



**Разработка изделий из нанокерамических
и композитных материалов
с применением методов формования сухих нанопорошков и
спарк-плазменного спекания**

Хасанов О.Л., профессор, д.т.н.,

Зав.кафедрой “Наноматериалы и нанотехнологии”

Национального исследовательского Томского политехнического университета

Директор Нано-Центра ТПУ

<http://portal.tpu.ru/departments/centre/nano>

khasanov@tpu.ru

Нано-Центр Национального исследовательского Томского политехнического университета имеет опыт проведения НИОКТР в рамках

- выполнения постановления Правительства РФ №218 (совместно с Холдингом ПАО «НЭВЗ-Союз»)
 - ФЦП «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации»
 - ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007-2013 и 2014-2020 годы
 - Международного научно-технического центра (МНТЦ)
 - договоров и контрактов с российскими и зарубежными заказчиками
- АО «Сибхимкомбинат» ГК Росатом;
 - ФИОП Роснано
 - Nissan Motor Co. (Япония)
 - Korea Electronics Co. (Южная Корея)
 - Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme –IKTS (Германия)
 - Чунцинский университет науки и искусств (Китай)
 - «Компания Bosch» (С.-Петербург)
 - и другие



Опыт исследований ультрадисперсных (нано-) порошков и разработок объемных наноматериалов на их основе - более 30 лет (с 1981 года)



**Основное направление исследований:
разработка технологий изготовления изделий
из функциональной и конструкционной керамики
на основе нано- и микро-дисперсных порошков**

В Нано-Центре ТПУ
разработаны **методы регулирования сил трения**
и обеспечения **равномерного распределения плотности** при компактировании
(прессовании, формовании) **сухих** нанопорошков
без применения пластификаторов и связок (примесных веществ)

Методы основаны
на применении **ультразвукового воздействия**
в процессе прессования сухих нано- и полидисперсных порошков
и на способах перераспределения сил трения
при сухом прессовании **в пресс-формах специальной конструкции**
(«коллекторных» пресс-формах)

*Khasanov O. Advances in Applied Ceramics,
2008, V.107, No.3, p.135-141.*

*Khasanov O. Global Roadmap for Ceramics.
Proc. 2nd Int. Congress on Ceramics ICC2, 2008, Italy, p.359-368.*

Методы применены для разработки изделий из многих типов функциональных, конструкционных керамических материалов и композитов:

$ZrO_2-Y_2O_3$	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	$Yb:(Lu_xY_{(1-x)}O_3)$
$Nd-Y_2O_3$	Al_2MgO_4	$Al/Mg-B_4C-nanoW$
$(Ba,Sr)TiO_3$	$Pb(Zr,Ti)O_3$	$InSnO$ (ITO)
$Ba-W-Ti-O$	ZrB_2	ZnO
Al_2O_3	B_4C	$SmFeN$
Al_2O_3-Fe	SiC	
AlN	$YBa_2Cu_3O_{7-x};$	$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+y};$ $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{8+y}$

.

Патентование

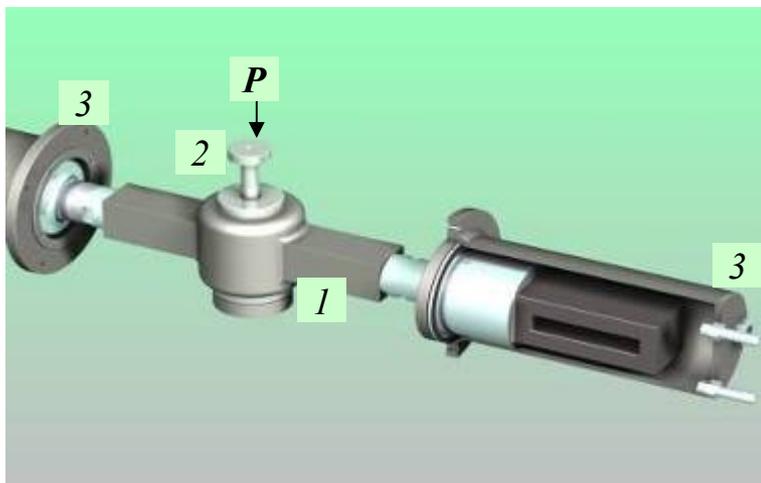
«Способ прессования изделий из порошковых материалов и пресс-форма для его осуществления»

“Method for pressing articles from powder materials and a mold for carrying out said method”

- ✓ Патент РФ №2225280 (2004)
- ✓ Патент США № 6919041 (2005)
- ✓ Евразийский патент (Казахстан, Беларусь) № 005325 (2005)
- ✓ Патент Украины № 75885 (2006)
- ✓ Патент Южной Кореи № 10-0855047 (2008)
- ✓ Европатент (Германия, Италия, Франция) № 1459823 (2009)
- ✓ Патент Индии №258846 (2014)



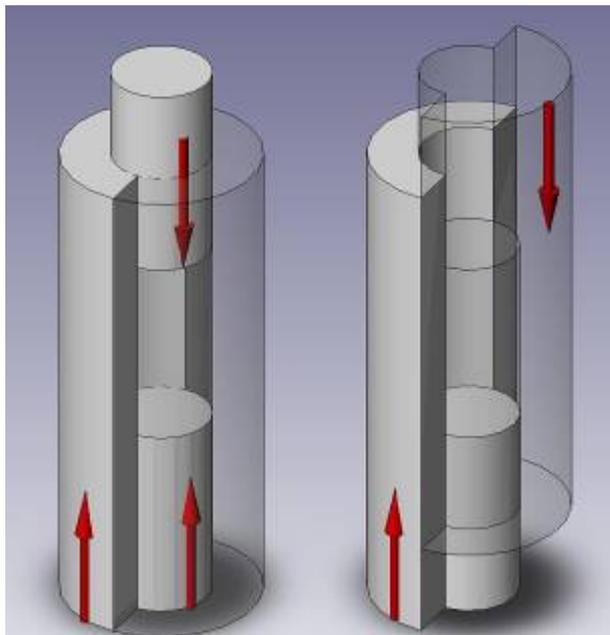
Компактирование сухих nano- и полидисперсных порошков под действием ультразвука



Одновременно с давлением одноосного прессования P к матрице пресс-формы (1) перпендикулярно оси прессования пуансонов (2) от широкополосного УЗ-генератора через магнитострикционные преобразователи (3) **подводятся УЗ-колебания** с фиксированной частотой f , но **с различной мощностью W** , в течение времени t

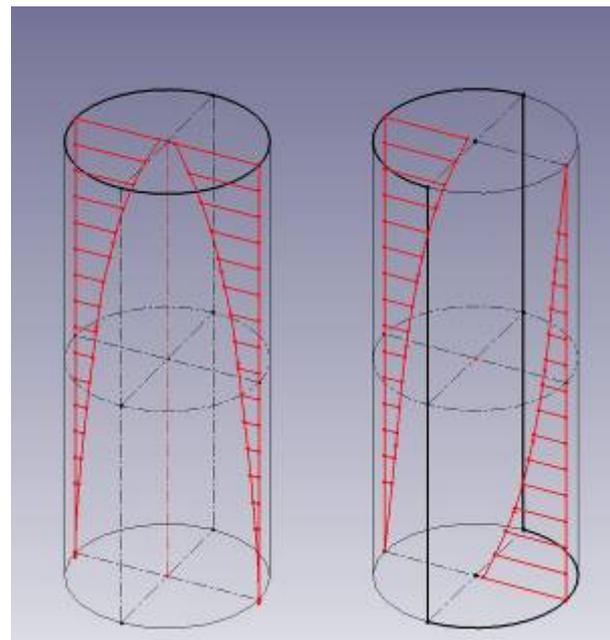
- ❖ Оптимизация режимов (P ; W ; t) ⇒
 - *равномерная упаковка частиц в объеме заданной формы ⇒*
 - *минимальные градиенты остаточных механических напряжений в прессовке ⇒*
 - *равномерная усадка при спекании без короблений и других дефектов*
- ❖ УЗВ позволяет деагломерировать нанопорошок в процессе вибрационных соударений частиц ⇒
 - *механоактивация в процессе прессования, непосредственно перед спеканием ⇒*
 - *понижение температуры спекания, уменьшение скорости роста зерен*

