



МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н. П. Огарева



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ



Комплексный проект

**«Разработка технологии и создание производства
теплопроводящих изделий из металломатричных
композиционных материалов для приборов силовой
электроники и преобразовательной техники»:**

полученные результаты и перспективы реализации

г . Саранск 2012 г.



Проект выполняется в рамках реализации
Постановления Правительства РФ от 9.04.2010 г.
№ 218 «О мерах государственной поддержки развития
кооперации российских высших учебных заведений и
организаций, реализующих комплексные проекты по
созданию высокотехнологичного производства»

Государственный контракт № 13.G25.31.0030

Исполнители проекта:

ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск)

МГУ им. Н.П. Огарева (г. Саранск)

ФГУП «ВИАМ» (г. Москва)



Проект выдержал серьезный конкурсный отбор

- В первой очереди открытого публичного конкурса по отбору организаций на право получения государственной субсидии участвовали **480 проектов**
- Победителями стали **57** организаций
- Конкурс - **1/8**

Цель проекта, сроки реализации и объемы финансирования

Цель проекта:

1. Разработка технологии производства теплопроводящих изделий из металломатричного композиционного материала (ММКМ) Al-SiC с заданными значениями: коэффициента теплового расширения (КТР), плотности, теплопроводности и механической прочности.
2. Создание на ОАО «Электровыпрямитель» промышленного производства изделий на основе ММКМ Al-SiC для приборов силовой электроники и преобразовательной техники.

Общий объем финансирования проекта – 560 млн. руб.

- Объем государственной субсидии – **280 млн. руб.** .
- Объем собственных средств ОАО «Электровыпрямитель» – **280 млн. руб.**
- Сроки финансирования проекта – **2010-2012 г.г.**

Планируемый объем продукции, выпускаемой с использованием результатов проекта:

- 2013 – 200,0 млн. руб.;
- 2014 – 300,0 млн. руб.;
- 2015 – 400,0 млн. руб.;
- 2016 – 500,0 млн. руб.;
- 2017 – 600,0 млн. руб.

Состояние работ по тематике проекта:

- В России работа по организации промышленного производства теплопроводящих изделий из металломатричных композиционных материалов для приборов силовой электроники и преобразовательной техники проводится **впервые**.
- Подобные работы ведутся в США, Германии и Японии. Коммерческий выпуск ММКМ системы Al-SiC начат фирмами «Ceramics Process Systems» и «Thermal Transfer Composites» (США). При поддержке государства активно ведут работу по созданию Al-SiC научно-исследовательские центры **Китая**.

Проблемы, на решение которых направлен проект:

- Повышение эффективности теплоотвода в изделиях силовой электроники
- Снижение веса изделий
- Повышение надежности силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе
- Импортозамещение

