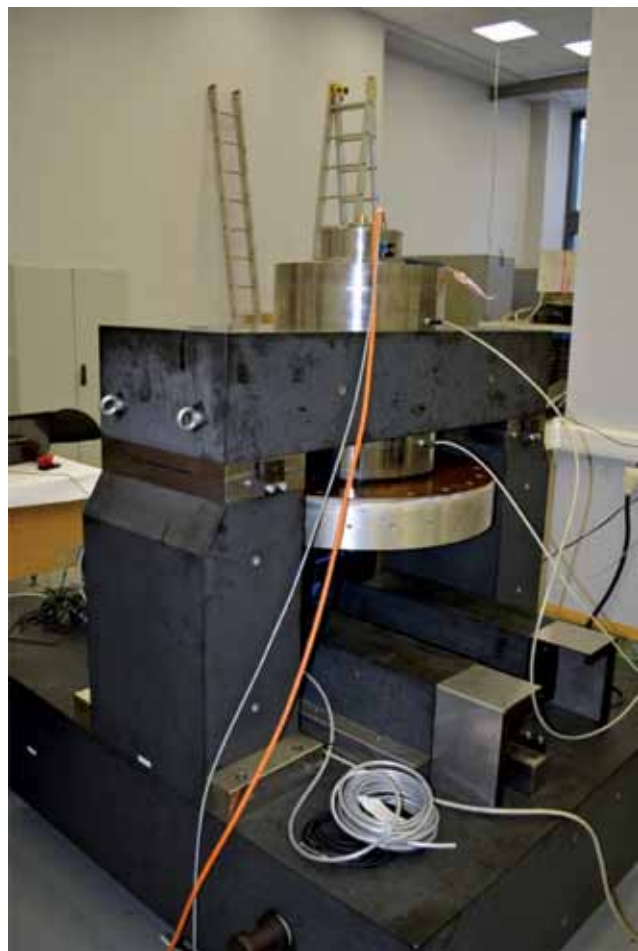


Рис. 1. Стенд для алмазного микрофрезерования кристаллов

Таблица 1. Параметры ультрапрецизионного станда для плоского алмазного микрофрезерования кристаллов группы KDP

| № п/п | Параметр станда | Значение параметра |
|-------|--|--------------------|
| 1. | Число координатных осей: Ось X — движение продольного суппорта; Ось C — движение шпиндельного узла | 2 |
| 2. | Наибольшее перемещение продольного суппорта (передвижение заготовки), ось X, мм | 800 |
| 3. | Диапазон частот вращения шпиндельного узла, об/мин | 20...600 |
| 4. | Рабочая подача продольного суппорта, мм/мин | 50...500 |
| 5. | Дискретность перемещения продольного суппорта, мкм | 0,01 |
| 6. | Мощность электродвигателя шпинделя, кВт | 0,7 |

ный ультрапрецизионный экспериментальный стенд, представленный на рис. 1 и в табл. 1. Стенд предназначен для алмазного микрофрезерования кристаллов группы KDP с шероховатостью поверхности не более 10 нм и точностью поверхности не хуже 50 нм на обрабатываемой поверхности размерами 100 × 100 мм.

Предварительные экспериментальные исследования показывают, что при использовании алмазного монокристаллического инструмента с радиусом округления при вершине 4...5 мм толщина снимаемой стружки на разных режимах составляет от 20 до 400 нм. Таким образом, данный стенд может гарантировать при обработке кристаллов группы KDP режим квазипластичного резания.

Для алмазного точения и фрезерования поверхностей сферической и асферической формы деталей из цветных сплавов и хрупких материалов в ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» разработан и находится на стадии изготовления специальный ультрапрецизионный стенд, представленный на рис. 2 и в табл. 2.

Стенд предназначен для ультрапрецизионной обработки широкого спектра различных материалов: кристаллы (кремний, германий, арсенид галлия, фториды магния и калия и т.д.), полимеры (поликарбонат, полистирол, акрил и т.д.), металлы (алюминий, серебро, золото, бериллий, медь, платина, свинец, магний, латунь, бронза, никель и т.д.).