Компактирование сухих nano- и полидисперсных порошков коллекторным способом

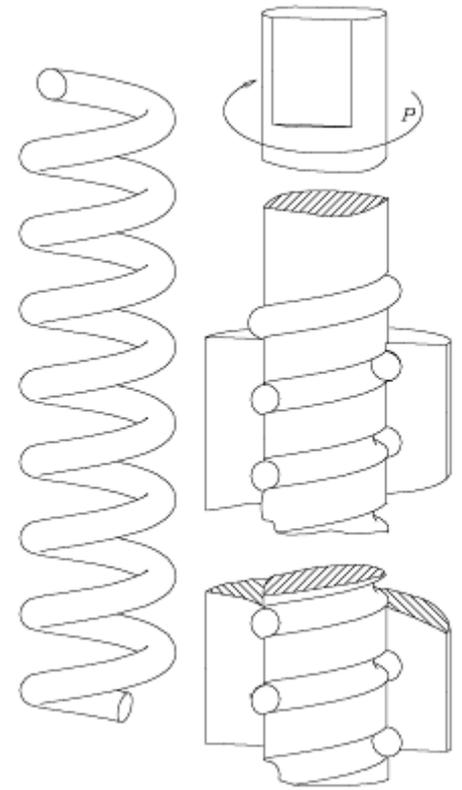
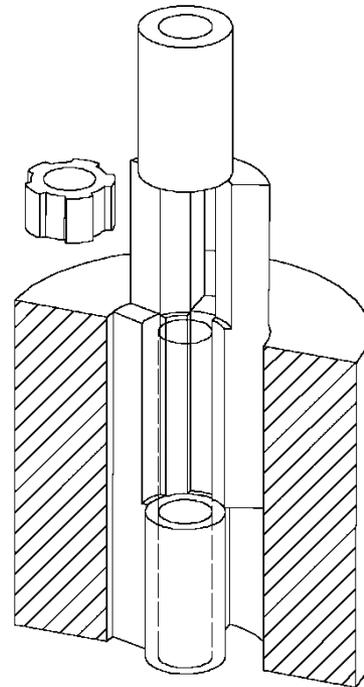
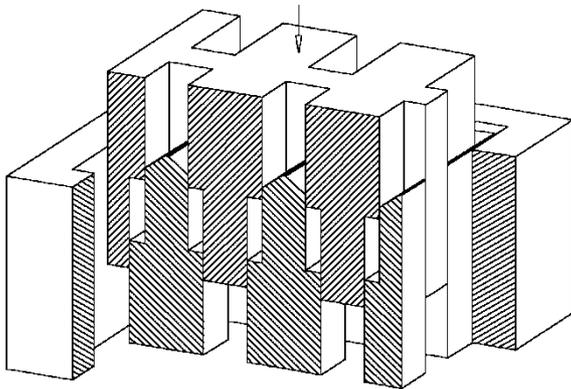
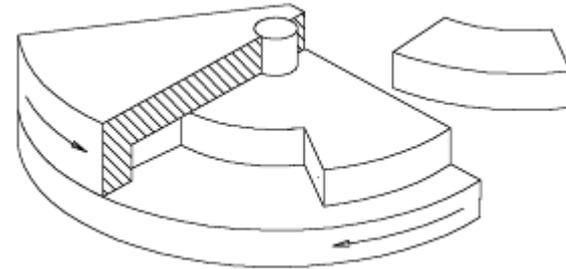
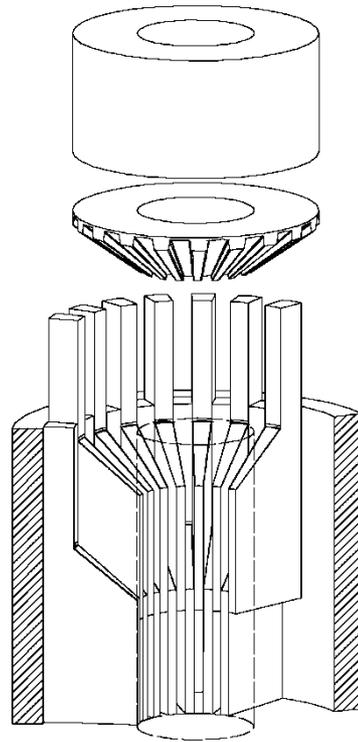
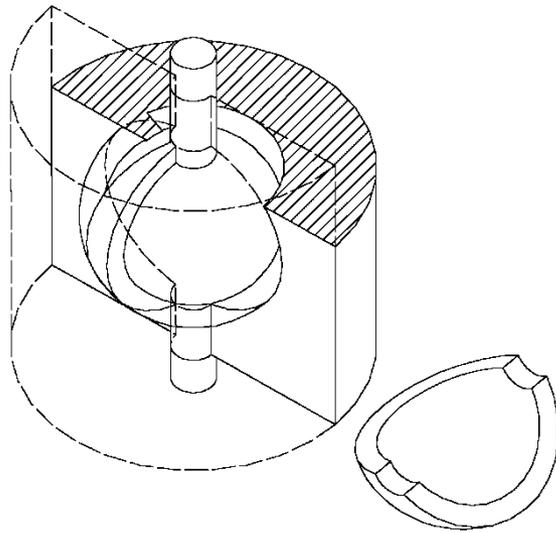


Силы пристенного трения перераспределяются так, чтобы средняя в любом горизонтальном сечении плотность оставалась одинаковой

Эпюры сил пристенного трения и распределения плотности по высоте прессовки для обычного и коллекторного прессования