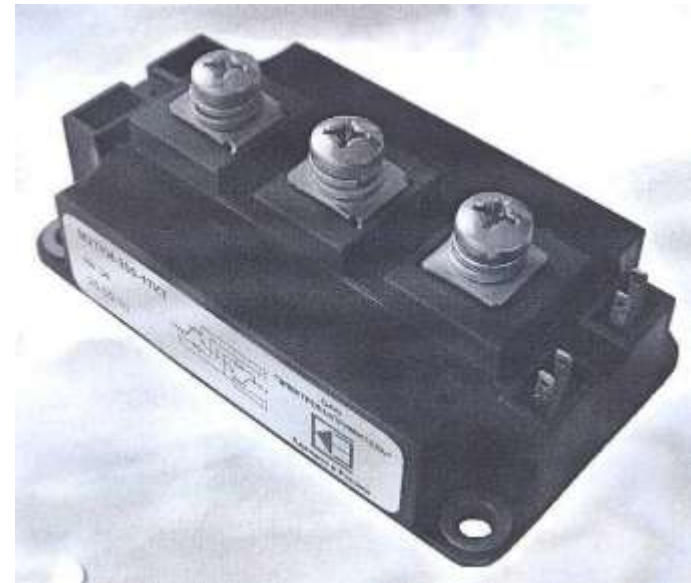
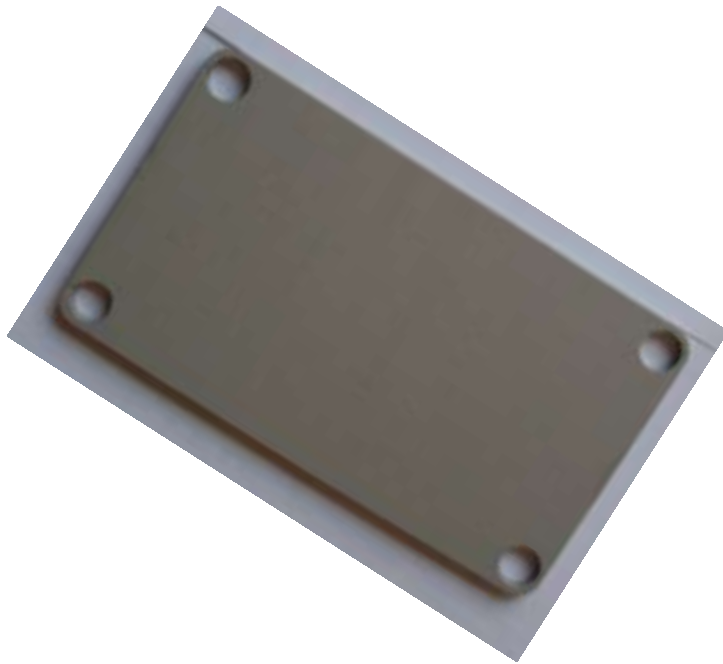
Планируемые результаты проекта

В результате реализации проекта должны быть:

- разработаны промышленные технологии изготовления теплопроводящих изделий из MMKM AlSiC для приборов силовой электроники и преобразовательной техники;
- разработана конструкторская, технологическая и нормативно-техническая документация;
- разработана и изготовлена технологическая оснастка;
- разработаны средства измерений и контроля.
- получены патенты.



Планируемое применение теплопроводящих оснований из AlSiC: IGBT модули на токи до 300 А и напряжение до 1700 В





Области применения силовых IGBT модулей



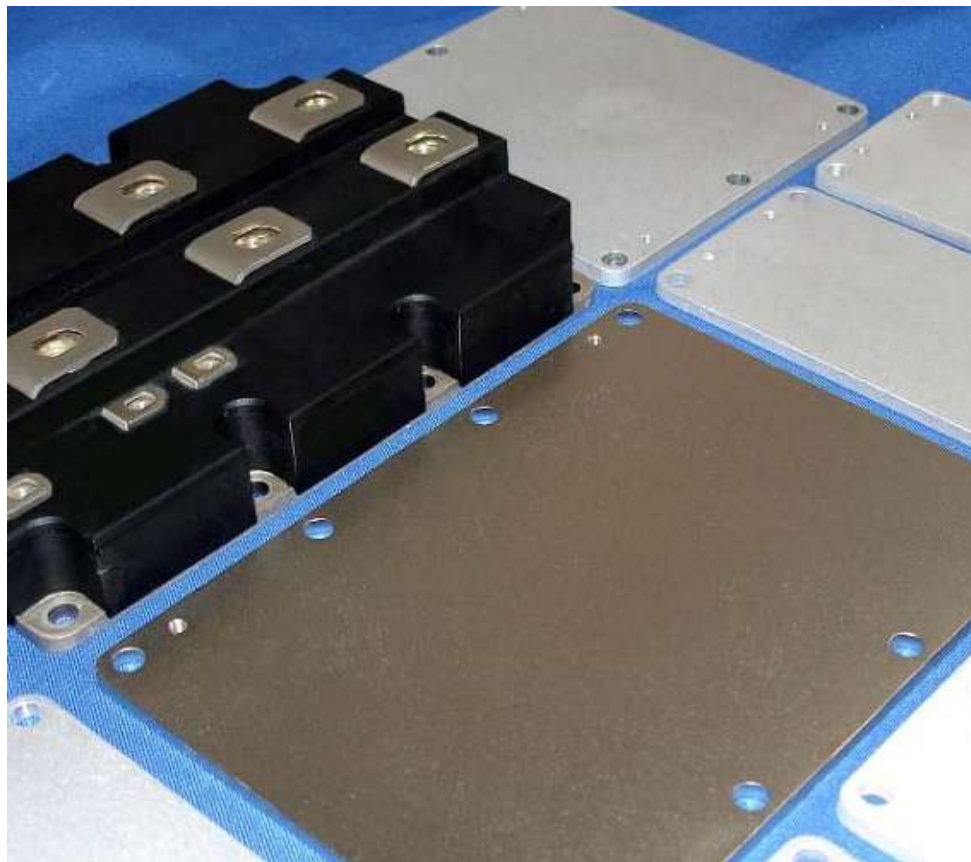
IGBT модули (Insulated Gate Bipolar Transistor)

