

XV научно-промышленный форум  
«Техническое перевооружение машиностроительных предприятий России»  
Секция «Наука-производству. Композитные и полимерные материалы»

«Конструирование и испытания металлических и  
гибридных композиционных материалов и  
покрытий в ИМАШ УрО РАН»

Каманцев Иван Сергеевич

18 Октября 2022 г.  
Екатеринбург

*Из истории института*



Академик  
Н. А.  
Ватолин



Академик  
С.В.  
Вонсовский



Академик  
Н.Н.  
Красовский



Чл.-корр. АН  
СССР  
Г.Л. Химич



Академик  
Н.А. Семихатов



Академик  
К.В. Фролов



Д.т.н.,  
профессор  
В.М. Макаров



Член-  
корреспондент  
В.Л. Колмогоров



Академик  
Э.С. Горкунов

## **Лаборатория микромеханики материалов**

*С.В. Смирнов  
Н.Б. Пугачева  
Д.И. Вичужанин  
Т.М. Быкова  
Н.С. Мичуров  
М.В. Мясникова  
Ю.В. Халевицкий  
Е.О. Смирнова  
А.В. Нестеренко  
Д.А. Коновалов*

## **Лаборатория технической диагностики**

*С.М. Задворкин  
А.П. Владимиров  
Е.А. Путилова  
Ю.В. Худорожкова  
А.Н. Мушников*

## **Лаборатория деформирования и разрушения**

*С.В. Гладковский  
С.В. Кутенева  
В.Е. Веселова*

## **Лаборатория системного моделирования**

*В.П. Швейкин  
А.Г. Залазинский  
В.Г. Титов  
Д.А. Двойников  
Д.И. Крючков*

## **Лаборатория механики деформаций**

*А.В. Коновалов  
А.С. Смирнов  
В.С. Канакин  
И.А. Спирина*

## **Сектор новых материалов и технологий**

*И.С. Каманцев  
Д.Р. Салихьянов  
А.В. Кузнецов  
И.Г. Маргамов  
Е.И. Сенаева  
Н.А. Друкаренко*

*Исследования выполнены при взаимодействии со специалистами*

*Института органического синтеза имени академика И.Я. Постовского (ИОС УрО РАН)*

*Института высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ УрО РАН)*

*Института машиноведения им. А. А. Благонравова (ИМАШ РАН)*

*Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е.Жуковского (ЦАГИ)*

*Всесоюзного института авиационных материалов (ВИАМ)*

*Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н.Ельцина (УрФУ)*

*Уральского государственного медицинского университета (УГМУ Минздрава России)*

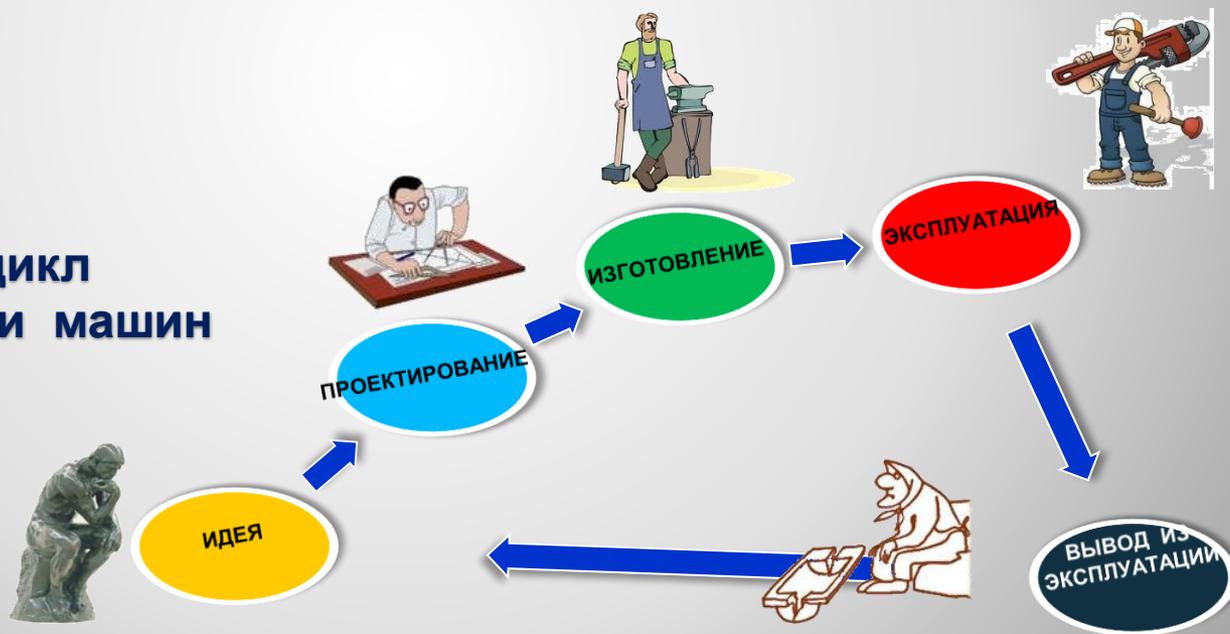
*Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.*

*Прикладные работы реализованы на предприятиях Свердловской, Челябинской и Курганской областей в рамках деятельности Уральского межрегионального научно-образовательного центра «Передовые производственные технологии и материалы»*

## Область компетенции Института

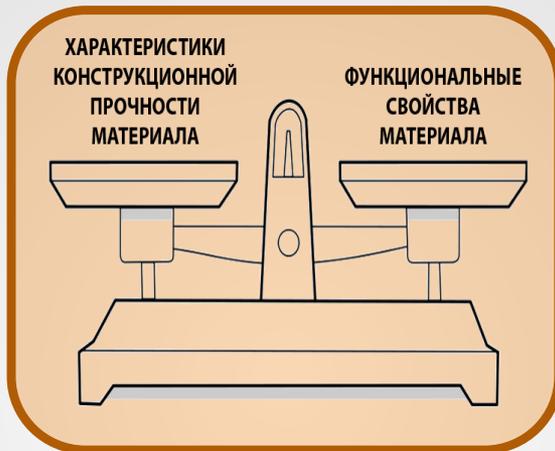
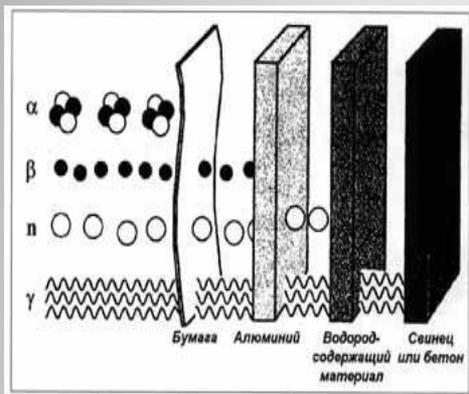
Проведение междисциплинарных исследований по разработке научных основ диагностики и ресурса материалов и конструкций, прогнозирования и управления их состоянием в течение всего жизненного цикла изделий от изготовления до решения о выводе из эксплуатации, создание на этой основе новых эффективных технологий обработки конструкционных материалов, машин и элементов конструкций, систем их управлением.

### Жизненный цикл конструкций и машин



# КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## Проникающая способность излучений



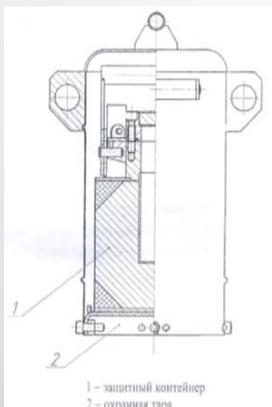
## Конструкционные материалы



## Специальные материалы



## Обеспечение радиационной безопасности



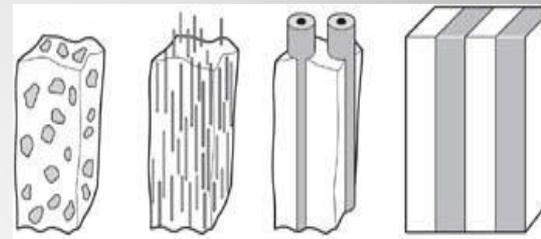
### Предъявляемые требования:

- высокий уровень механических свойств;
- высокая теплопроводность;
- высокая радиационная защита



Основное внимание исследователей сосредоточено на способах получения композиционных материалов и изучении их свойств. Исследованиям поведения при технологической пластической деформации уделяется существенно меньше внимания. Это в свою очередь препятствует развитию производства конструктивных изделий из КМ и расширению сферы их применения.

### Типы металломатричных композитов



#### **Задачи проводимых исследований:**

- ✓ Разработка общего подхода к проектированию КМ конструктивного назначения и технологий их обработки с достижением заданного уровня физико-механических свойств.
- ✓ Улучшение деформируемости и снижения риска разрушения.
- ✓ Создание новых функциональных и конструктивных материалов и технологий их изготовления.

## Оборудование для механических и трибологических испытаний

- Испытания на растяжение, сжатие, изгиб, трещиностойкость при статическом и циклическом нагружении (усталостные испытания):
  - диапазон нагрузок при растяжении, сжатии, изгибе от 0,0008 до 100 кН;
  - интервал температур испытаний от  $-150^{\circ}\text{C}$  до  $+1200^{\circ}\text{C}$
  - относительная погрешность измерений предельной нагрузки от  $\pm 0,5$  до  $\pm 1\%$
- Динамические испытания на трехточечный изгиб для определения характеристик ударной вязкости металлов и сплавов (KCU, KCV, KCT):
  - диапазон измерения поглощенной энергии от 0,10 до 542,0 Дж;
  - диапазон регулирования скорости движения маятника в момент удара от 0,13 до 5,47 м/с
- Измерение микротвердости, определение модуля упругости:
  - диапазон нагрузок от 0,0098 до 19,61 Н;
  - экранное увеличение до 1000
- Квазистатическое наноиндентирование, проведение скретч-теста, получение снимков топографии поверхности в режиме атомно-силового микроскопа.
- Проведение испытаний жидких и пластичных смазочных материалов для определения основных трибологических характеристик, Определение трибологических характеристик при испытаниях по закрепленному абразиву (корунд, карбид кремния) и на трение скольжения по схеме “палец – пластина”



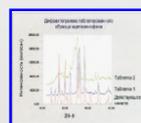
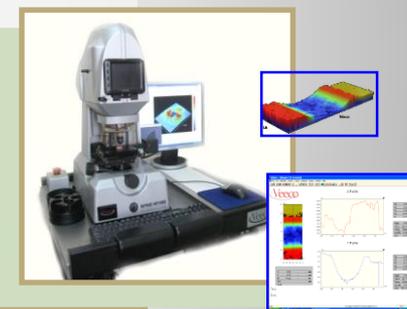
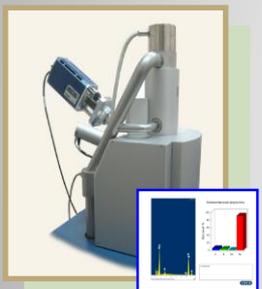
## Оборудование для определения состава, микроструктуры, шероховатости и состояния поверхности материала



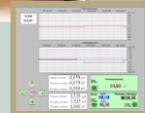
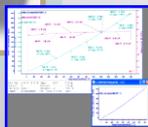
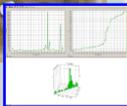
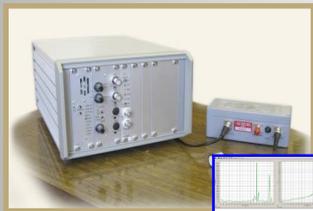
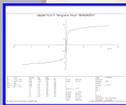
- **Исследование структуры и состояния поверхности с высоким разрешением**
  - разрешающая способность 3 нм при 30 кВ;
  - оптическое увеличение от 10 до 1 000 000 (режим Resolution), от 4 (режим Fish Eye).
- **Рентгеновские микроанализаторы "INCA" позволяют получать информацию о фазовом, качественном и точном количественном химическом составе образца на микроуровне. Программное обеспечение интегрировано на базе единой программной платформы ИНКА**
- **Проведение химического анализа металлов и сплавов на основе железа, меди, алюминия, магния, никеля на макрообразцах**
  - диапазон измеряемых концентраций элементов (примесей) в металлах и сплавах от  $1 \times 10^{-4}$  до 99,99 %;
  - оптический диапазон длин волн от 140 до 670 нм; число спектральных каналов до 128
- **Определение топографии поверхности широкого спектра материалов оптическим методом**
  - принцип действия интерферометрия; скорость измерения до 100 мк/с;
  - увеличение от  $\times 1,25$  до  $\times 100$ ;
  - диапазон измерения по вертикали от 160 нм до 2 мм;
  - разрешение по вертикали менее 0,1 нм
- **Проведение фазового анализа, определение остаточных напряжений, определение степени кристалличности аморфных материалов, прецизионные измерения параметров кристаллической решетки**
  - тип гониометра вертикальный, геометрия съёмки " $\theta - \theta$ "; радиус гониометра от 200 до 275 мм; диапазон изменения угла  $\theta$ : от  $-6^\circ$  до  $+82^\circ$ ;
  - минимальный шаг сканирования  $0,0001^\circ$ ; погрешности измерения углов  $2\theta$ :  $\pm 0,04^\circ$