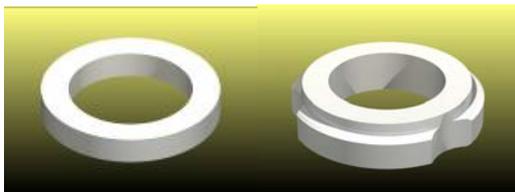


Некоторые конструкции коллекторных пресс-форм



Примеры разработанных керамических изделий

- Совместно с Сибхимкомбинатом (СХК) Росатома - торцевые уплотнения гидронасосов автотракторных двигателей испытаны в **ОАО “Алтайский завод агрегатов”**. Износостойкость в 20 раз выше, чем стандартных металлографитовых уплотнений НАМИ ГСТАФ-40.
- Турбины бензонасосов изготовлены для **ООО “Томск-АвтоЗИЛ”**.
- Износостойкие пластины из $ZrO_2-Y_2O_3$ изготовлены для **ООО «Лотта-СПб»**
- Пьезокерамика ЦТС изготовлена для **Ульсанского университета фирмы Hyundai (Южная Корея)** в рамках международного проекта Миннауки РФ.
- Сегнетокерамические подложки для ИК-датчиков из НП $Ba(Sr,Ca)TiO_3$ изготовлены по контракту с фирмой **Korea Electronics Co. (Южная Корея)**.
- Корпуса СВЧ-смесителей из НП $Ba-W-Ti-O$ изготовлены по контракту с фирмой **(CIJ Co., Ю.Корея)**.
- Мишени для магнетронного распыления из ZrB_2 – коллекторная пресс-форма разработана для **Сибхимкомбината Росатома**.
- Мишени для магнетронного распыления из ZnO – коллекторная пресс-форма разработана для **ОАО «ПОЛЕМА»**
- Фильтры, дорны, калибры, экструзионные матрицы из конструкционной циркониевой нанокерамики на основе НП $ZrO_2-5\%Y_2O_3$ (YSZ) изготовлены для **ЗАО «Сибкабель»**



Торцевые уплотнения
для автомобильных
гидронасосов



Фильтра



Дорн



Калибр



Матрица



Турбины
бензонасосов

Основные преимущества технологии

1. Прессование проводится при комнатной температуре, в обычных гидравлических прессах, поэтому **технология экономичнее**, чем методы формования из гранулятов со связками, шликерное литье, горячее прессование, изостатическое или газостатическое прессование, для которых требуется специальное сложное и более дорогостоящее оборудование
2. **Из технологии исключаются пластификаторы и связки** как потенциальные источники образования примесей и остаточной пористости в спеченных изделиях
3. Из технологии **исключаются стадии** приготовления смесей порошков с пластификаторами (шликерных составов) и их удаления (отжига) в процессе спекания; тем самым **сокращается длительность** всего технологического процесса и особенно длительность спекания, что способствует **сохранению наноструктуры**
4. **Уменьшение себестоимости** изделий
5. Возможность формования **изделий сложной формы из различных порошков** (керамических, композитных, металлических, сплавов)
6. Возможность изготовления деталей с **прецизионными допусками на размеры, без дополнительной механообработки**
7. **Высокая однородность и прочность** изделий

Разработки изделий из наноструктурной керамики и композитов, выполненные в Нано-Центре ТПУ

1) Керамика, прозрачная в видимом и ИК-диапазонах.

Области применения:

- прозрачная бронекерамика для автомобильных окон, иллюминаторов
- тела накачки из высокопрозрачной керамики для мощных твердотельных лазеров
- приборы ночного видения
- системы теплообмена, где требуется передача тепловой энергии излучением (ИК-прозрачные тепловые экраны и т.п.)
- сцинтилляторы в медицинских, промышленных томографах, досмотровых системах из прозрачной керамики (взамен дорогостоящих монокристалльных)

2) Бронекерамика (керамические бронезащитные элементы для бронепанелей, бронезащитных жилетов)

3) Теплопроводная диэлектрическая керамика для электроники

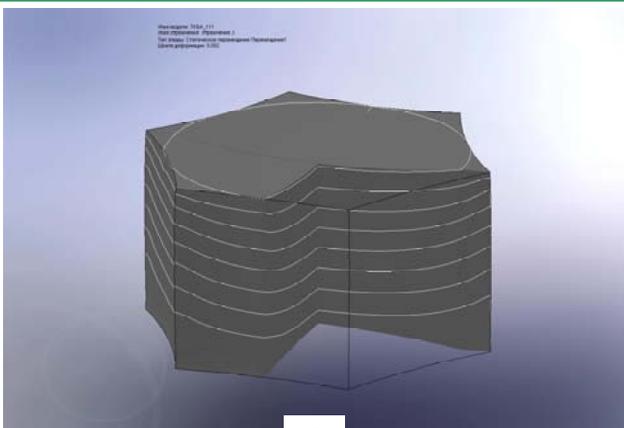
4) Легкие радиационно-защитные корпуса для бортовой электроники космических аппаратов; для радиационно-опасных производств

5) Легкая магнитная керамика (для электромобилей, генераторов постоянного тока и др.)

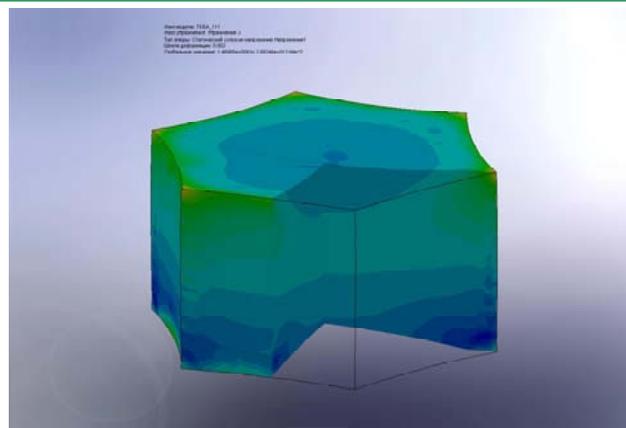
6) Высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) керамика для датчиков магнитных полей (сквидов), накопителей энергии, систем магнитно-левитационного транспорта

7) Пьезо-, сегнето-керамика (для пьезотехники, ИК-датчиков, и др.)

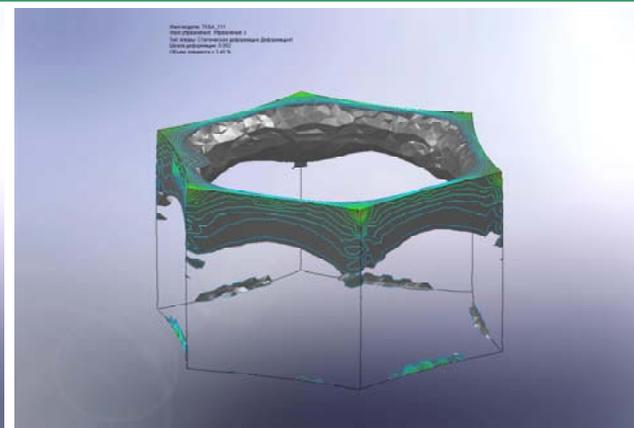
Изготовление бронепластин заданной формы коллекторным способом