На основе IGBT модулей (биполярных транзисторов с изолированным затвором) производится широкий спектр мощных силовых приборов, предназначенных для управления электродвигателями, преобразователями и регуляторами в диапазоне мощностей до единиц мегаватт



Области применения силовых полупроводниковых модулей с применением компонентов из AlSiC

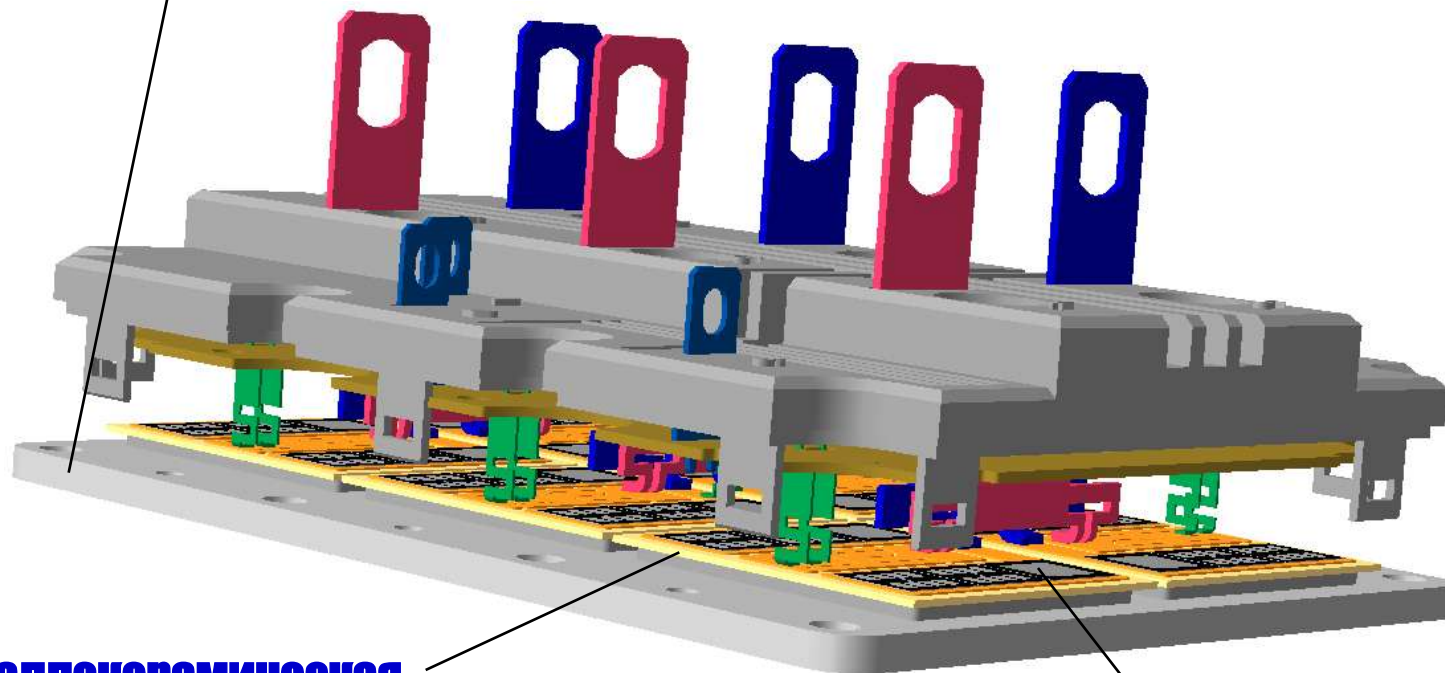
- Тяговый электропривод
- Преобразователи частоты для солнечной и ветроэнергетики
- Аэрокосмическая техника
- Мощные преобразователи, работающие в циклическом режиме