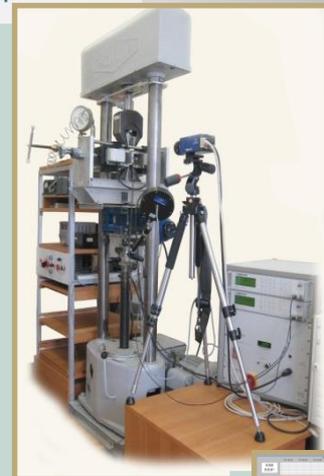
Element	Concentration (%)
Fe	99.99
C	0.01
Mn	0.001
P	0.0001
S	0.0001
Si	0.0001
Al	0.0001
Ni	0.0001
Mg	0.0001
Cu	0.0001
Zn	0.0001
Cr	0.0001
N	0.0001
O	0.0001
H	0.0001
Ar	0.0001
Ne	0.0001
He	0.0001
Li	0.0001
Be	0.0001
B	0.0001
C	0.0001
N	0.0001
O	0.0001
F	0.0001
Ne	0.0001
Na	0.0001
Mg	0.0001
Al	0.0001
Si	0.0001
P	0.0001
S	0.0001
Cl	0.0001
Ar	0.0001
K	0.0001
Ca	0.0001
Sc	0.0001
Ti	0.0001
V	0.0001
Cr	0.0001
Mn	0.0001
Fe	0.0001
Ni	0.0001
Cu	0.0001
Zn	0.0001
Ga	0.0001
Ge	0.0001
As	0.0001
Se	0.0001
Br	0.0001
Kr	0.0001
Rb	0.0001
Sr	0.0001
Zr	0.0001
Nb	0.0001
Mo	0.0001
Tc	0.0001
Ru	0.0001
Rh	0.0001
Pd	0.0001
Ag	0.0001
Cd	0.0001
In	0.0001
Sn	0.0001
Pb	0.0001
Bi	0.0001
Po	0.0001
At	0.0001
Rn	0.0001
Fr	0.0001
Ra	0.0001
Ac	0.0001
Th	0.0001
Pa	0.0001
U	0.0001
Np	0.0001
Pu	0.0001
Am	0.0001
Cm	0.0001
Bk	0.0001
Cf	0.0001
Es	0.0001
Fm	0.0001
Mendelevium	0.0001
Nobelium	0.0001
Lanthanum	0.0001
Cerium	0.0001
Praseodymium	0.0001
Neodymium	0.0001
Europium	0.0001
Gadolinium	0.0001
Terbium	0.0001
Erbium	0.0001
Ytterbium	0.0001
Lutetium	0.0001
Hafnium	0.0001
Tantalum	0.0001
Tungsten	0.0001
Rhenium	0.0001
Osmium	0.0001
Iridium	0.0001
Platinum	0.0001
Gold	0.0001
Silver	0.0001
Cadmium	0.0001
Mercury	0.0001
Thallium	0.0001
Lead	0.0001
Bismuth	0.0001
Polonium	0.0001
Astatine	0.0001
Radon	0.0001
Francium	0.0001
Radium	0.0001
Actinium	0.0001



## Оборудование для определения физических характеристик и поврежденности материалов неразрушающими методами



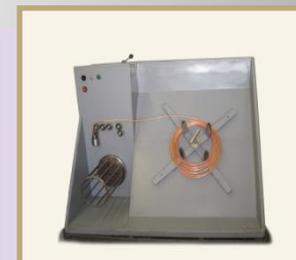
- ✓ Определение влияния нагружения (растяжения, сжатия, кручения, внутреннего давления или комбинированного нагружения) на магнитные характеристики конструкционных материалов:
  - макс. усилие растяжения (сжатия) 50 кН;
  - макс. крутящий момент 100 Н·м;
  - макс. давление во внутренней полости образца 60 МПа
- ✓ Измерение магнитных характеристик материалов (магнитная проницаемость, индукция насыщения, коэрцитивная сила)
- ✓ Регистрация и анализ акустических волн, возникающих в процессе деформации и разрушения (роста трещин) контролируемых объектов
- ✓ Вихретоковый контроль изделий из металлических материалов
- ✓ Точное и быстрое измерение коэрцитивной силы H<sub>cJ</sub> в автоматическом режиме ферромагнитных материалов и компонентов :
  - диапазон измерения коэрцитивной силы 0 - 100 кА/м;
  - напряженность намагничивающего поля до 450 кА/м;
  - погрешность измерений: 1 % от значения измерения
- ✓ Измерение линейных размеров образцов из различных материалов под действием температуры (до 1400 °С) в вакууме или контролируемой атмосфере
- ✓ Контроль качества поверхности и поиска дефектов, определения остаточных напряжений и изменения микроструктуры ферромагнитных материалов



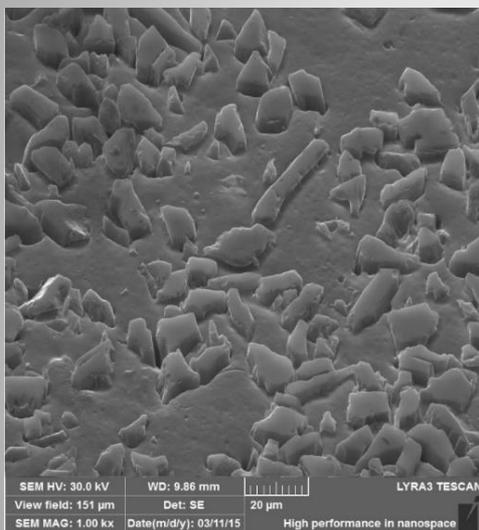
## Технологическое оборудование и оборудование для пробоподготовки



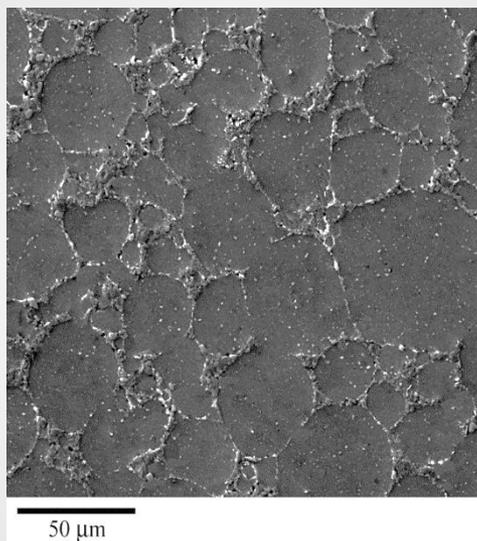
- Горячая и холодная прокатка металлических полос толщиной 2–20 мм
- Электроэрозионная обработка деталей сложного контура с прямолинейной образующей, обрабатываются любые токопроводящие материалы, в том числе и термообработанные стали, металлокерамические сплавы
- Волочение тончайшей и тонкой проволоки
- Улучшение качества поверхностного слоя обрабатываемой детали
- Термическая обработка, в том числе в нейтральной газовой среде и в расплавах солей и щелочей
- Определение прочностных свойств металлических образцов при импульсном нагреве (термоциклировании) до температуры 1100 °С в среде водорода при давлении до 0,5 мПа
- Проведение нагрева изделий в вакууме, а также в контролируемой атмосфере инертных газов (аргон, азот) при высокой температуре:
  - макс. вакуум 5x10<sup>-5</sup> мм рт.ст.;
  - макс. температура 1800 °С;
  - рабочее пространство 150x400x150 мм;
- Электролитическое травление и полирование металлографических образцов
- Автоматическое резание всех материалов, в том числе тонкослойного сечения
- Изготовление образцов для испытаний различных конфигураций на металлорежущих станках



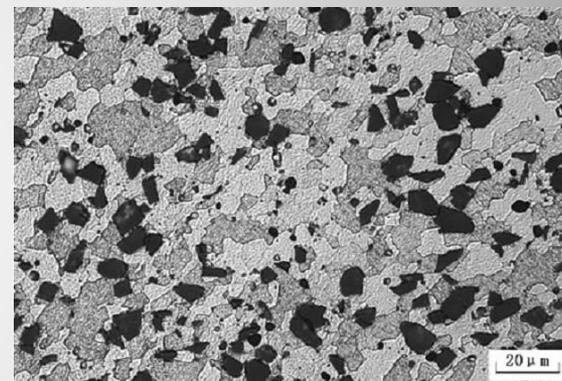
*Некоторые результаты прикладных  
исследований*



A8+40%SiC (Метод пропитки)

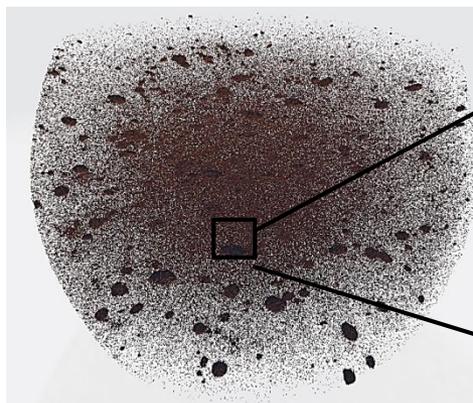


AMg6+10%SiC  
(Твердофазный метод)



B95+15%TiC  
(Жидкофазный метод)

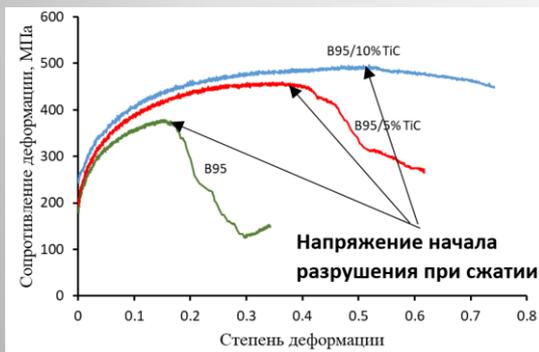
Расположение  
частиц SiC в  
объеме композита  
по результатам  
компьютерной  
томографии



## Разработана жидкофазная технология синтеза алюмоматричных композитов системы В95-TiC

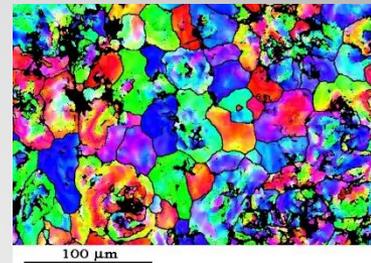
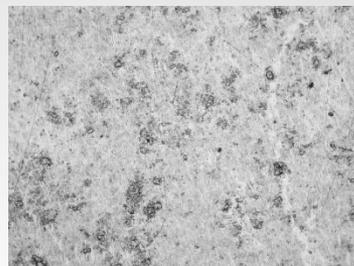


Сплав В95 после отливки.  
 $D_{\text{ср}}$  зерен > 100 мкм

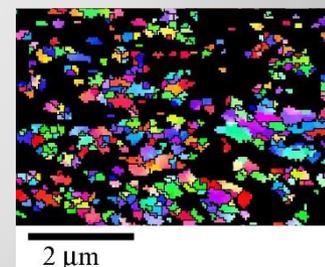
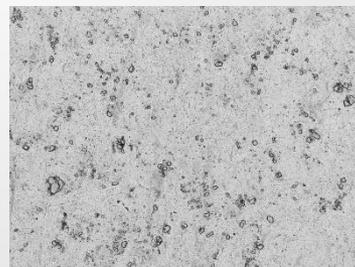


Добавки частиц TiC в расплав сплава В95:

- 1) Привели к измельчению зёрненной микроструктуры;
- 2) улучшили пластические и прочностные свойства.



ММК В95/10% TiC  
 $D_{\text{ср}}$  частиц TiC = 5 мкм  
 $D_{\text{ср}}$  зерен = 27 мкм (после отливки)

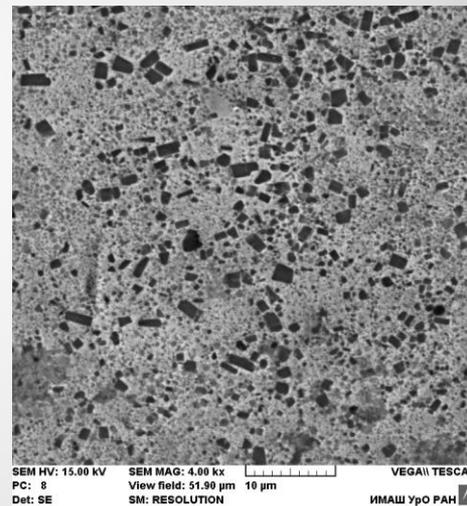


ММК В95/(10% TiC + модификатор поверхности частиц)  
 $D_{\text{ср}}$  частиц TiC = 5 мкм  
 $D_{\text{ср}}$  зерен < 1 мкм (после отливки)

Технология получения и исследование структуры и свойств монолитных СВС-композитов, главным образом исследования влияния химического состава матрицы на структуру и свойства, а также установлению фазовых превращений в композитах при последующей термической и механической обработке. Исследованы композиты систем Fe-Ni-Ti-C-B, Fe-Ni-Cr-Ti-C-B, Cu-Ti-C-B.