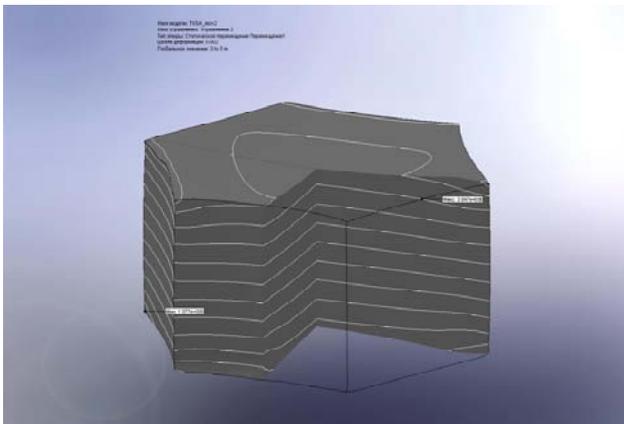
a



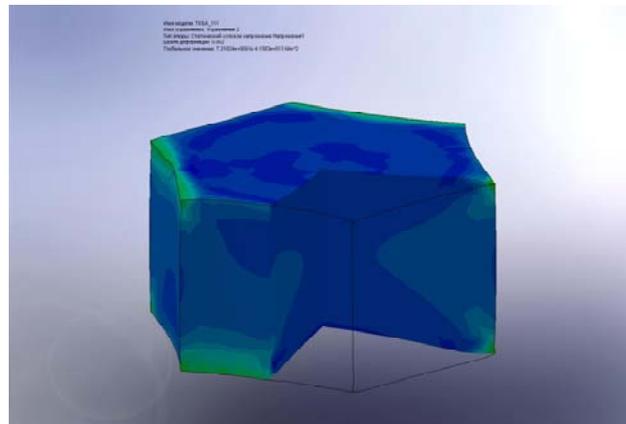
b



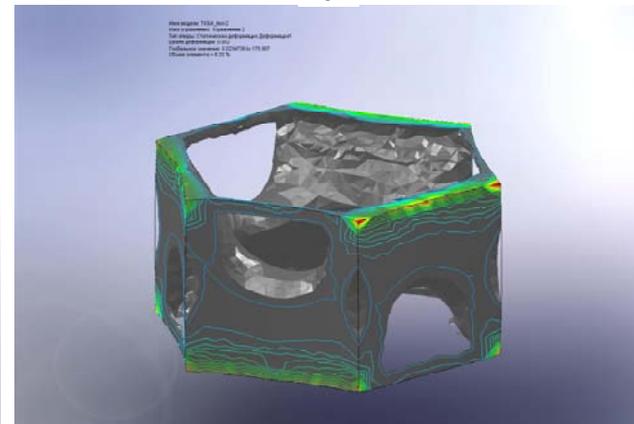
c



d



e



f

Слои деформации (*a, d*)

слои напряжения (*b, e*),

области одинаковой

деформации (*c, f*)

Формование шестигранной бронеплитки из сухого порошка карбида бора B_4C обычным одноосным статическим прессованием (*a, b, c*) и коллекторным способом (*d, e, f*)

Выполнен комплексный проект по Постановлению Правительства РФ №218
«Создание промышленного производства изделий из функциональной и
конструкционной нанокерамики для высокотехнологичных отраслей»



*Коллекторная пресс-форма для
промышленного производства
гексагональных пластин из бронекерамики*



*«Ультразвуковая» пресс-форма для
промышленного производства кольцевых
керамических изоляторов электронно-
оптических преобразователей*

Разработана теплопроводная диэлектрическая керамика AlN с теплопроводностью 180 Вт/(м*К)

Основные потребители керамики AlN - производители СВЧ устройств, мощных полупроводниковых приборов.

**Сравнение свойств образцов керамики В₄С,
изготовленных методом спарк-плазменного спекания (СПС) в ТПУ,
с мировыми аналогами**

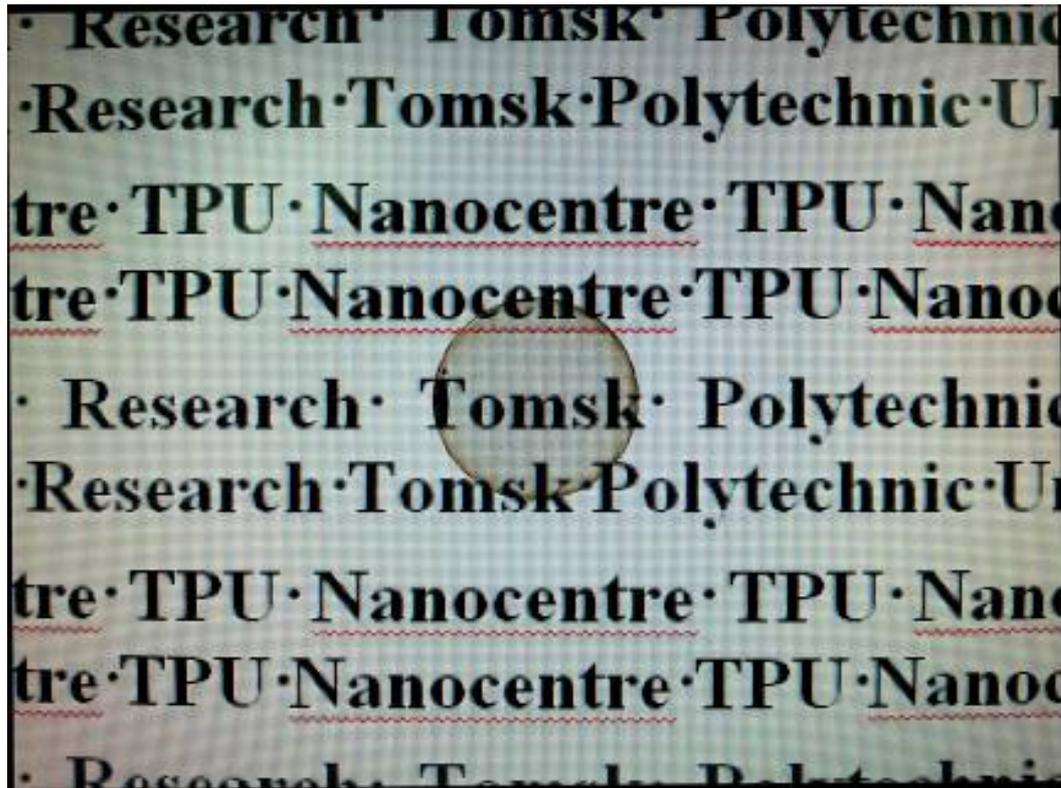
Производитель	$\rho_{\text{абс}}, \text{ г/см}^3$	$\rho_{\text{отн}}, \%$	HV, ГПа	$K_{Ic}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$
ТПУ	2,52	100	38,1	6,0
Dynamic-Ceramic/CoorsTek	2,49	98,8	25,5	–
AZOMaterials	2,52	100	< 35	2,9-3,7
3M Technical Ceramics	>2,48	>98,4	26	5

Достигнутые физико-механические свойства образцов (плотность ρ , микротвердость HV₂₀₀, ударная вязкость K_{Ic}) превышают известные мировые аналоги

С целью создания отечественного промышленного производства высококачественных порошков карбида бора (в том числе нанопорошков) и керамики В₄С, в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» выполнен проект «*Разработка технологии наноструктурированной керамики на основе карбида бора*»

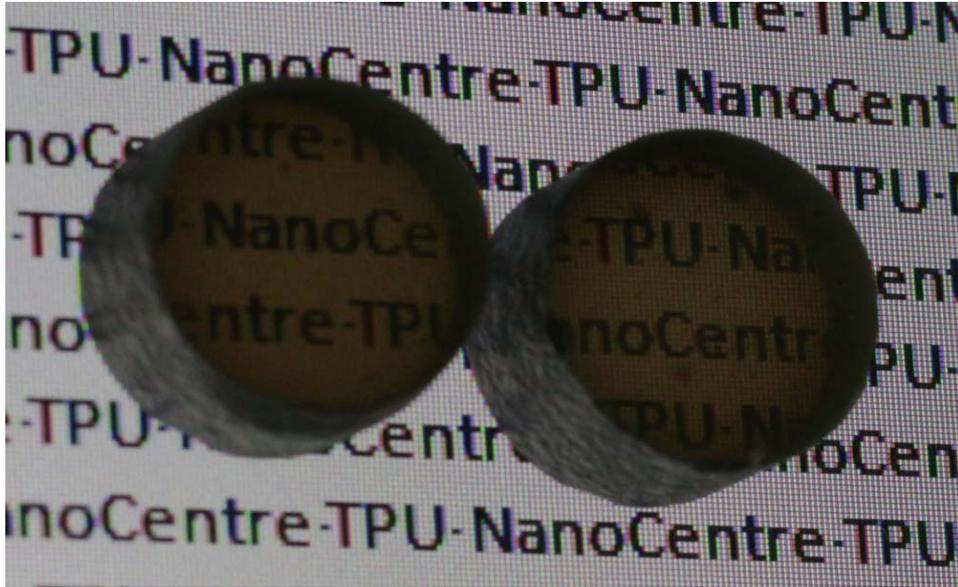
**Свойства керамики SiC, спечённой методом СПС
из микронных порошков с добавками фракций нанопорошка SiC**