МЕДЬ- основной конструкционный материал для теплопроводящих оснований СПП

Теплопроводящее основание

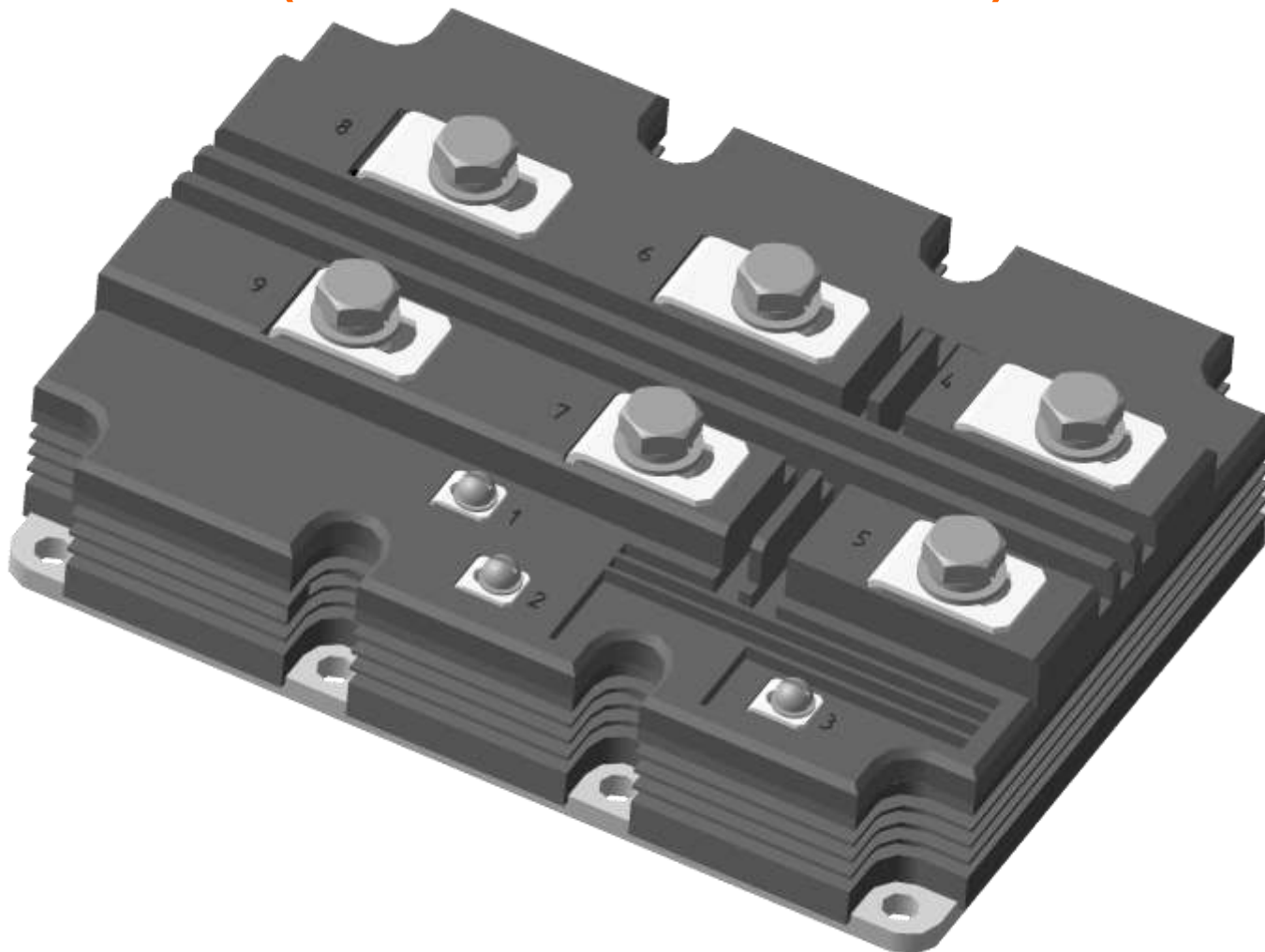


**Металлокерамическая
изолирующая
теплопроводящая
плата**

**Полупроводниковый
кристалл
(источник тепла)**



**Силовые полупроводниковые приборы отличаются
значительным тепловыделением
(до 10 кВт на один ключ)**





Основные свойства и характеристики Al-SiC :