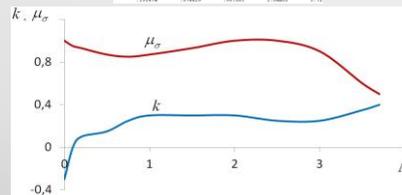
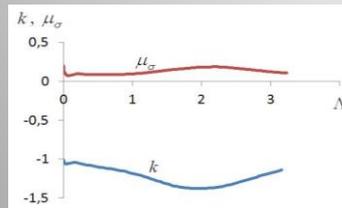
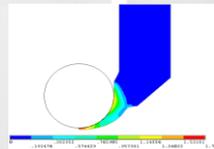
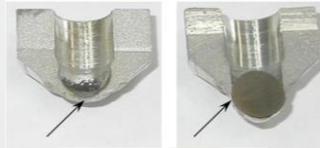
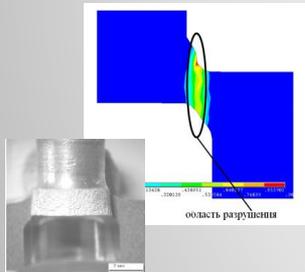
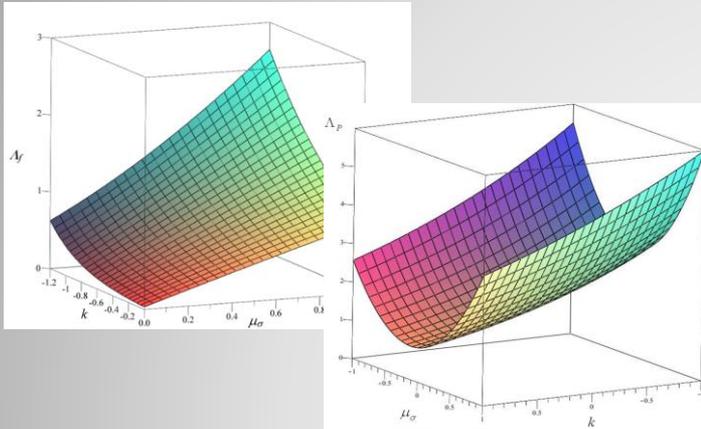
Внешний вид заготовок СВС-композитов



СЭМ изображение микроструктуры КМ Cu-Ti-C-B

# Определение пластичности композиционных материалов

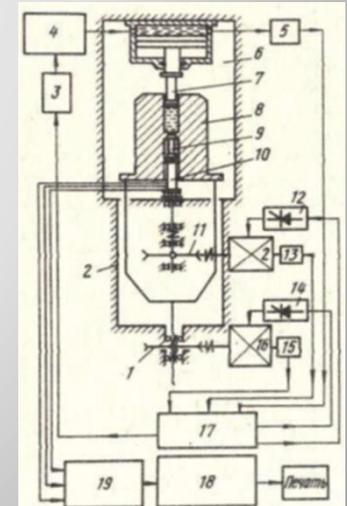
Для исследования пластичности материала используются как традиционные методы испытаний (сжатие, растяжение и кручение цилиндрических образцов, растяжение образцов с концентраторами), так и специально разработанные методы (растяжение и сжатие образцов типа «колокольчик», выдавливание мембраны с подпором).



## Пластометрический комплекс

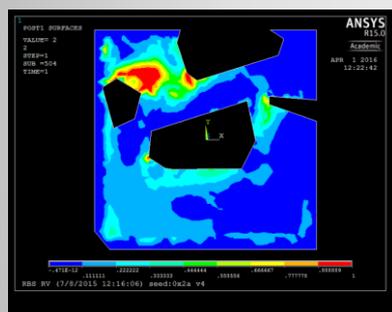


## Установка высокого давления

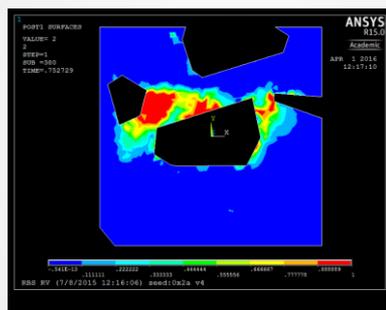




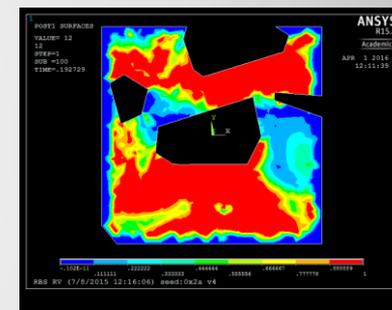
Распределение поврежденности по центральному сечению ху материала матрицы при  $\varepsilon = 8\%$



сжатие



сдвиг

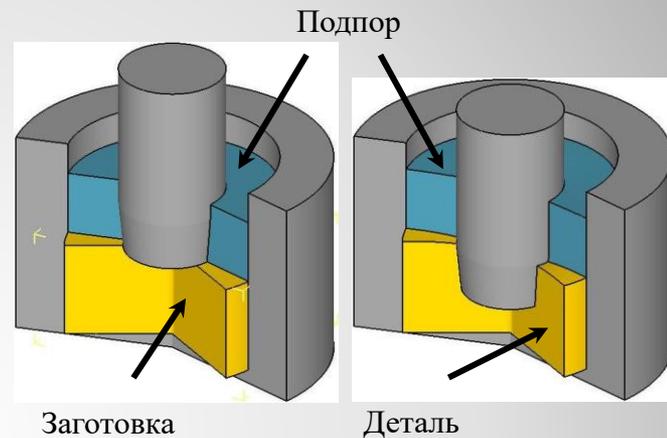
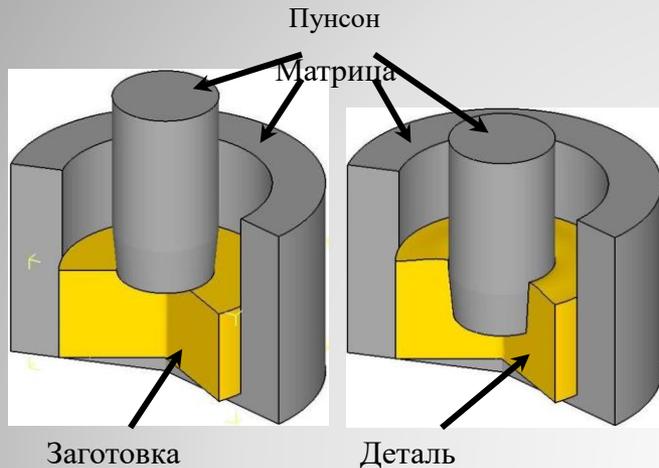


растяжение

Предложен подход для описания процессов деформации и разрушения. Позволяет решать следующие задачи:

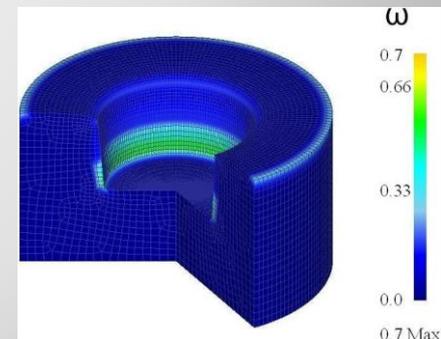
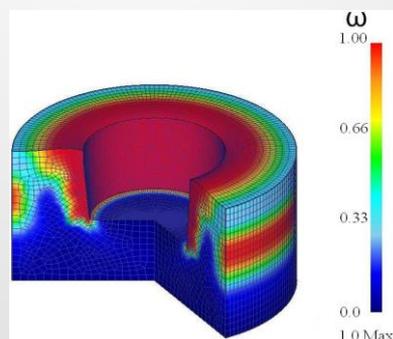
- Проектирование и оптимизация технологий пластического формоизменения для конкретного КМ ;
- Проектирование и оптимизации состава КМ , обладающего после технологической пластической деформации требуемым уровнем прочностных свойств.

## Изготовление детали «колпачок» из ММК с 50%SiC методом обратного выдавливания на одноплунжерном прессе

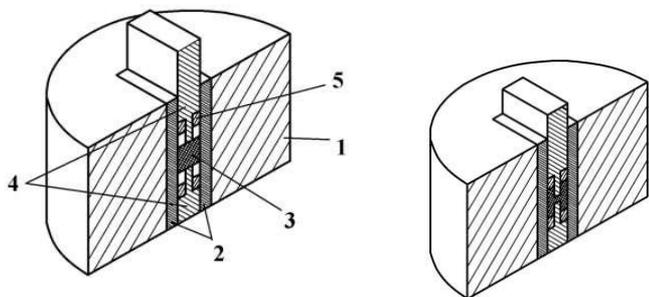


Создан программный комплекс, позволяющий создавать 3D модели элементов объемов неоднородных материалов с учётом их сложной внутренней структуры в формате, подходящем для использования с конечно-элементным комплексом ANSYS.

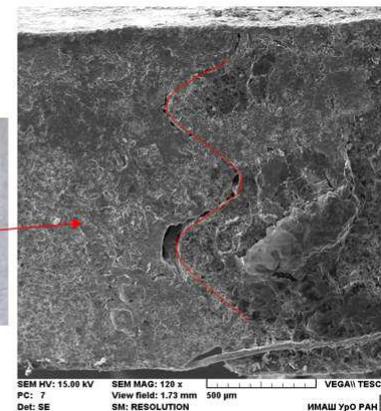
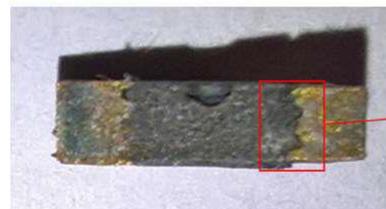
Область разрушения при изготовлении детали «колпачок» методом обратного выдавливания на одноплунжерном прессе



## Схема штамповки детали конструкционного назначения



Элемент стального крепежа со вставкой из  
ММК В95/10% SiC,  
изготовленного штамповкой в режиме  
кратковременной ползучести  
(поперечное сечение)



Лабораторный штамп для  
закрытой штамповки детали  
конструкционного назначения  
типа двутавр



Деталь конструкционного назначения  
типа двутавр, изготовленная  
Из ММК В95/10% SiC, подвергнутого  
четырем переходам ДТО



# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Материал матрицы:

- Al

Наполнитель:

-  $B_4C$

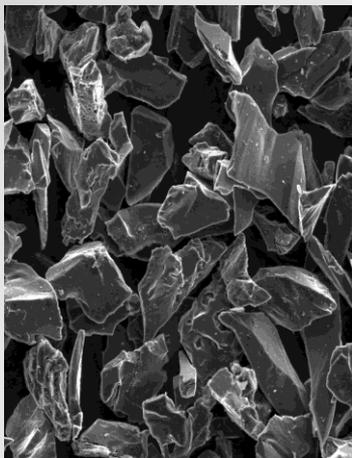
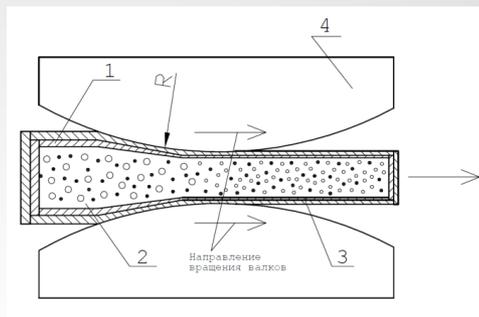
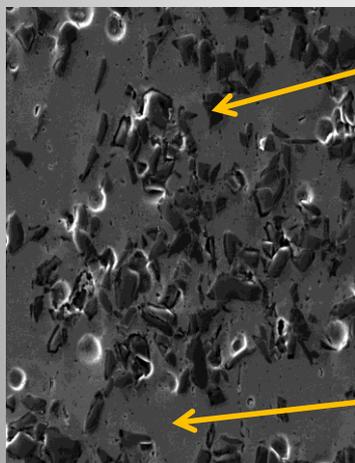


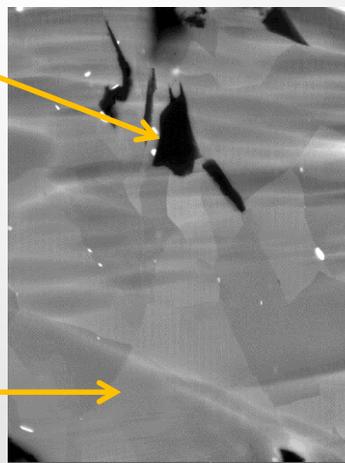
Схема получения бороалюминиевого композита АМг3-А1/ $B_4C$ -АМг3