содержание нанопорошка SiC, %	$T_{\text{SPS}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\rho, \%$	$H_v, \text{ GPa}$	$K_{\text{Ic}}, \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
0	2150	90,0	25,8	6,2
0	2200	97,8	27,8	5,4
1	2200	98,3	30,4	5,2
5	2200	98,7	25,2	7,1
10	2200	98,7	29,8	5,2



Оптически прозрачная керамика шпинели MgAl_2O_4 , изготовленная методом СПС
(прозрачность 73% на длине волны 555 нм)

Khasanov O.L. et al.
Physica Status Solidi C, 2013, №6, p.918–920



Толстые образцы прозрачной керамики MgAl_2O_4 :

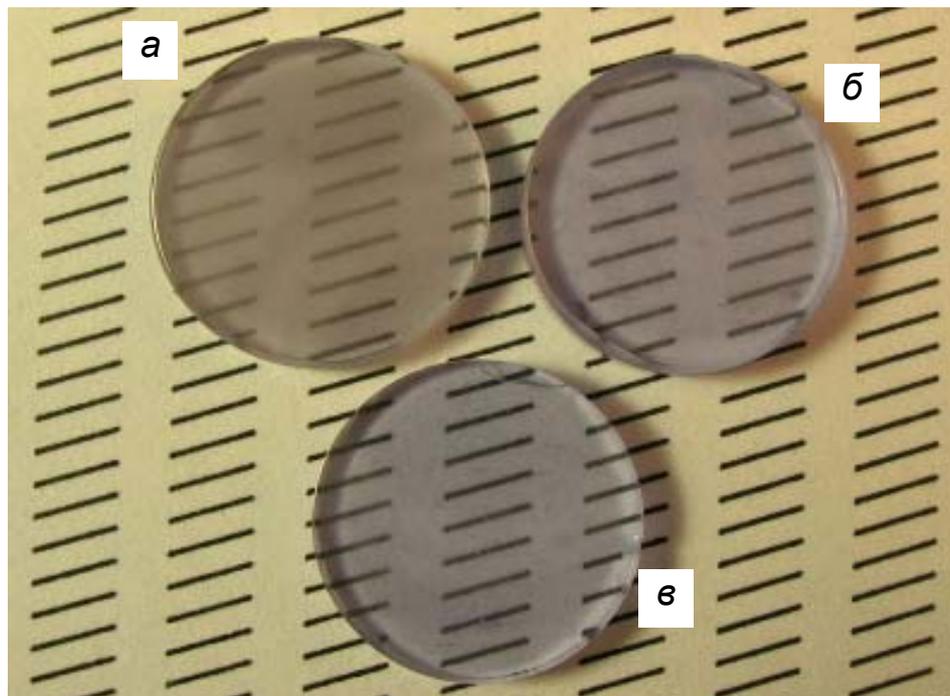
толщина $h=7,25$ мм; Ø 14,28 мм; $h/\text{Ø} = 0.51$

$T_{\text{SPS}} = 1400^\circ\text{C}$; $P_{\text{SPS}} = 60$ МПа; $t_{\text{SPS}} = 10$ мин.

Неравномерная усадка нанопорошка MgAl_2O_4 при 13-кратной упрессовке в процессе СПС ограничивает спекание длинных/толстых изделий в обычных пресс-формах СПС.

Коллекторные пресс-формы позволяют решить проблему.

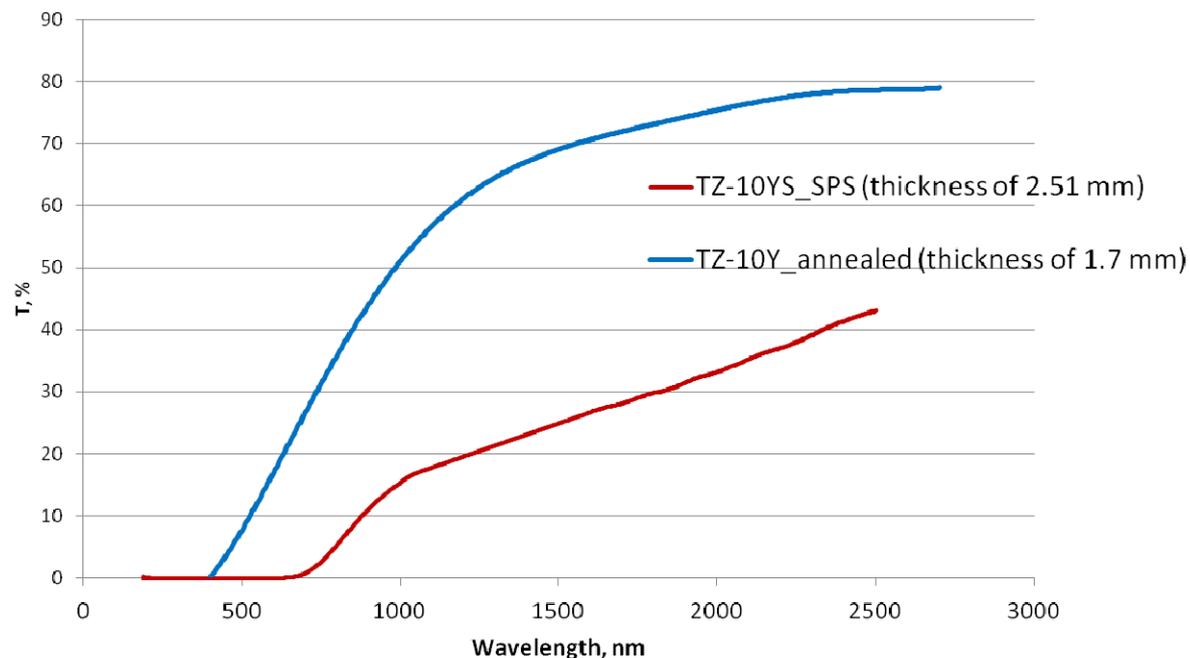
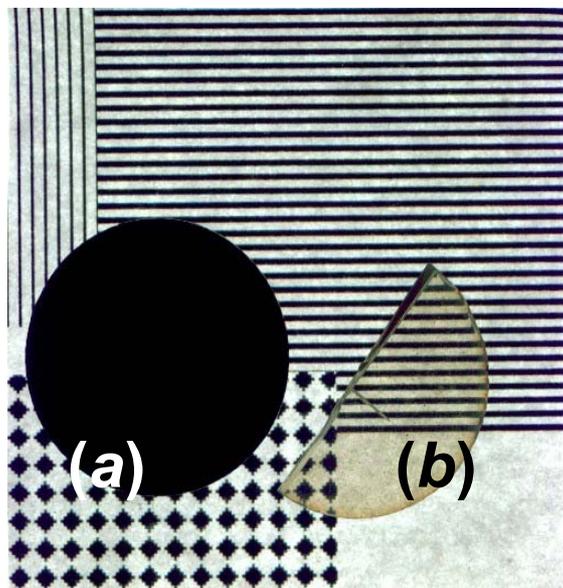
Оптически прозрачная керамика для лазерных применений