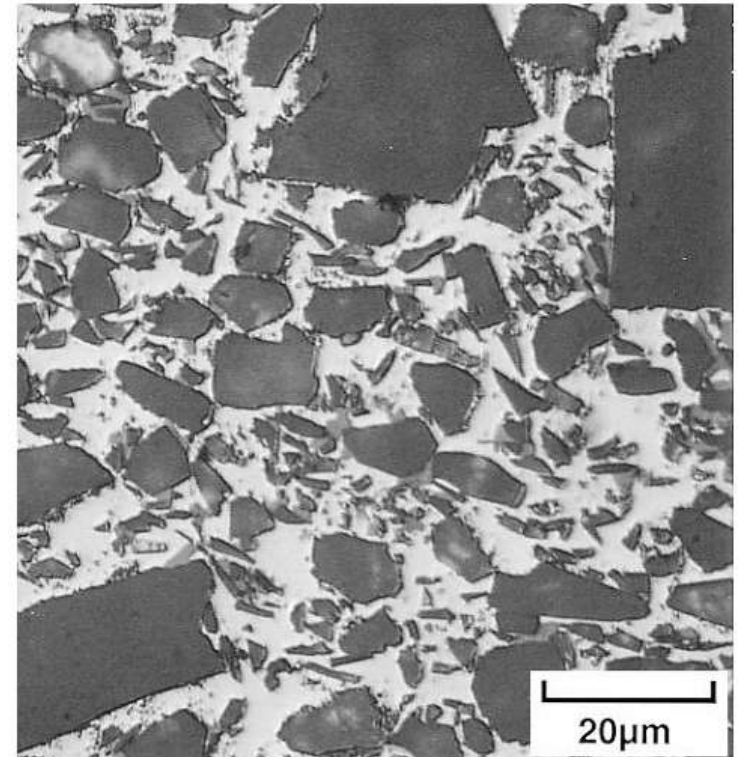
**Al-SiC – металломатричный композит,
состоящий из частиц карбида кремния
(наполнитель)**

и алюминиевого сплава (матрица)