1. Плакирующий слой АМг3
2. Смесь порошков А1/ $B_4C$
3. технологическая оболочка
4. Валки прокатного стана



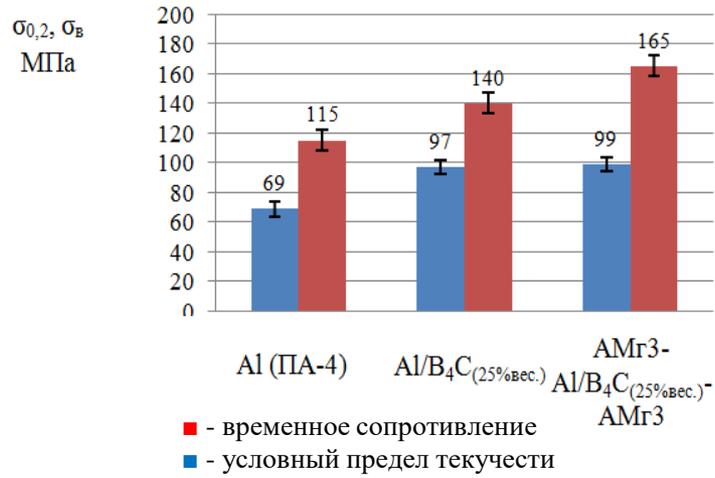
частица  $B_4C$



Al - матрица



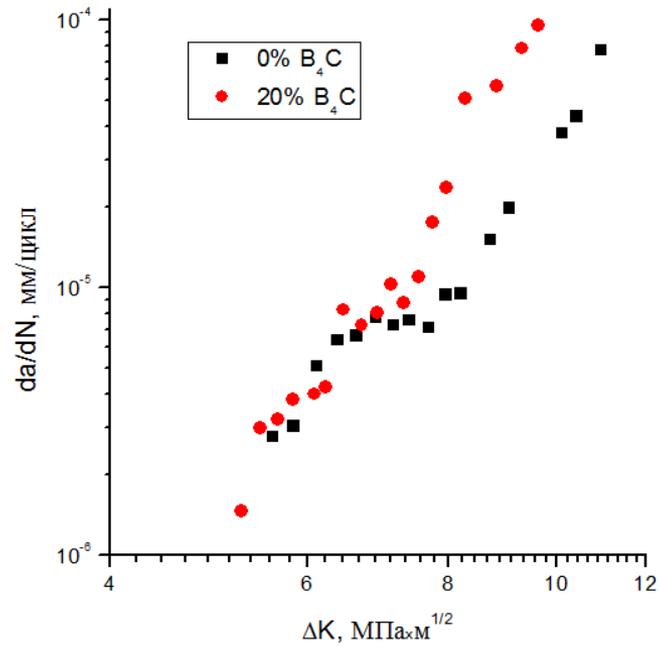
# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БОРОАЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ



Сварное соединение Al/B<sub>4</sub>C композита



Кинетическая диаграмма усталостного роста трещины в бороалюминиевом композите Al/B<sub>4</sub>C и модельном материале

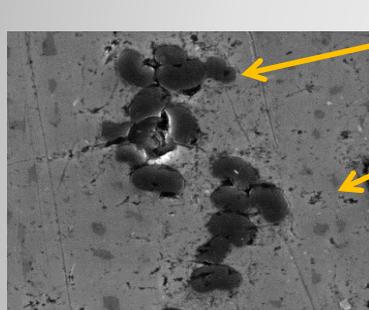
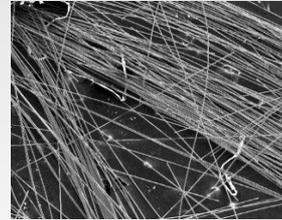


**Область применения:**  
Атомная промышленность, авиационное, криогенная техника, специальное машиностроение.

**Реализация проекта:**  
Технология получения нейтронозащитных композитов на основе Al/B<sub>4</sub>C рекомендована к внедрения на предприятиях Госкорпорации «РОСАТОМ».

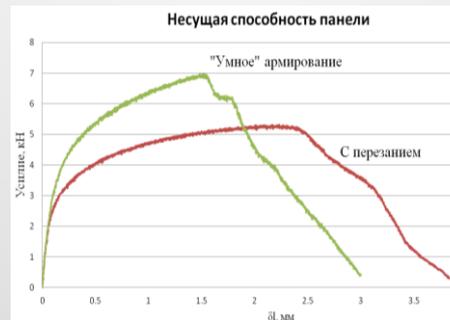
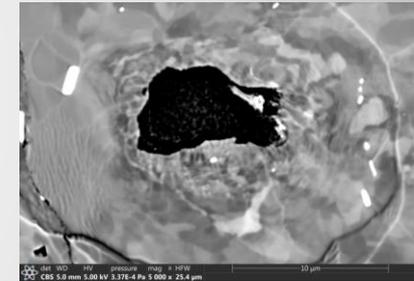
# Композит Al - углеволокно

Материал матрицы: - Al и его сплавы  
Наполнитель: - углеродное волокно;



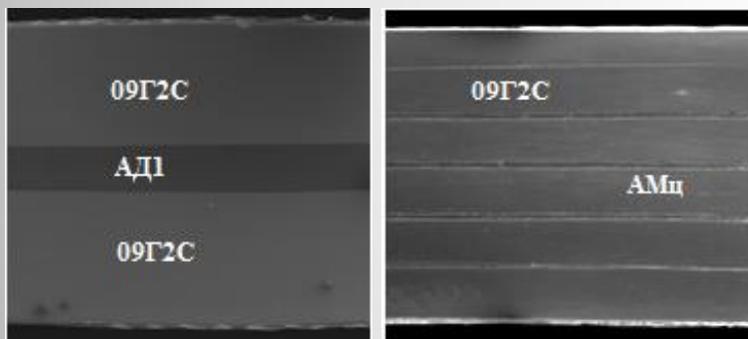
углеволокно

Al - матрица

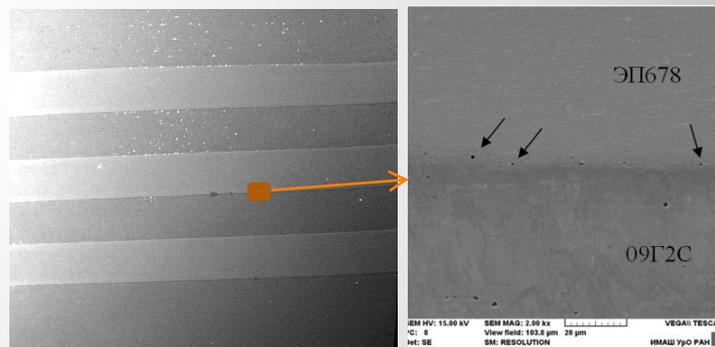


# Особенности формирования комплекса свойств слоистых металлических композиционных материалов в зависимости от их состава, конструкции и технологии получения

Слоистые сталеалюминиевые композиты, полученные методом пакетной прокатки

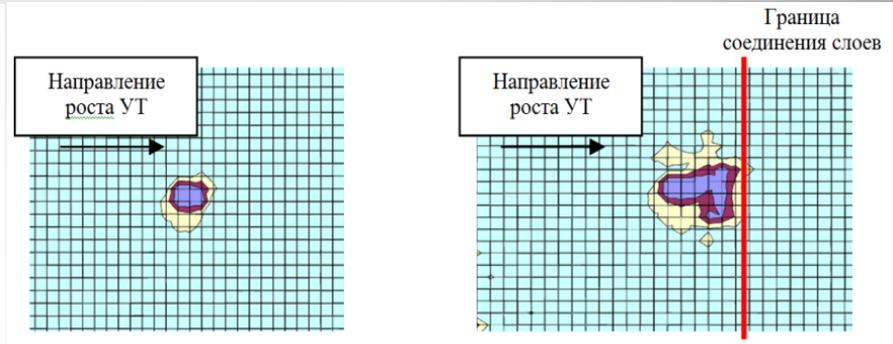
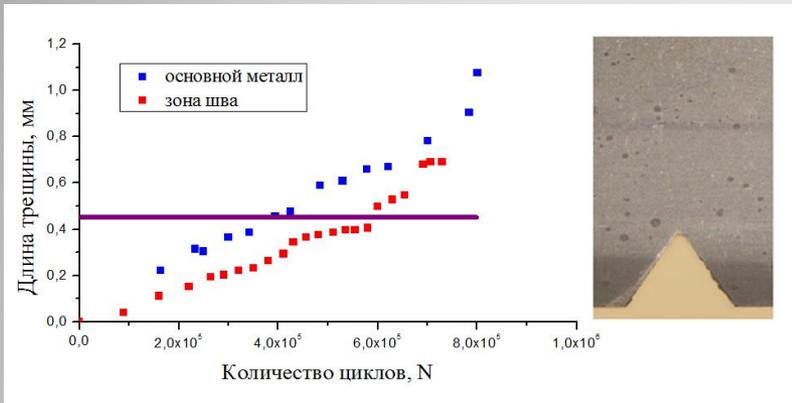


Многослойные композиты системы «сталь-сталь», полученные пакетной прокаткой



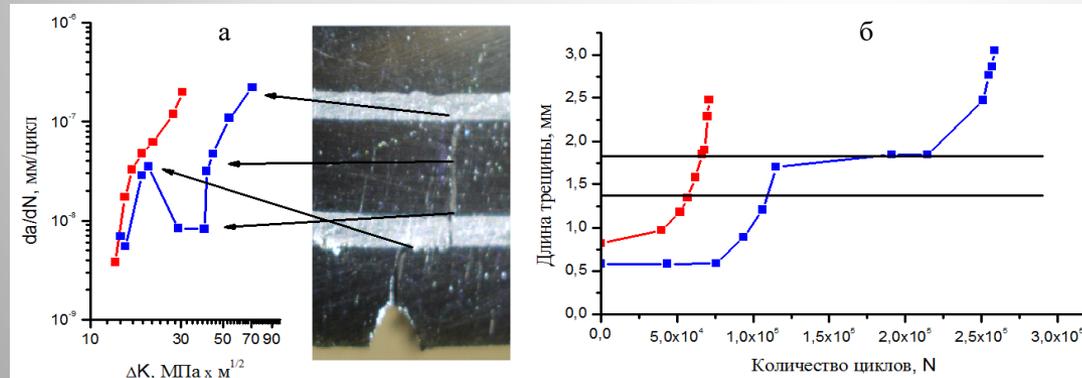
Существенный вклад в конечный комплекс свойств вносят особенности строения границы соединения слоев (состав и толщина отдельных слоев, прочность соединения, строение границы и т.п.)

# ЦИКЛИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ И СТАЛЬНЫХ КОМПЗИТОВ



Форма ЛЗПД в вершине УТ на удалении от границы соединения слоев и при подходе к границе соединения слоев композита

Диаграмма живучести двухслойного биметалла 09Г2С-09Г2С.