Оптически прозрачная нанокерамика $\text{Nd-Y}_2\text{O}_3$, изготовленная ТПУ и ИЭФ УрО РАН:
а – после обычного прессования НП; б, в - после **УЗ-прессования** НП
Концентрация пор $0,94 \cdot 10^{-2}\%$ (94 ppm). Плотность керамики 99,99906%
Прозрачность в видимом диапазоне 50%

*Осипов В.В., Хасанов О.Л. И др.
«Российские нанотехнологии», 2008, т.3,
№7-8, с.98-104.*

Разработка оптически прозрачной керамики из оксида циркония YSZ



Оптически прозрачная керамика $ZrO_2-10\%Y_2O_3$ (из нанопорошка TZ-10YS, TOSOHI),
изготовленная методом СПС (1300°C / 72 МПа):

(a) - до отжига, прозрачная в ИК-диапазоне спектра (43%);

(b) - после отжига, прозрачная в видимом диапазоне спектра (50%) и в ИК-диапазоне (78%).

$$E = 170 \text{ ГПа}; HV_2 = 14 \text{ ГПа}; K_{Ic} = 2,23 \text{ МПа/м}^{1/2}; C_{it} = 1,5$$

Потребности в оптически прозрачных керамических материалах

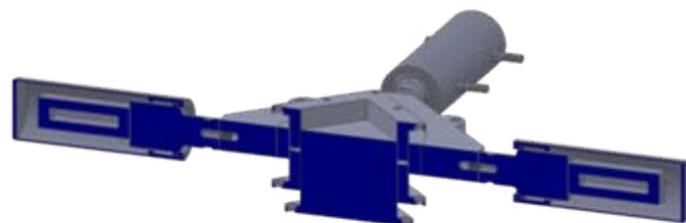
<i>Назначение</i>
Защитные окна, иллюминаторы (прозрачная броня; авиакосмическая техника; опасные производства)
Мощные твердотельные лазеры
Детекторы ПЭТ-сканеров (медицинская томография)
Детекторы для систем досмотра и в промышленной томографии
Детекторы для рентгенографии и физики высоких энергий
Детекторы для гамма-нейтронного каротажа (поиск и оценка запасов углеводородов)

Легкие радиационно-защитные корпуса для бортовой электроники космических аппаратов; для радиационно-опасных производств

Оптимизированы составы и режимы СПС легких радиационно-защитных корпусов из металло-керамического композита (Al/Mg + B₄C+ нанопорошок W)

Сконструирована УЗ-пресс-форма

для формования из порошка композитного состава защитных рамок заданной геометрии

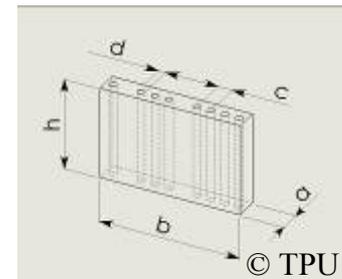
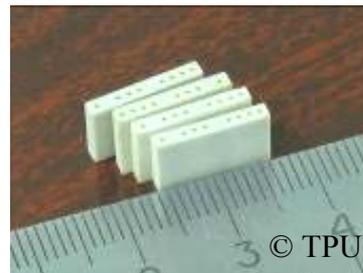


Упруглопластические свойства композита, спечённого методом СПС в различных режимах

T _{SPS} , °C	t _{SPS} , мин.	ρ, %	Модуль упругости E, Н/мм ²	Ползучесть C _{it} , %	Микротвердость HV
440	5	92.9	78680	1.67	279.5
490	5	97	78960	1.12	287.5
440	10	90.1	56295	1.53	148.3
490	10	100	98620	1.45	419.9

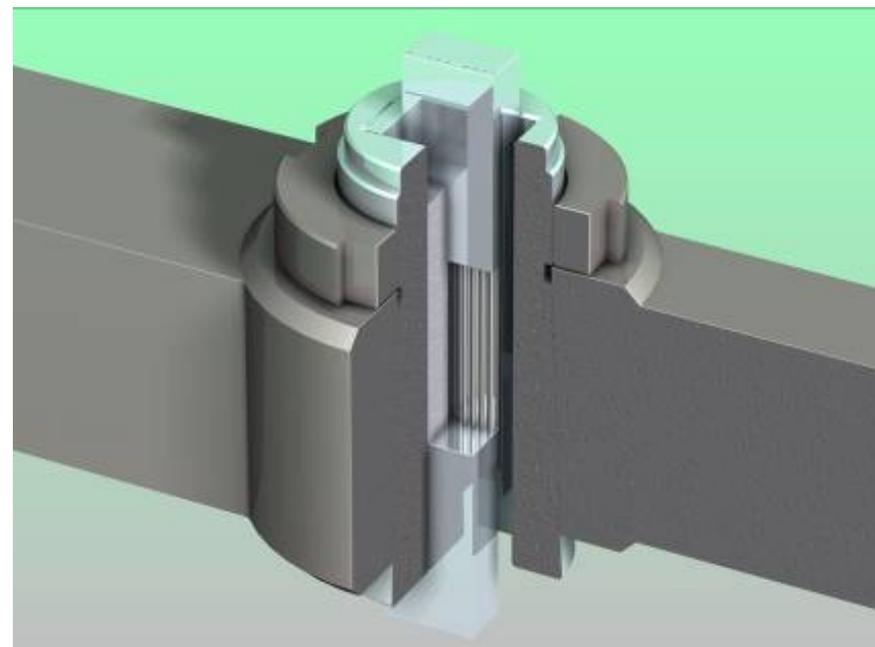
Разработаны технологии пьезокерамики PbTiO_3 — PbZrO_3 ,
сегнетокерамики $(\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.3}\text{Ca}_{0.1})\text{TiO}_3$,
электрокерамики $(\text{BaTi}_4\text{O}_9+\text{BaWO}_4)$

*Керамические корпуса СВЧ-смесителей
для средств сотовой связи -
по заказу CJ Co. (Южная Корея)*