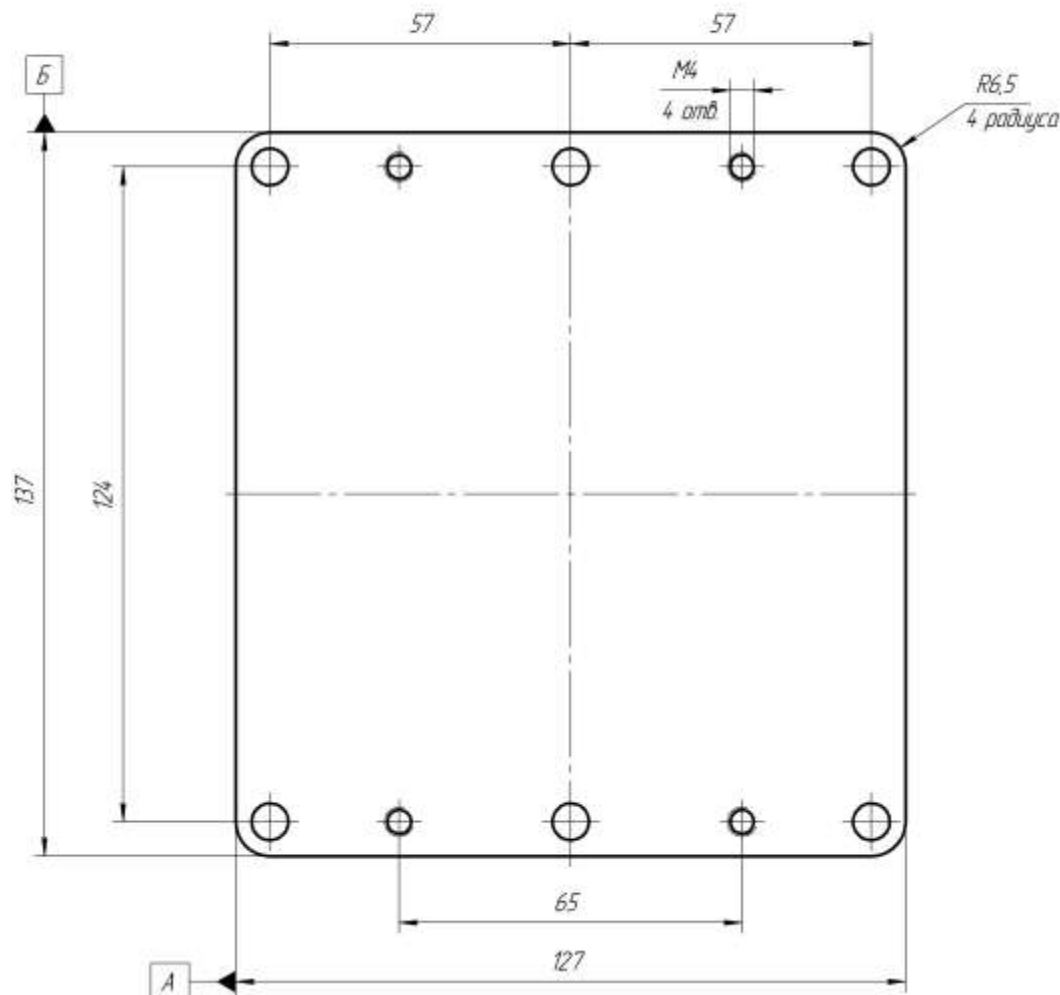
Совмещает высокую теплопроводность и управляемое тепловое расширение, Обладает низкой плотностью и высокой механической прочностью.

Характеристики композита Al-SiC, производимого зарубежными фирмами:

- Состав : $\approx 30\%$ Al, 70% SiC
- Плотность – $3,0$ г/см³;
- КТР в интервале $25-150^{\circ}\text{C}$ – $6,90 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹;
- Удельная теплоемкость - $0,75$ (кДж/кг град)
- Теплопроводность - $210 \div 230$ (Вт/м град)
- Модуль упругости - $220 \div 230$ (ГПа)
- Прочность на растяжение - $210 \div 225$ (МПа)
- Прочность на изгиб - $300 \div 370$ (МПа)



Конструкция теплоотводящего основания (типоразмер №3) из ММКМ AlSiC



Технические требования ОАО «Электровыпрямитель»