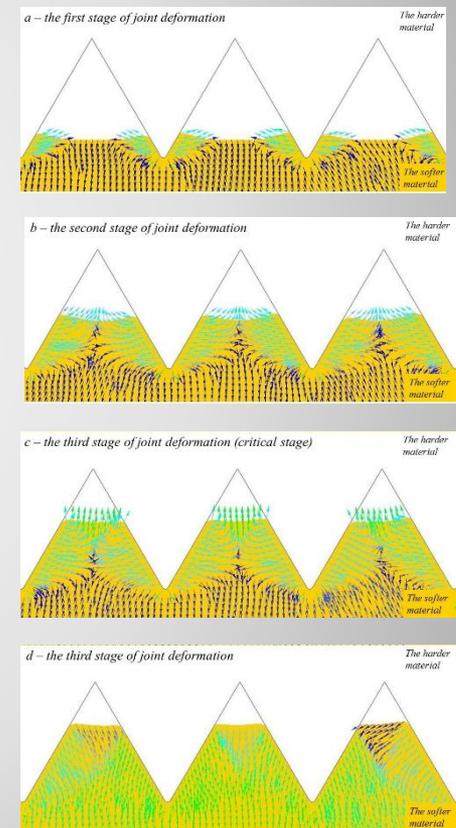
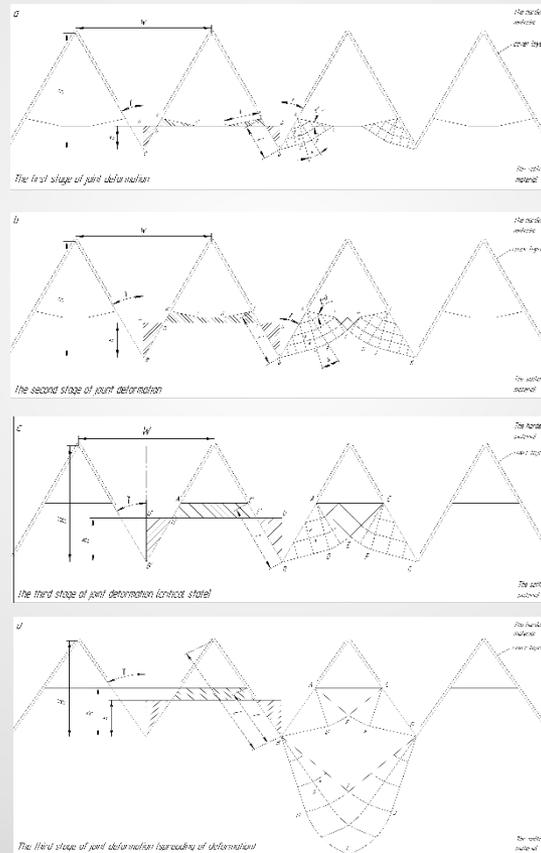
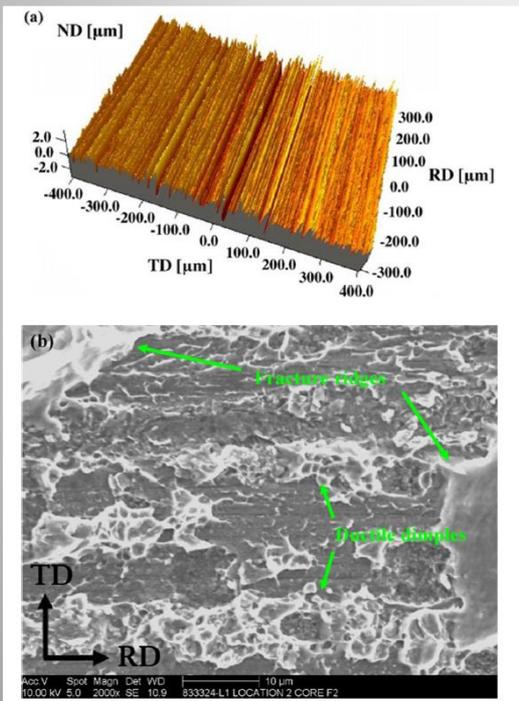


КДУР (а) и диаграммы живучести (б) монолитного образца стали 09Г2С (■) и 5-слойного композита «09Г2С-АМц» (■)



Сопоставление экспериментальной и расчетной диаграмм живучести слоистого композита

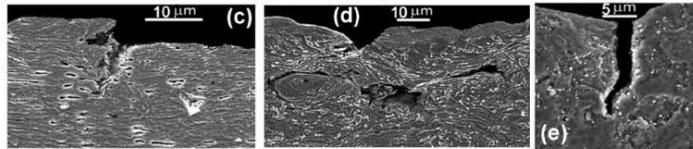
Предложен новый механизм соединения разнородных материалов при их совместной пластической деформации при производстве слоистых композиционных материалов. Представлена методика расчета количественных параметров соединения материалов на основе новой математической модели и выполнено ее сопоставление с результатами компьютерного моделирования, а также с экспериментальными результатами из литературы. Уникальность методики – акцент делается на использовании исходных свойств материала, таких как кривая сопротивления деформации, особенности строения поверхности, термомеханические режимы получения)



## II Edge cracking of thin sheets during rolling due to the inherent low plasticity of HSS



(a) Examples of macroscopic edge cracks in QP1500  
Rolling Direction →



Source: Samei, J., Salib, Y., Amirmaleki, M., Wilkinson, D.S., 2019.  
The role of microstructure on edge cracks in dual phase and  
quench and partitioning steels subject to severe cold rolling.  
Scripta Materialia 173, 86–90.

Source: Dodd, B., Boddington, P., 1980. The Causes of  
Edge Cracking in Cold Rolling. Journal of Mechanical  
Working Technology 3, 239–252.

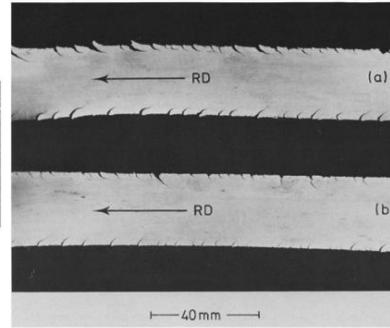
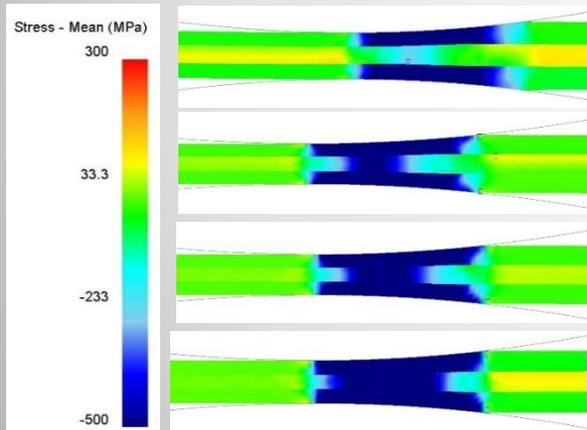


Fig. 8. Directions of crack propagation at the minimum thickness obtainable on the mill (0.24 mm): (a) 6.85 mm initial edge radius, (b) initially square-edged.

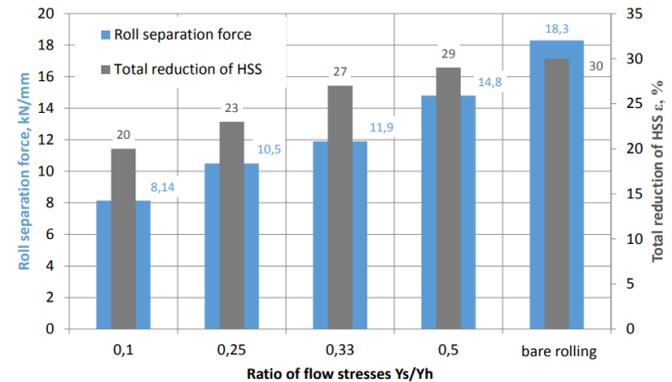


Stress state of packs during rolling:

$$a - Y_s/Y_h = 0.1; b - Y_s/Y_h = 0.25; c - Y_s/Y_h = 0.33; d - Y_s/Y_h = 0.5.$$

Thickness reduction  $\epsilon = 30\%$

## Roll separation force and total reduction $\epsilon$ of HSS

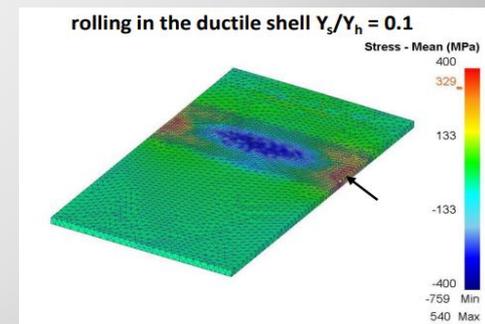
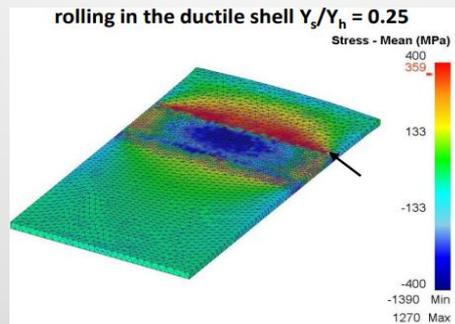
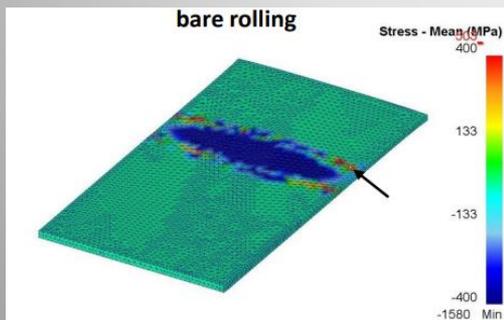
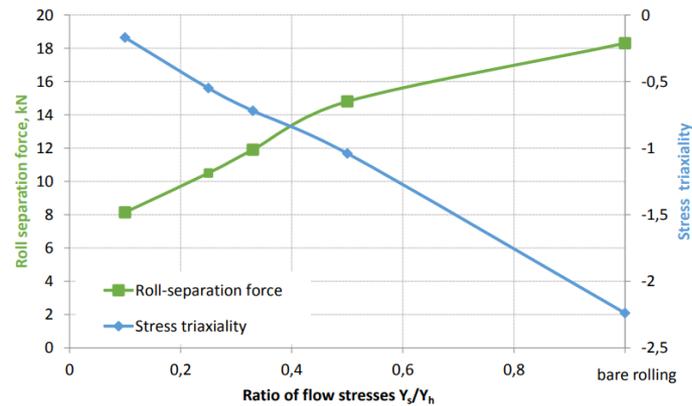


Два конкурирующих процесса, приводящих с одной стороны к более жесткому напряженному состоянию, хоть и при снижении усилий деформирования, А с другой к обеспечению более благоприятного состояния на кромках, что снижает процесс трещинообразования в целом.

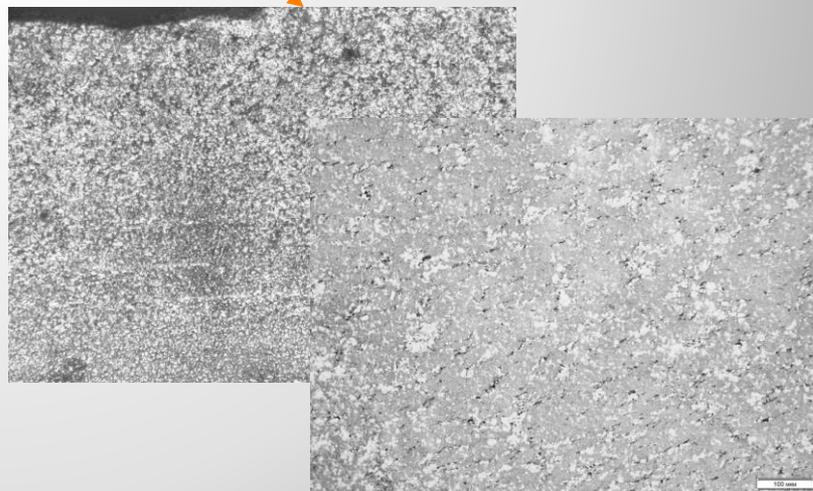
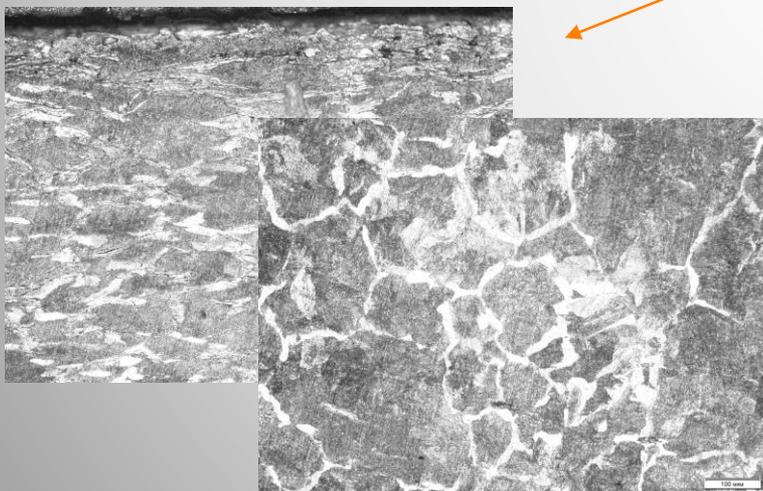
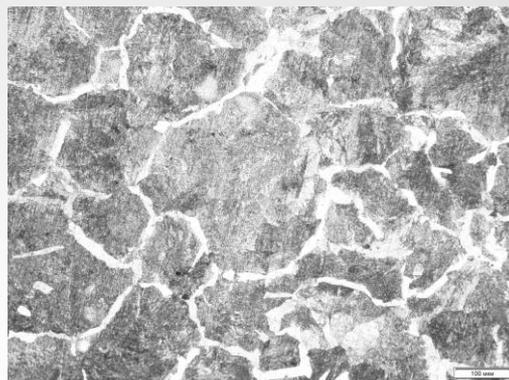
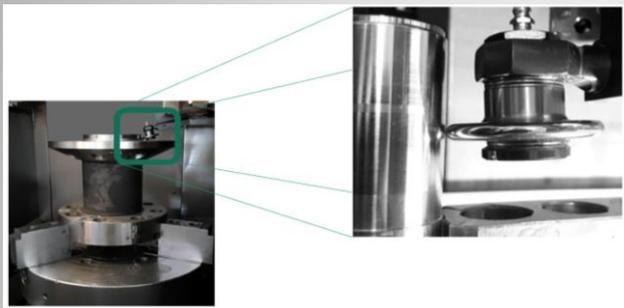
### 8. Roll separation force and stress triaxiality $\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$ (deformability) of HSS

$\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$  – stress triaxiality as stress state indicator, where  $\sigma_m = \sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$  - mean normal stress ,  $\bar{\sigma}$  - effective stress.