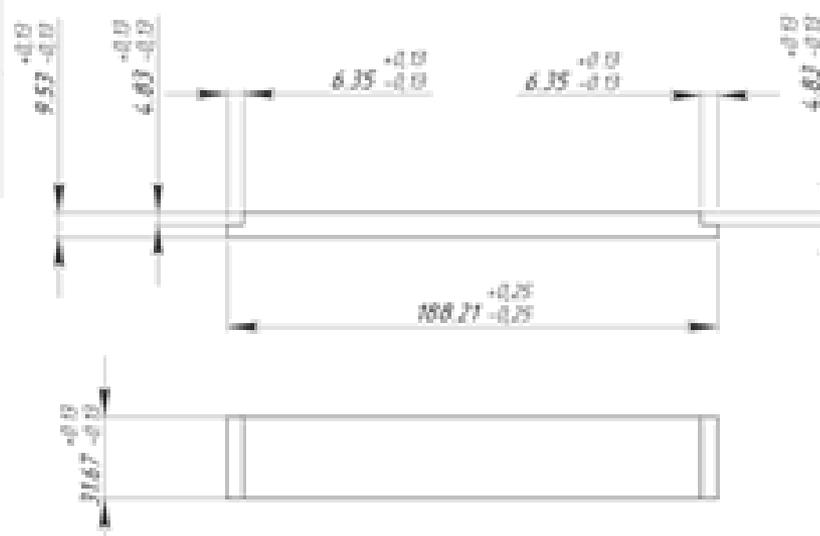
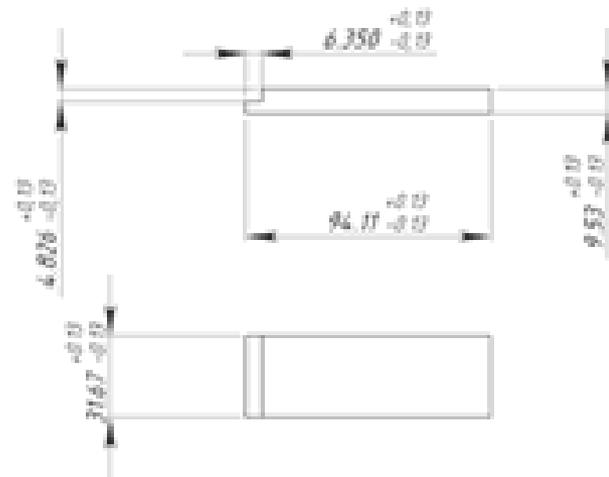


- $a \times b \times h = 1,85 \times 12,70 \times 8,35$ (мм)
- 8 отверстий диаметром 0,6 мм
- Допуски на типоразмеры и позиционирование отверстий ± 5 мкм

*Формование из сухого порошка $(\text{BaTi}_4\text{O}_9+\text{BaWO}_4)$
комбинированным способом:
коллекторным + ультразвуковым*



Мишени для магнетронного распыления из сухого порошка ZrB_2 , сформованные коллекторным способом

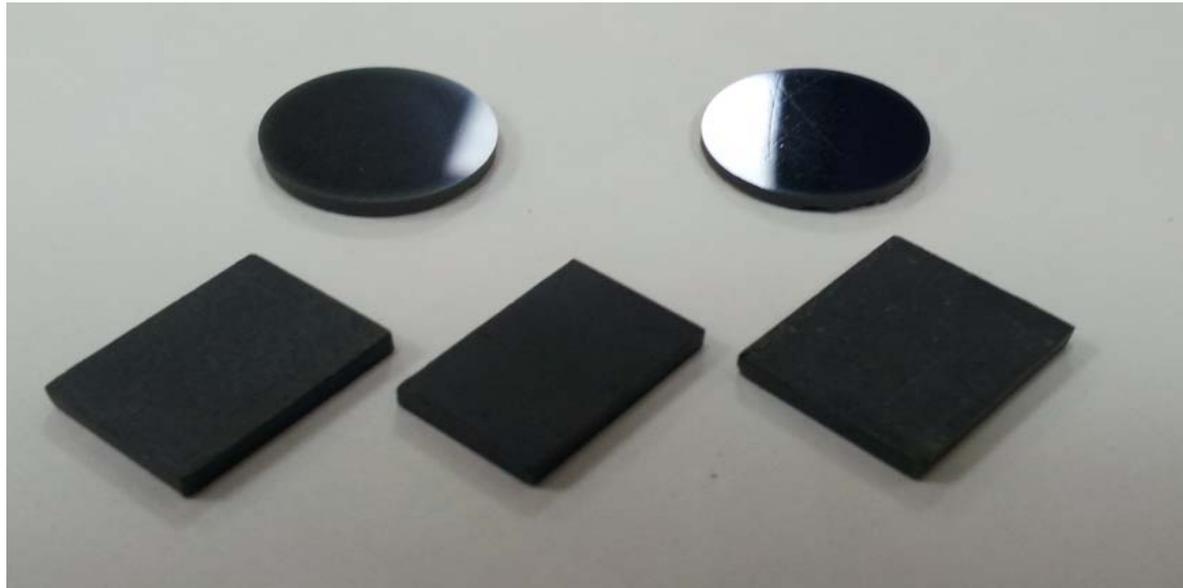


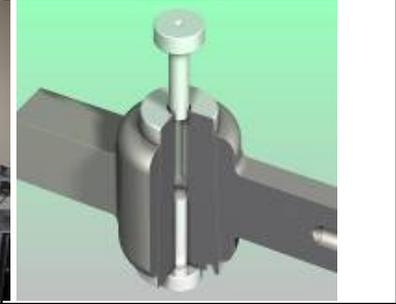
Разработка легкой магнитной керамики SmFeN



Сконструирована и создана установка для прессования магнитных порошков с формированием текстуры (заданной ориентации частиц) под одновременным действием магнитного поля и УЗ-колебаний

Разработка полупроводящих керамик In-Sn-O (ITO), ZnO
для напыления прозрачных интерактивных пленок на мониторы и экраны



<p>1. Синтез, аттестация нанопорошков</p>	<p>2. Компактирование НП</p>	<p>3. Аттестация прессовок</p>	<p>4. Спекание изделий</p>	<p>5. Тестирование изделий</p>
				
<ul style="list-style-type: none"> • Установка синтеза НП Nano Spray Dryer B-90 BUCHI • TEM JEM-2100F JEOL • SEM JSM-7500F JEOL • Лазерный анализатор SALD 7101 Shimadzu • РФА-РСТА XRD-7000S Shimadzu • БЭТ-анализатор Sorbi • Оптическая микроскопия (ММН-2) <p>o SIAMS NanoPack o PDF-4 (база данных) o NEXSYS (анализ SEM, TEM, OM)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Коллекторные и УЗ-пресс-формы • Пресс WK 18, • Пресс 2430B • Компьютеризованная установка (Mitutoyo ID-F125/150; ДМ 5001EY) • УЗ-генераторы УЗГ 6.3; УЗГ 3; ИЛ 10-5.0 • УЗ-преобразователи ПМС-15 <p>o SIAMS NanoPack o Solid Works</p>	<p>Оборудование</p> <ul style="list-style-type: none"> • Поромер Poremaster 33 • XRD-7000S • ММН-2; • JEM-2100F • JSM-7500F • АСМ Интегра-Аура • Плотномер Ultracycrometer 1000 <p>Программное Обеспечение</p> <p>o SIAMS NanoPack o PDF-4 (база данных) o NEXSYS (анализ SEM, TEM, AFM).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Spark Plasma Sintering 515S SPS SYNTEX • Высокотемпературный вакуумный дилатометр DIL 402 E/7/G-Py NETZSCH • Печь LAC • Печь НТК-18 Nabertherm • Печь Эмитрон • Тепловизор SDS HotFinder-DXT <p>o SIAMS NanoSinter</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Poremaster 33 • Нанотвердомер DUH 211S Shimadzu • Микротвердомер ПМТ-3М • Испытательная установка ИП-500М • XRD-7000S; • ММН-2 • JEM-2100F • JSM-7500F • ИНТЕГРА Аура • Ultracycrometer 1000 <p>o SIAMS o PDF-4 (база данных) o NEXSYS (анализ SEM, TEM, AFM)</p>