В настоящее время в рамках Соглашения № 14.579.21.0042 от 25.08.2014 (уникальный идентификатор RFMEFI57914X0042) между ОАО «ВНИИ-ИНСТРУМЕНТ» и Министерством образования и науки РФ по теме «Разработка технологии и оборудо-

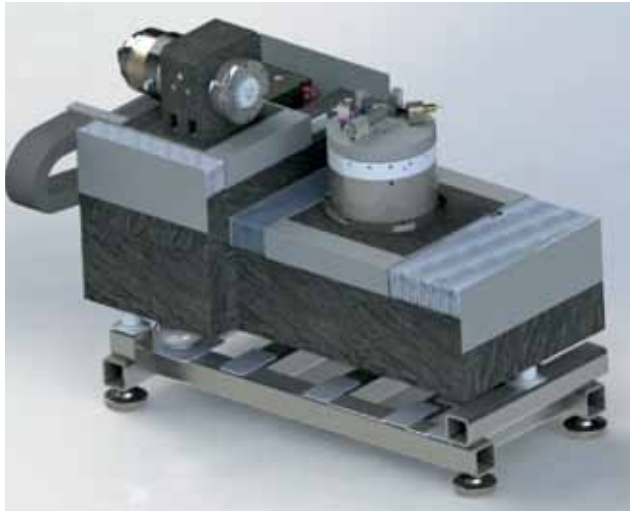


Рис. 2. Стенд для сверхточного алмазного точения сферических и асферических поверхностей

Таблица 2. Параметры ультрапрецизионного стенда для алмазного точения деталей сферической и асферической формы из хрупких материалов

| № п/п | Параметр станка | Значение параметра |
|-------|--|--------------------|
| 1. | Габариты обрабатываемых изделий: диаметр, мм длина, мм | 100 100 |
| 2. | Наибольшее перемещение продольного суппорта, ось Z, мм | 200 |
| 3. | Наибольшее перемещение поперечного суппорта, ось X, мм | 300 |
| 4. | Диапазон частот вращения шпинделя главного движения, ось S, мин ⁻¹ | 50...5000 |
| 5. | Диапазон частот вращения привода главного движения, ось С, мин ⁻¹ | 0...200 |
| 6. | Диапазон частот вращения шпинделя фрезерно-шлифовальной головки, мин ⁻¹ | 0...50 000 |
| 7. | Диапазон рабочих подач продольного суппорта, ось Z, мм/мин | 0...200 |
| 8. | Диапазон рабочих подач поперечного суппорта, ось X, мм/мин | 0...200 |
| 9. | Диапазон рабочих подач поворотного стола, ось В, мин ⁻¹ | 0...10 |
| 10. | Дискретность задания перемещения продольного суппорта, мкм | 0,001 |
| 11. | Дискретность задания перемещения поперечного суппорта, мкм | 0,001 |
| 12. | Дискретность задания перемещения поворотного стола, ось В, угловых с | 0,01 |

дования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания» разрабатывается экспериментальный образец специального ультрапрецизионного стенда, который позволит производить обработку алмазным шлифовальным и монокристаллическим лезвийным инструментом поверхностей различной (в том числе произвольной) формы деталей из хрупких оптических материалов. На рис. 3 и в табл. 3 приведены схема и параметры разрабатываемого стенда с обозначением основных узлов.

Таким образом, обработка методом пластичного резания с использованием специального инструмента (алмазный круг на металлической связке, алмазный резец или фреза) позволяет получить оптическую поверхность при обработке практически любого хрупкого материала, на поверхностях практически любой формы с нанометровой точностью и шероховатостью при практически полном отсутствии нарушенного слоя. В настоящее время на поверхности кристалла KDP экспериментально уже достигнута шероховатость около 1 нм!

В целях организации серийного выпуска уникального отечественного оборудования и инструмента и полной ликвидации технологической зависимости в чрезвычайно важной для страны области науки и производства необходимо выполнение в 2016–2020 гг. комплексной НИОКР: «Разработка гаммы многокоординатных ультрапрецизионных

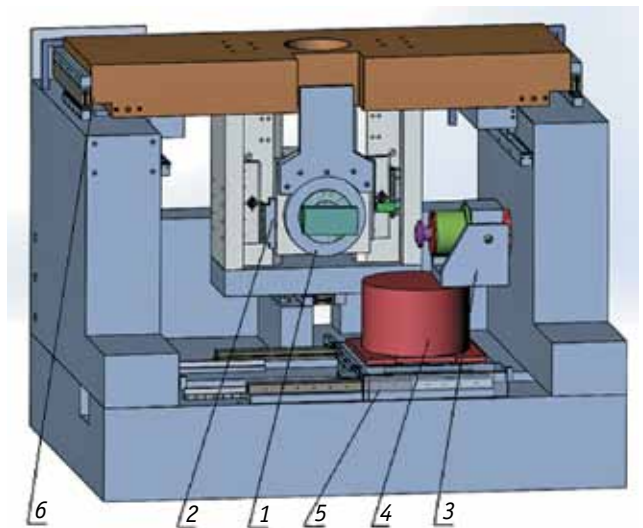


Рис. 3. Схема разрабатываемого сверхжесткого ультрапрецизионного экспериментального стенда для алмазного точения и шлифования в квазипластичном режиме:

- 1 — шпиндель заготовки; 2 — вертикальный суппорт; 3 — инструментальный шпиндель; 4 — поворотный стол; 5 — поперечный суппорт; 6 — продольный суппорт

Таблица 3. Параметры ультрапрецизионного станда для наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания

| № п/п | Параметр станка | Значение параметра |
|-------|---|--------------------|
| 1. | Габариты обрабатываемых изделий: длина, мм ширина, мм высота, мм | 210 150 100 |
| 2. | Наибольшее перемещение продольного суппорта, ось Z, мм | 150 |
| 3. | Наибольшее перемещение поперечного суппорта, ось X, мм | 250 |
| 4. | Наибольшее перемещение вертикального суппорта, ось Y, мм | 100 |
| 4. | Диапазон частот вращения шпинделя главного движения, ось S, мин ⁻¹ | 50...3000 |
| 5. | Диапазон частот вращения шпинделя изделия, ось S1, мин ⁻¹ | 1...1000 |
| 6. | Диапазон рабочих подач продольного суппорта, ось Z, мм/мин | 0...100 |
| 7. | Диапазон рабочих подач поперечного суппорта, ось X, мм/мин | 0...100 |
| 8. | Диапазон рабочих подач поворотного стола, ось B, мин ⁻¹ | 0...10 |
| 9. | Дискретность задания перемещения продольного суппорта, мкм | 0,0001 |
| 10. | Дискретность задания перемещения поперечного суппорта, мкм | 0,0001 |
| 11. | Дискретность задания перемещения поворотного стола, ось B, угловых с | 0,0001 |

шлифовальных, фрезерных и токарных обрабатывающих центров модульной конструкции».

Реализация предлагаемого проекта обеспечит российские предприятия (прежде всего высокотехнологичные производства и ОПК), научно-исследовательские центры и институты РАН современным импортонезависимым оборудованием.

Подобные технологии позволят создать особоответственные ультрапрецизионные детали, в том числе с микроструктурами, из различных материалов, включая труднообрабатываемые, с шероховатостью поверхности менее 5 нм и точностью формы лучше 50 нм за счет проведения комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при обеспечении следующих российских технологических платформ:

→ инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии — фотоника — в части создания технологического оборудования и базовых технологий производства элементов и

узлов лазерно-оптической техники, лазерной обработки промышленных материалов, включая материалы судо- и авиационной, атомной и космической техники, а также прецизионную обработку в микро- и нанoeлектронике;

→ управляемый термоядерный синтез — в части создания технологического оборудования и базовых технологий для ультрапрецизионной обработки новых материалов — водорастворимых кристаллов большой апертуры группы KDP, DKDP, используемых для генерации фемтосекундных лазерных импульсов тераваттного уровня мощности;

→ технологии мехатроники, встраиваемых систем управления, радиочастотной идентификации и роботостроения — в части создания оборудования, систем и технологий для микро- и нанопереработки элементов микропроцессорной электроники, подложек кристаллов, сенсорных элементов, микророботов, исполнительных элементов и систем.

Создаваемое технологическое ультрапрецизионное оборудование по своим эксплуатационным, функциональным и точностным характеристикам соответствует лучшим мировым аналогам, выпускаемым такими лидерами мировой ультрапрецизионной станкостроительной промышленности, как «Moore nanotechnology systems» (США), «Precitech Ultra Precision» (США), «Kugler Precision» (Германия), «LT Ultra» (Германия), «Fanuc» (Япония), «Toshiba Machine Co, LTD» (Япония).

Уникальное отечественное оборудование и инновационные технологии обеспечат технологическую и информационную независимость от импортных поставок в таких отраслях, как атомная, оборонная, аэрокосмическая, приборостроительная, оптическая и электронная, а также при проведении фундаментальных исследований, имеющих стратегически важное значение.

Выводы

В связи с тем, что прорывные ультрапрецизионные технологии, оборудование и их компоненты имеют почти исключительно оборонное назначение и поставки его в РФ из-за рубежа ограничены или запрещены, отечественное производство ультрапрецизионных технологических модулей на базе российских «ноу-хау», систем ЧПУ, программного обеспечения и иных комплектующих особенно актуально.

Георгий Владиславович БОРОВСКИЙ —

Заслуженный машиностроитель Российской Федерации, генеральный директор ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»