The graph shows that the choice of a softer shell material deteriorates stress state



# Обработка инструментальных сталей с формированием заданного комплекса свойств



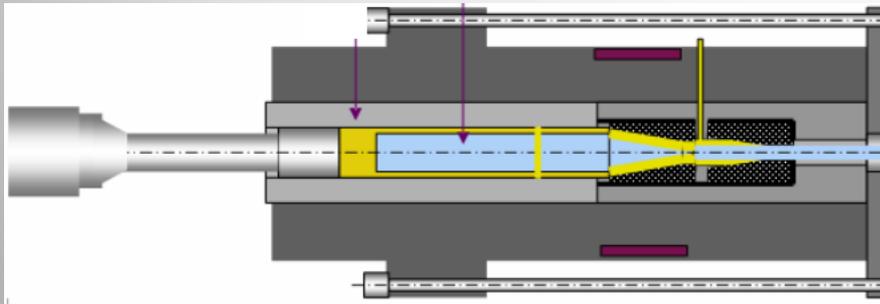
## Моделирование и разработка технологии и инструмента для гидромеханического выдавливания композиционных материалов

**Цель:** Разработать технологию и оборудование полунепрерывного гидромеханического выдавливания (метод ПНГМВ) прутковых изделий из труднодеформируемых материалов.

**Новизна:** Метод ПНГМВ является альтернативой применения процессов выдавливания труднодеформируемых материалов, в том числе композитов слоистого и волокнистого строения, жидкостью высокого давления.

### Характеристики:

Метод ПНГМВ даёт возможность обработки труднообрабатываемых материалов на серийном оборудовании кузнечно-прессового производства.



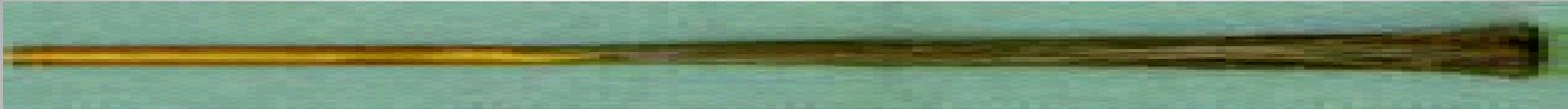
### Область применения:

Обработка жаропрочных и тугоплавких материалов, химически стойких в агрессивных средах металлов (вольфрам, молибден, ниобий, тантал); металлов с высокой адгезией к деформирующему инструменту (титан, тантал, ниобий), малопластичных металлов, а также структурно-неоднородных материалов.

### Реализация проекта:

Внесены технические предложения для внедрения результатов работы на Чепецком механическом заводе, г. Глазов.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАШИН ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ВОЛОКНИСТОГО СТРОЕНИЯ



Осуществлено моделирование и совершенствование процессов прессования и волочения металлических композитов волокнистого строения систем Nb-Ti+Cu и Nb-Sn+Cu, обладающих сверхпроводящими свойствами.



← Сборка заготовки

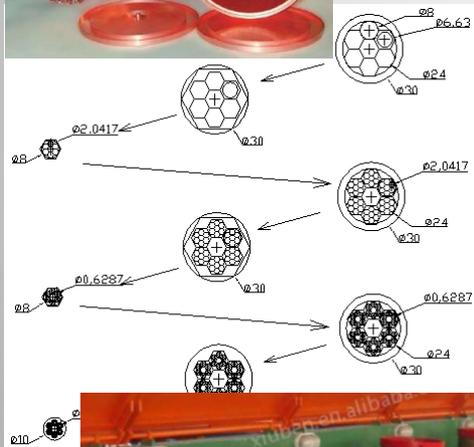


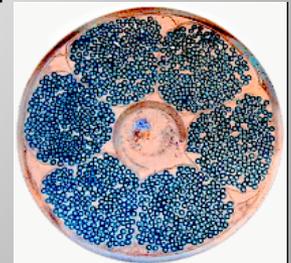
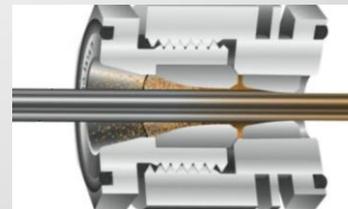
Схема технологических переходов производства Nb-Ti сверхпроводников



↑ Выдавливание композитной заготовки на гидравлическом прессе



→ Волочение провода на многократной машине



## Реализация проекта:

Технология внедрена на Ульбинском металлургическом заводе, г. Усть-Каменогорск.

## ПОЛИМЕРНЫЕ И ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ



Консоль крыла самолета МС-21

(Фото с сайта <https://media73.ru/2021/17-5-metrov-kompozitnoe-krylo-dlya-ms-21-dostavili-s-rodiny-lenina-v-irkutsk>)



Композитная геосетка в дорожном строительстве.

(Фото с сайта <https://www.d-kvadrat.ru/tehnologii/3168>)



Протезы.

(Фото с сайта <https://habr.com/ru/post/365831/>)



Композитные материалы в стоматологии.

(Фото с сайта <https://stomatology.su>)

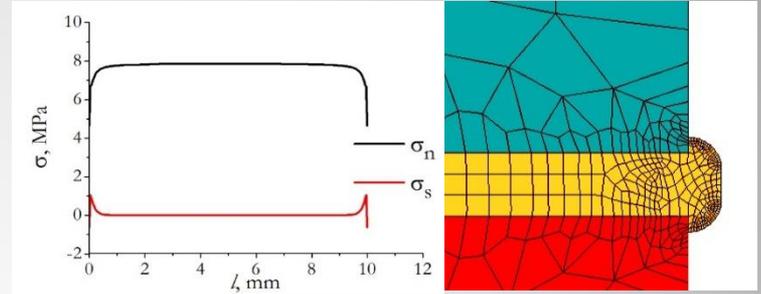
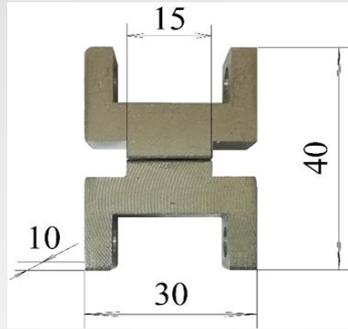
# Испытания модифицированных образцов Аркана на растяжение со сдвигом

0°

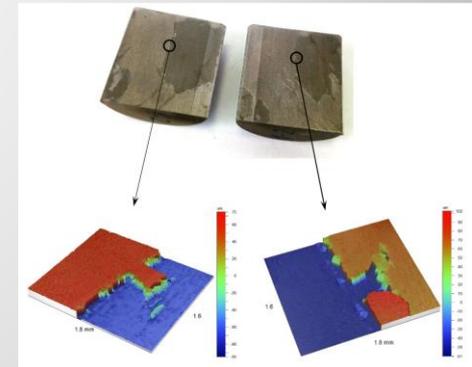
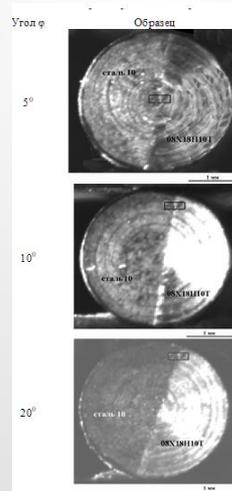
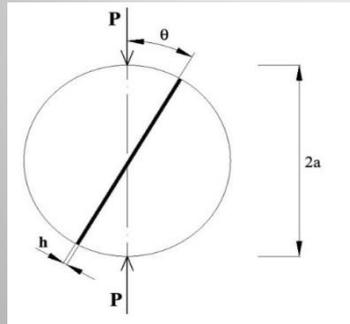
45°

Склеенная вставка образца

Снижение концентрации краевых напряжений

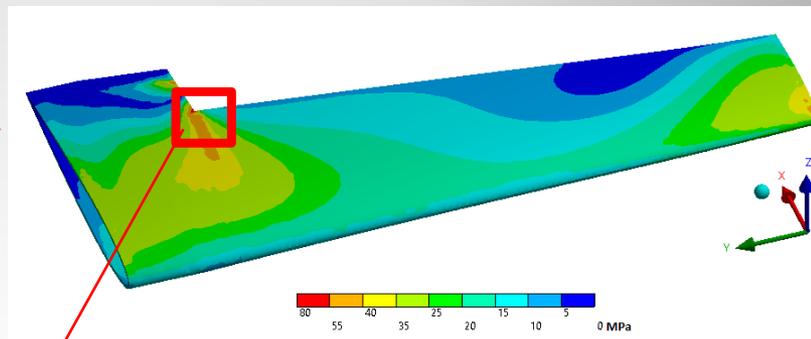
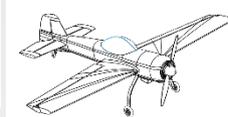


# Испытания на поперечное сжатие со сдвигом (Brazil test)



Рассчитано напряженно-деформированное состояние на микро- и макроуровне в крыле при его изгибе для модели легкомоторного самолета

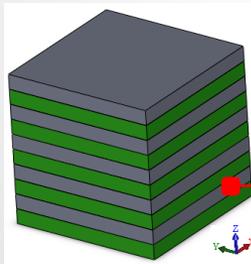
### Макроуровень I – уровень конструкции



Определено напряженное состояние в крыле при его изгибе на макроуровне

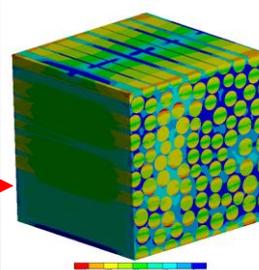
### Макроуровень II – уровень укладки монослоев

На данном макроуровне определено напряженное состояние в каждом монослое.



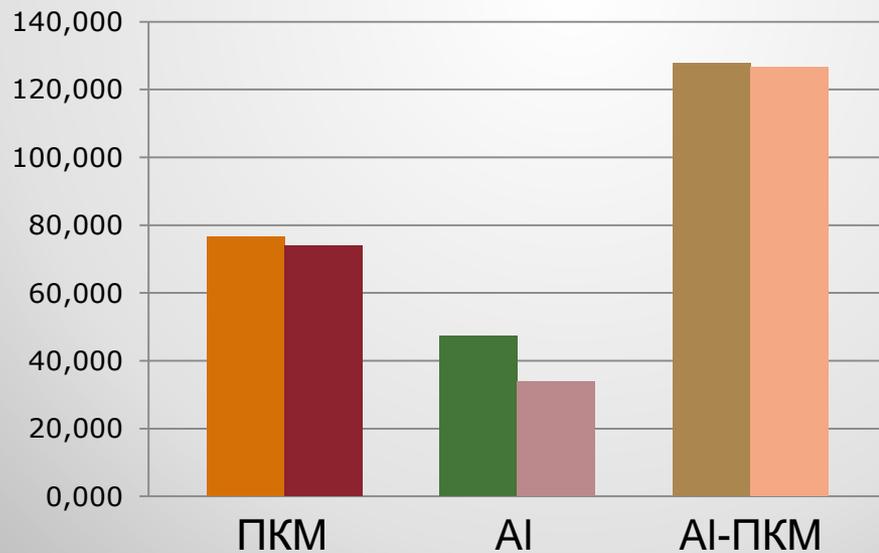
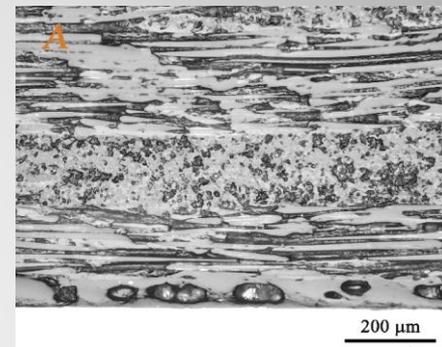
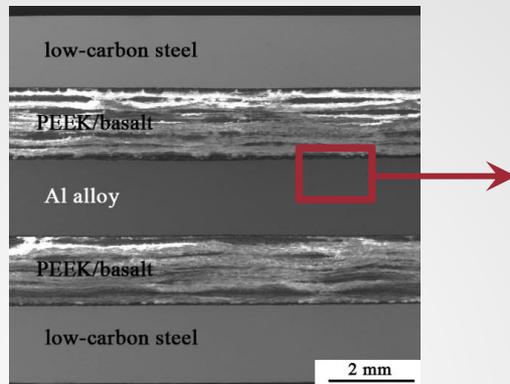
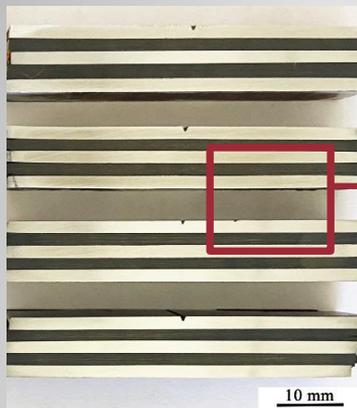
### Микроуровень – уровень укладки волокон

На микроуровне определено напряженное состояние в волокне и матрице для каждого монослоя.