Лабораторная технологическая линия Нано-Цentra ТПУ

Синтез, аттестация нанопорошков

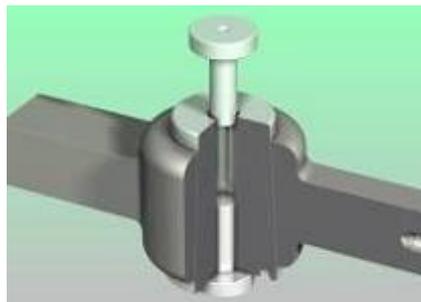


БЭТ-анализатор
Sorbi



Установка синтеза НП
распылением-сушкой
Nano Spray Dryer B-90 Buchi

Компактирование нанопорошков



Коллекторные и УЗ-пресс-формы
Прессы WK 18, Д2430Б



УЗ-генератор ИЛ 100-6/10

Аттестация прессовок



Зондовая нанолaborатория
Ntegra-Aura (HT-МДТ)

Спекание нанокерамик методом СПС



Установка СПС
SPS 515S (Sumitomo)

Спекание в вакууме



Вакуумная печь НТК-18 (Nabertherm)

Лабораторная технологическая линия Нано-Центра ТПУ

Аттестация наноматериалов (нанопорошков, компактов, керамик, пленок и т.п.)



ПЭМ JEM 2100F JEOL
с системой пробоподготовки Ion Slicer



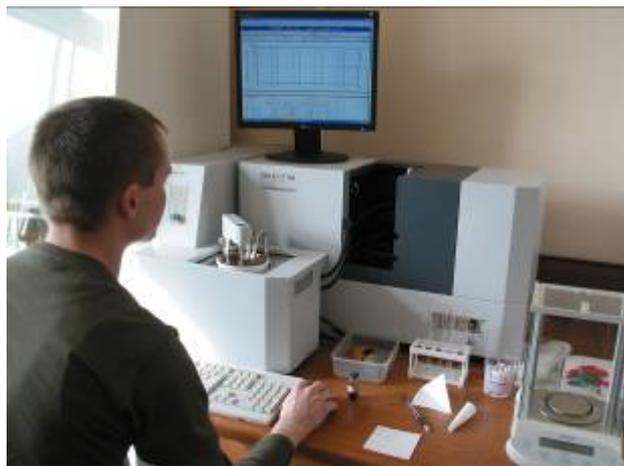
СЭМ JSM 7500F JEOL с
микроанализатором EDS



Дифрактометр XRD-7000S Shimadzu с
высокотемпературной приставкой 20...2200°C



Нанотвердомер DUH-211S Shimadzu



Лазерный анализатор
SALD-7101 Shimadzu



Высокотемпературный вакуумный
дилатометр DIL 402 E/7 NETZSCH
(2200°C)

Лабораторная технологическая линия Нано-Центра ТПУ

Испытания и тестирование изделий



Испытательно-технологический комплекс для исследования свойств и производства изделий из порошковых материалов:
пресс ИП-500М-авто с эталонным цифровым динамометром и устройством для испытания изгибной прочности материалов



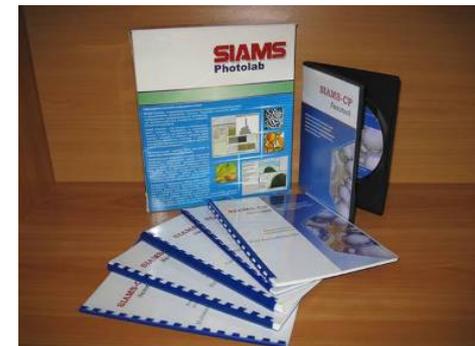
Нанопоромер
Poremaster 33 (Quantachrome, США),
диапазон от 7 нм до 950 мкм



Пикнометр
Ultrasonometer
1000 (Quantachrome, США)

В рамках формирования ННС установлены серверное оборудование, система интерактивного доступа к пакету программ моделирования и анализа наноструктур SIAMS («SIAMS NanoPack»; «SIAMS-NanoSinter»)

Для моделирования и конструирования применяются пакеты программ:
QForm 3D
Solid Works
NEXSYS (image analysis)
PDF-4 (crystallographic database
и др.





❖ Nissan Motor Co. (Japan)

- Agreement on Partnership



❖ University of Joseph Fourier - Université Grenoble Alpes (France)

- Agreement on Partnership
- UJF-TPU Double Degree Ph.D. Program
- UJF-TPU Double Degree Master Program “Master in Nanosciences, Nanotechnologies”



❖ Fraunhofer IKTS Dresden/Hermsdorf (Germany)

- NEPL-2011 – Jena- Hermsdorf, Fraunhofer IKTS
- Professional retraining Program



❖ Institute of Science and Technology of Ceramics (Italy)

- Agreement on Partnership 2007-2012;
- Agreement on Partnership 2012-2017



❖ San Diego State University (USA)

- Laboratory of Powder Technologies



❖ Chongqing University of Arts and Sciences (China)



ICC6

6th International Congress on Ceramics
From Lab to Fab

August 21–25, 2016 | Dresden, Germany | International Congress Center

PROGRAM

www.icc-6.com

Hosted by



Deutsche Keramische
Gesellschaft e. V.



International Ceramic Federation

O) Transparent and luminescent materials

Symposium organizing committee

- Dr. Isabel Kinski (Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS, Germany)
- Dr. Romain Gaume (Townes Laser Institute, USA)
- Dr. Adrian Goldstein (Israel Ceramic and Silicate Institute, Israel)
- Prof. Oleg Khasanov (Tomsk Polytechnic University, Russia)
- Dr. Yvonne Menke (Schott AG, Germany)
- Dr. Koji Morita (National Institute of Materials Science NIMS, Japan)
- Dr. Madis Raukas (Osram Sylvania, USA)
- Dr. Yiquan Wu (Alfred University, USA)



Scientific Topics

Topic 1.

Innovative processing and synthesis

Topic 2.

High temperature processes and advanced sintering

Topic 3.

Ceramics and glasses for healthcare

Topic 4.

Ceramics for energy production and storage

Topic 5.

Advanced structural ceramics

Topic 6.

Ceramics for electro-magnetic and optical applications

Topic 7.

Innovative construction materials & cultural heritage

TOPIC 1. Innovative processing and synthesis



Chair

Jon Binner,
The University of
Birmingham,
United Kingdom



Begonia Ferrari

Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. Spain



Paolo Colombo

Università di Padova.
Italy



Lennart Bergström

Stockholm University.
Sweden



Carolina Tallon

The University of Melbourne.
Australia



Oleg Khasanov

National Research Tomsk
Polytechnic University, Russia



Mariarosa Raimondo

Istituto di Scienza e Tecnologia dei
Materiali Ceramici (ISTEC-CNR),
Italy

Выводы

1. Методы формования сухих порошков под **УЗ-воздействием** и **коллекторным способом** позволяют экономично изготавливать керамические изделия заданной формы, обеспечивают заданные типоразмеры, требуемые свойства.

2. Применение **коллекторного способа** в технологии **спарк-плазменного спекания** позволяет изготавливать наноструктурные керамические изделия различных форм с повышенными эксплуатационными свойствами.

3. Разработанные технологии изготовления бронеплиток, керамических изоляторов с применением методов **УЗ-** и **коллекторного** компактирования внедрены в промышленное производство.

Благодарю за внимание

khasanov@tpu.ru