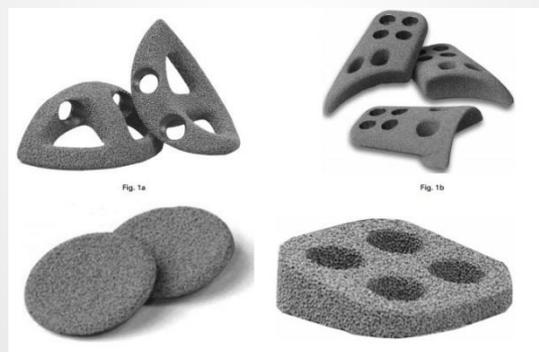
Выполненные расчеты на модели крыла использовались для оценки деградации механических свойств крыла после его повреждения. Геометрия и глубина залегания дефектов после полученного повреждения определялись по результатам теплового неразрушающего контроля. Результаты расчетов показали, что для десятислойного поперечноармированного стеклопластика применение многоуровневого подхода приводит к более точному прогнозированию остаточного ресурса конструкции по сравнению с традиционным методом, использующим данные об уровне напряжений на макроуровне.

# Разработка и исследование свойств гибридных слоистых металлополимерных композитов



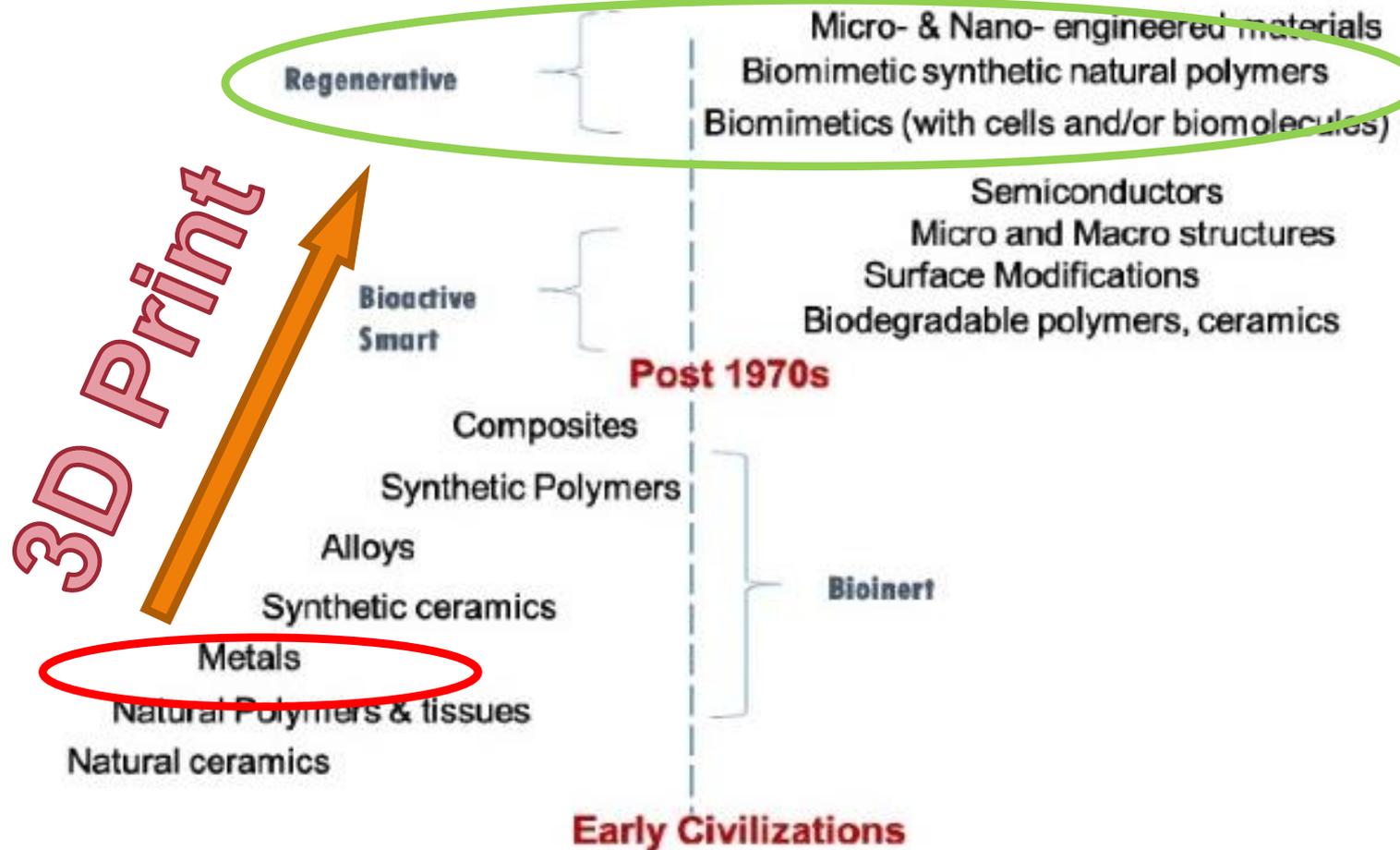
## АУГМЕНТАЦИЯ КОСТНЫХ ОКОЛОСУСТАВНЫХ ДЕФЕКТОВ ЯЧЕЙСТАМИ ТИТАНОВЫМИ ИМПЛАНТАТАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ НА БАЗЕ 3D ПЕЧАТИ.

На современном этапе важная роль отводится персонализированной медицине и **3D аддитивному прототипированию**, соответствующих конкретным биологическим и клиническим проблемам.

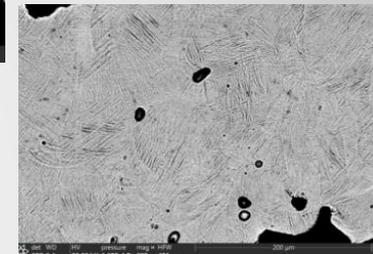
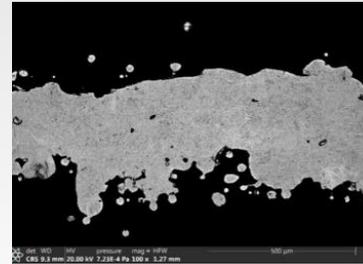
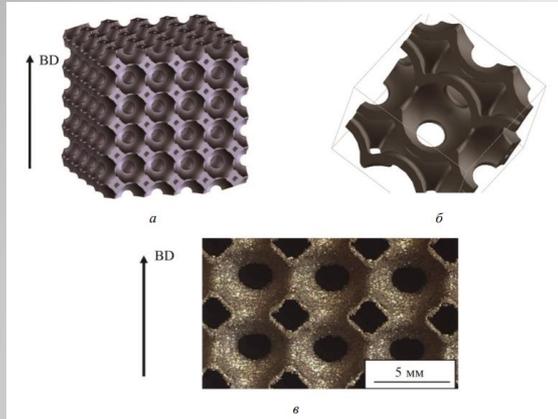


Jang T.-S. [и др.]. Multiscale porous titanium surfaces via a two-step etching process for improved mechanical and biological performance // Biomedical Materials. 2017. № 2 (12). С. 25008.

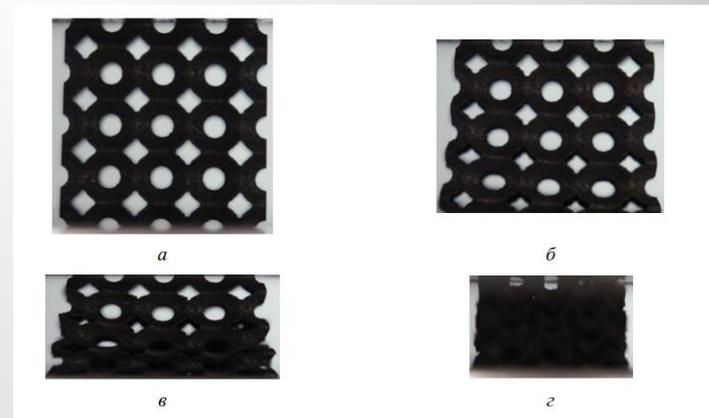
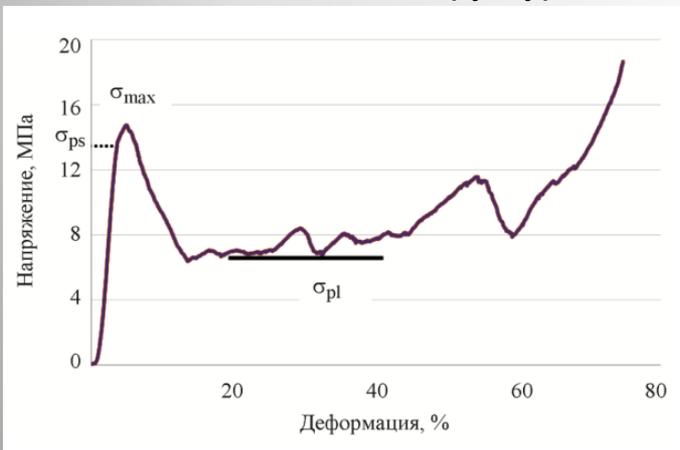
## Тренды развития биоаугментации



# Особенности разрушения ячеистых структур, полученных лазерным селективным сплавлением

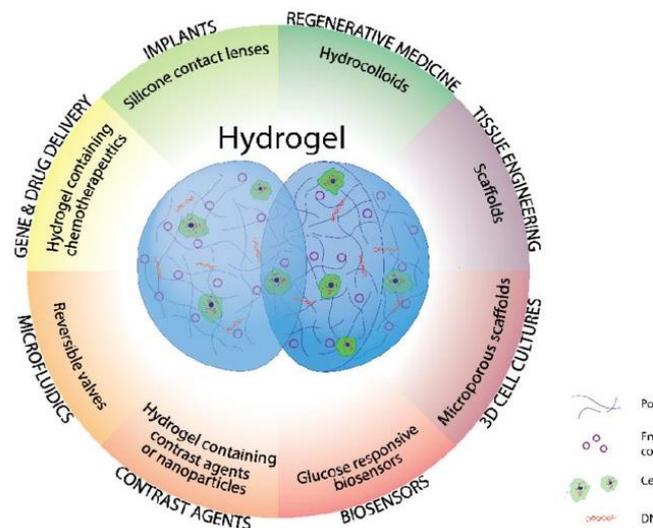


Макет ячеистой структуры

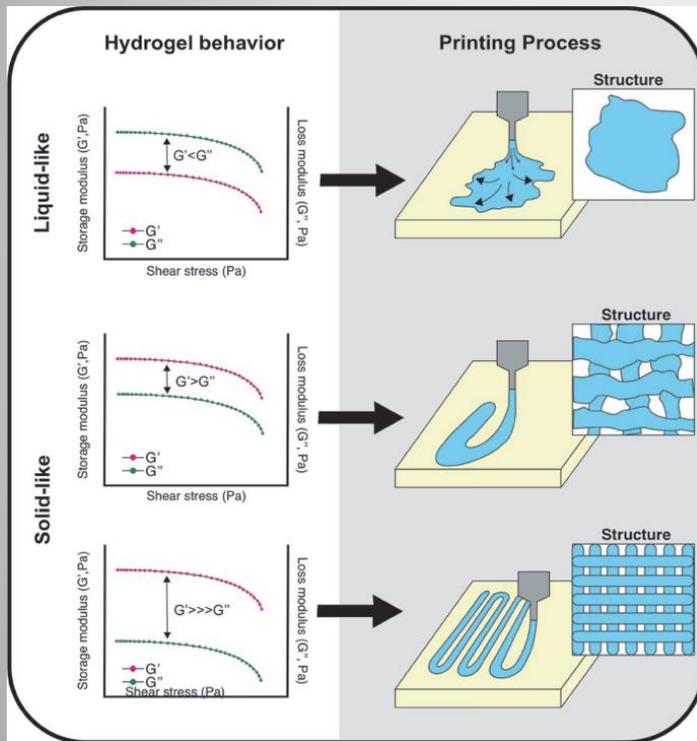


# Разработка новых биоматериалов

Гидрогелевые биоматериалы являются важными составляющими компонентами инженерных тканей для применения в регенеративной медицине и доставке лекарств. Механические и реологические свойства различных классов гидрогелей играют решающую роль при их выборе для решения узкоспециализированных задач в процессе лечения человека. Несмотря на значительные успехи в разработке методов и технологий, позволяющих настраивать биомеханические свойства гидрогелей, все еще существуют проблемы, связанные с синтезом гидрогелей со сложными механическими профилями. Поэтому перспективными, на наш взгляд, являются работы направленные на улучшение биомеханики гидрогелей.



# 3D биопечать гидрогелей и тканевая инженерия



Тканевая инженерия - это процесс, который создает трехмерный (3D) пористый каркас, имитирующий микроокружение естественных тканей, и при этом поддерживает миграцию, адгезию и пролиферацию клеток для замены поврежденных тканей.

Основное преимущество 3D-биопечати в инженерии хрящевой и костной тканей заключается в том, что 3D-биопечать гидрогелей и активных веществ может быть иерархически распределена в пространстве в соответствии с требуемыми функциями импланта. Структура взаимосвязанных пор и величина максимально возможной площади поверхности импланта, также зависит от механических свойств химически или физически модифицированных традиционных биосовместимых гидрогелей.

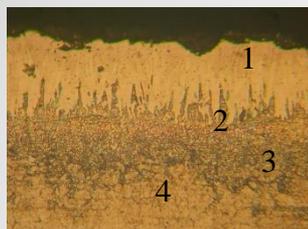
**Исследование формирования структуры, физико-механических свойств функциональных покрытий для повышения долговечности деталей.**

Основное направление научной деятельности связано с исследованиями закономерностей формирования структуры и физико-механических свойств защитных покрытий на конструкционных и функциональных материалах.

Разработана технологическая инструкция процесса диффузионного борирования поверхности ножей и осей режущей пары гидромеханического щелевого перфоратора, предназначенного для вскрытия буровых скважин с целью увеличения сроков их эксплуатации. Технология используется в производстве.



Режущий узел

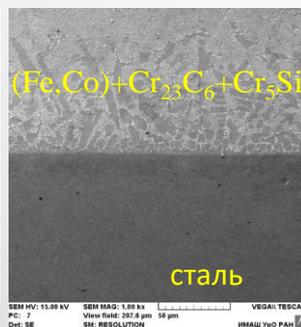
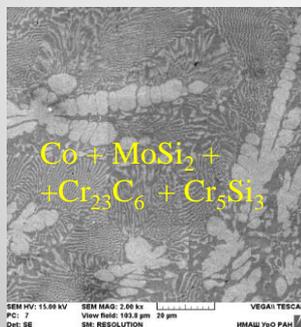


Микроструктура боридного покрытия на стали 4X5MFC:

- 1 – зона  $(Fe,Cr)B$ ,
- 2 – зона  $(Fe,Cr)_2B$ ,
- 3 – диффузионная зона,
- 4 – сталь-основа.

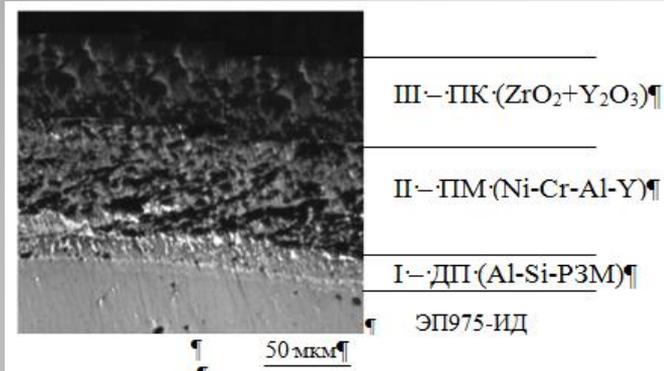
Марка стали	Содержание бора, мас. %	Толщина, мкм	Твердость, HV 0,05			Фазовый состав
			Зона $(Fe,Cr)B$	Зона $(Fe,Cr)_2B$	Диффузионная зона	
4X5MFC	13-15	200	1550	600	400	$(Fe,Cr)B$ ; $(Fe,Cr)_2B$ ; $CrB_2$

пояс тарелки клапана,  
упрочненный наплавкой



Разработан режим плазменной наплавки, позволяющий сформировать переходную диффузионную зону на границе со сталью, снижающую вероятность появления охрупчивающих фаз и плавный переход свойств. В результате увеличена долговечность покрытия.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОКРЫТИЯ



Микроструктура покрытия КТП-2:  
ПК – плазменный керамический  
слой, обеспечивающий защиту от  
высоких температур,  
ПМ – плазменный металлический  
подслой,  
ДП – диффузионное жаростойкое  
покрытие

Покрытие состоит из трех слоев:

1 – диффузионное алюмосилицидное покрытие, обеспечивающее адгезию плазменных слоев и защиту от высокотемпературного окисления и коррозии, толщиной 50 мкм,  
2 – металлический подслоя, наносимы плазменным напылением, обеспечивающий адгезию керамического слоя и плавный переход от металлического покрытия к керамическому, толщиной 100 – 120 мкм,  
3 – керамический слой, обеспечивающий снижение температуры лопаток во время эксплуатации, толщиной 70 – 100 мкм.  
Общая толщина покрытия составляет 0,17 – 0,27 мм.

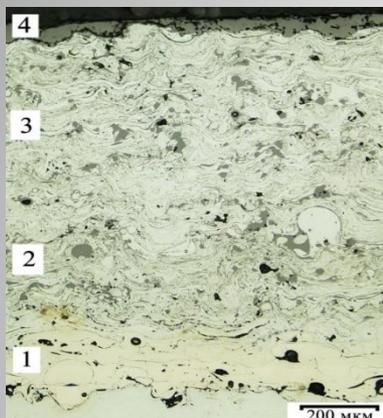
Покрытие внедрено и используется на предприятии ВПК.

Организовано обучение персонала технологическому процессу последовательного составляющих слоев покрытия.

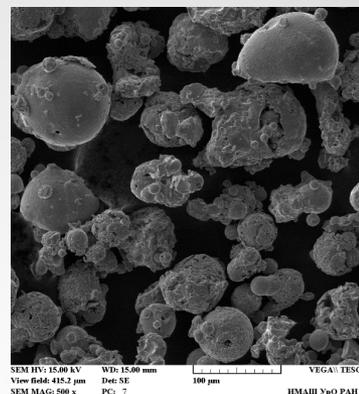
Разработана технологическая инструкция на процесс нанесения комбинированного покрытия.

# Разработка составов многослойных высокотемпературных покрытий

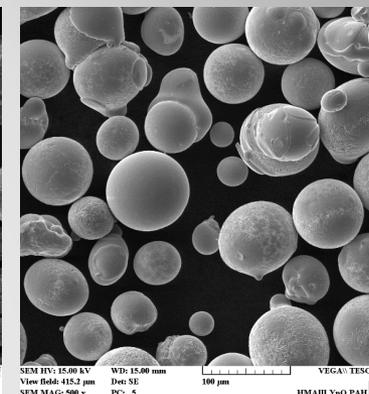
**Толщина слоев покрытий, мкм**



Покрытие	Состав Fe-Cr-Mn-V-Si-C-B	
Первый слой		200
Второй слой		250
Третий слой		350
Четвертый слой		50
Общая толщина		850



порошок Fe



порошок Fe-Cr-Mn-V-Si-C-B

**Первый слой** предназначен для защиты от высокотемпературного окисления и износа, он получен напылением самофлюсующихся порошка Fe-Cr-Mn-V-Si-C-B, необходим для предотвращения интенсивного разрушения оправок в случае износа верхних слоев (позволит своевременно изъять оправку из эксплуатации и повторно нанести разрушенные внешние слои и восстановить защитные свойства оправки). **Второй слой** является переходным и получен напылением смеси порошка Fe-Cr-Mn-V-Si-C-B с порошком Fe в соотношении 50:50, предназначен для плавного изменения свойств от внешнего слоя к внутреннему и является поставщиком железа для формирования оксидной пленки при высоких температурах эксплуатации. **Третий металлооксидный слой** получен при напылении порошка Fe в окислительной атмосфере и выполняет функцию восстановления внешнего оксидированного слоя при рабочих температурах прошивных оправок. **Четвертый слой** – смесь оксидов железа, полученная при обжиге поверхности газовой горелкой, играет роль твердой смазки при эксплуатации оправок и термобарьерного покрытия)

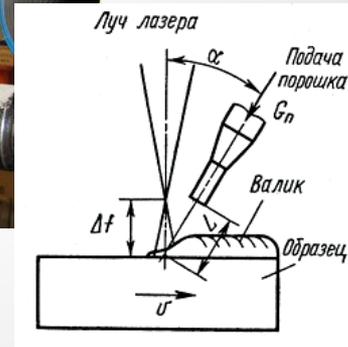
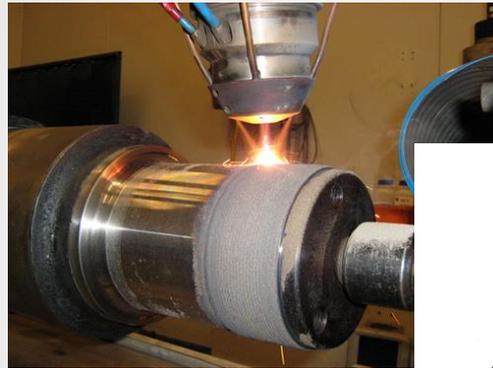
## Получение хромоникелевых покрытий с помощью комбинированной лазерно-термической обработки

**Цель:** Повышение долговечности различных деталей и инструмента.

**Новизна:** Формирование теплостойкой и износостойкой структуры каркасного типа с крупными упрочняющими фазами.

### Характеристики, эффективность:

- Существенное расширение области применения хромоникелевых покрытий для деталей, эксплуатируемых при повышенных температурах;
- Сохранение высокой твердости и износостойкости в широком интервале температур нагрева (не ниже 1000 °С);
- Повышение износостойкости до 2,8 раза;
- Снижение коэффициента трения.



### Публикации и патенты:

Патент РФ 2492980;

Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. Формирование износостойкого хромоникелевого покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости комбинированной лазерно-термической обработкой // МиТОМ. – 2015. – № 3. – С. 39-46.

### Область применения:

Способ может быть реализован в промышленности при производстве быстроизнашивающихся деталей и инструмента.

- Восстановление изношенных деталей машин и механизмов;
- Повышение стойкости быстроизнашивающихся деталей и инструмента, в том числе подверженных в условиях эксплуатации воздействию высоких контактных нагрузок, температур и агрессивных сред: валы двигателей, валки прокатных станов, плунжеры, экструдеры, шестерни, лопатки вентиляторов и турбин, насосные вкладыши и др.

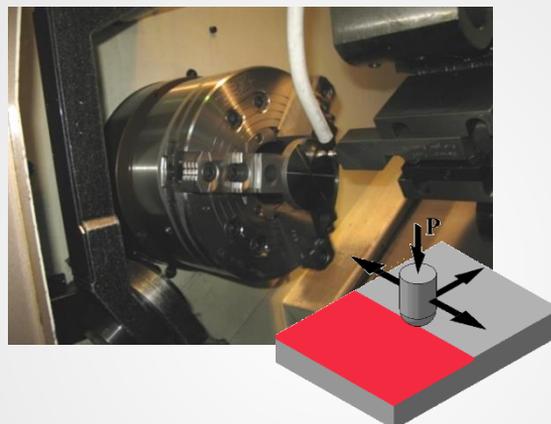
## Наноструктурирующая фрикционная обработка металлических поверхностей скользящими инденторами (совместно с ИФМ УрО РАН, Предприятием «Сенсор»)

**Цель:** Повышение твердости, теплостойкости и износостойкости изделий.

**Новизна:** Реализация максимально возможной сдвиговой деформации, обеспечивающей наноструктурирование и упрочнение поверхностного слоя.

### Характеристики, эффективность:

- Формирование упрочненной поверхности с низкой шероховатостью ( $Ra \leq 100$  нм);
- Повышение теплостойкости углеродистых сталей до 450-500 °С;
- Рост в 2-5 раз износостойкости при трении скольжения и абразивном изнашивании;
- Формирование высокого уровня (более 400 МПа) благоприятных сжимающих напряжений в поверхностном слое.



### Область применения:

на машиностроительных предприятиях - для стальных изделий, эксплуатируемых в условиях интенсивного износа, высоких давлений, значительного нагрева, низких климатических температур: детали запорной трубопроводной арматуры, нефтегазового, насосно-компрессорного и энергетического оборудования, валы, подшипники, гильзы цилиндров, инструмент и др.

### Реализация проекта:

Технология финишной наноструктурирующей обработки скользящими инденторами реализована в промышленности при производстве прецизионных деталей различного назначения.

Исследованы 8 марок углеродистых (от стали 20 до У13), 4 марки низколегированных сталей (40Х, 20ХН3А, 80С2, 80С4), 4 марки коррозионностойких аустенитных сталей (X18Н10Т и зарубежные аналоги).

### Публикации и патенты:

2 патента РФ 2194773 и 2458777; около 50 публикаций в рецензируемых изданиях.

**Спасибо за внимание!**