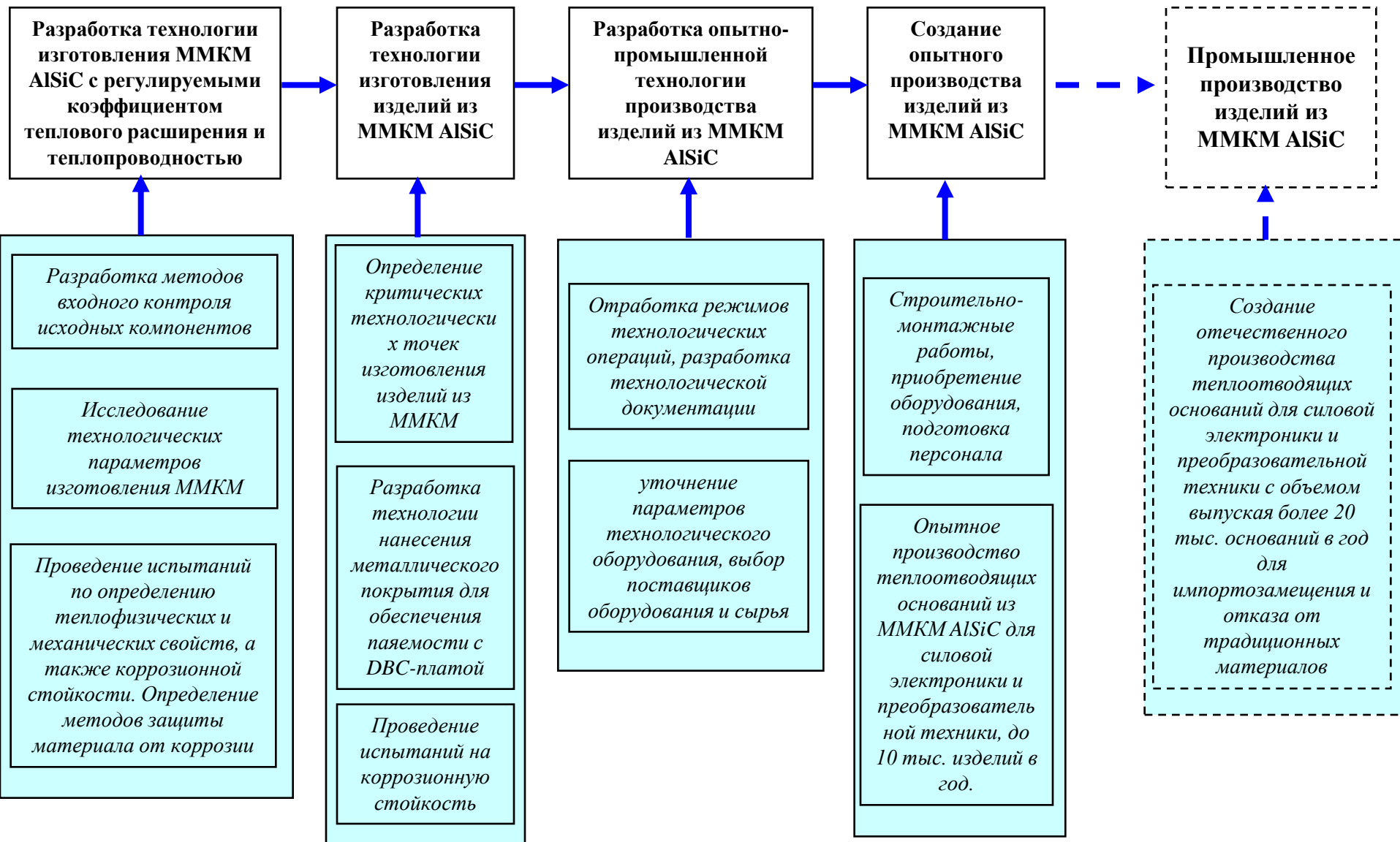
1. **Материал:** металломатричный композит Al-SiC.
2. Не допускаются на поверхности Д вмятины, выступы и заусенцы. Не допускаются острые кромки в отв. $\phi 7$ мм со стороны поверхности Д. Допускаются фаски $0,5 \times 450$
3. Поверхность Д: выпуклая сфера с высотой в центре оснований в пределах от 50 до 100 мкм.
Покрытие: Ni 6,9 мкм.
4. Основания должны быть пригодны для пайки при температуре 350°C с применением флюсов с последующей обработкой в отмывочной жидкости, в том числе в деионизированной воде.
5. Основания должны быть чистыми. Разводы, пятна окисления и загрязнения поверхности не допускаются.



Проблемы:

- ✓ обеспечение заданного содержания наполнителя в матрице (70 об.% SiC);
- ✓ механическая обработка, изготовление отверстий, в том числе резьбовых;
- ✓ обеспечение качественной паяемости изделий

Освоение технологии опытного производства изделий из ММКМ AlSiC



Основные результаты проекта

Период №1 (7.09.2010 г.-31.12.2010 г.)

**Объем НИОКТР, выполненных за счет субсидии: 100 млн.руб. ,
из них на приобретение специального оборудования и программного обеспечения - 72 млн.руб.**

Выполненные работы:

1. Проведены патентные исследования (МГУ им.Н.П.Огарева).
2. Разработан эскизный проект, в том числе:
 - 2.1. Проведены исследования:
 - гранулометрического состава исходных компонентов ММКМ AlSiC (МГУ им.Н.П.Огарева);
 - микроструктуры ММКМ AlSiC методами оптической микроскопии, электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа (МГУ им.Н.П.Огарева);
 - влияния состава матричных сплавов на пористость ММКМ AlSiC (ФГУП «ВИАМ»);
 - основных теплофизических и механических свойств изделий из ММКМ AlSiC (МГУ им.Н.П.Огарева, ФГУП «ВИАМ»);
 - 2.2. Разработана конструкторская документация (КД) на макеты изделий из ММКМ AlSiC.
 - 2.3. Изготовлены макеты изделий из ММКМ AlSiC (ФГУП «ВИАМ») ;
 - 2.4. Разработана программа и методика испытаний (ПМ) макетов изделий из ММКМ AlSiC.
 - 2.5. Проведены испытания макетов изделий из ММКМ AlSiC.
 - 2.6. Разработаны технологические инструкции и их проведена их отработка с применением приобретенного оборудования :
 - измерения химического и гранулометрического составов исходных компонентов ММКМ AlSiC (МГУ им.Н.П.Огарева);;
 - измерения химического и гранулометрического составов ММКМ AlSiC (МГУ им.Н.П.Огарева);
 - измерения теплофизических параметров исходных компонентов ММКМ AlSiC методом термического анализа (МГУ им.Н.П.Огарева);
 - контроля энерготермоциклостойкости изделий из ММКМ AlSiC(МГУ им.Н.П.Огарева);
 - измерения размеров и разброса размеров, шероховатости, неплоскостности и изгиба рабочих поверхностей изделий из ММКМ AlSiC (МГУ им.Н.П.Огарева);
 - 2.7. Разработана технологическая документация на технологию изготовления макетов изделий из ММКМ AlSiC.

Основные результаты проекта

Период №2 (1.01.2011г. -31.06.2011 г.)

Объем НИОКР, выполненных за счет субсидии: 30 млн.руб.

Выполненные работы:

1. Разработана пояснительная записка технического проекта. Часть 1.
2. Проведены исследования основных теплофизических и механических свойств макетов изделий из ММКМ AlSiC.
3. Разработана конструкторская документация на макеты изделий из ММКМ AlSiC.
4. Разработаны технологические инструкции измерений параметров ММКМ AlSiC:
 - модуля упругости;
 - ударной вязкости;
 - прочности на изгиб и растяжение;
 - микротвердости и твердости;
 - теплопроводности;
 - удельной теплоемкости;
 - коэффициента теплового расширения (КТР);
 - плотности.
5. Разработаны отдельные технологические операции изготовления макетов изделий из ММКМ AlSiC :
 - измерения электрического сопротивления изделий из ММК AlSiC;
 - контроля внешнего вида и паяемости изделий из ММК AlSiC;
 - контроля ультразвуковой сварки изделий из ММК AlSiC с алюминиевыми электродами;
 - измерения тепловых сопротивлений изделий из ММК AlSiC.
6. Разработана пояснительная записка предварительного проекта технологического процесса производства ММК AlSiC и изделий из него (часть 1).
7. Разработана технологическая документация для изготовления макетов изделий из ММК AlSiC.
8. Разработана программа и методика (ПМ) исследовательских испытаний экспериментальной партии ММКМ AlSiC.
9. Изготовлена экспериментальная партия ММКМ AlSiC.
10. Проведены исследовательские испытания экспериментальной партии ММКМ AlSiC.

Основные результаты проекта

Период №3 (1.07.2011г. -31.12.2011 г.)

Объем НИОКТР, выполненных за счет субсидии: 60 млн.руб.

Выполненные работы:

- **Разработан технический проект.**

Проведены исследования влияния технологических параметров получения изделий из MMKM AlSiC на их микроструктуру.

- **Изготовлены макеты изделий из MMKM AlSiC и проведены их испытания.**

- **Разработаны технологические инструкции процессов контроля параметров MMKM AlSiC:**

- 3D измерений геометрических параметров изделий из металломатричного композиционного материала AlSiC;
- измерения параметров структуры MMKM AlSiC методами оптической микроскопии (МКЦС.25207.00016);
- измерения параметров микроструктуры и элементного состава методами сканирующей электронной микроскопии;
- фрактографических измерений на изломах MMKM AlSiC ;
- измерения параметров микроструктуры MMKM AlSiC BET-методом ;
- контроля макро- и микро- (наноразмерной) пористости и удельной поверхности в MMKM AlSiC
- высокоточной механической обработки для придания плоско-выпуклой формы поверхностям изделий из MMKM AlSiC;
- измерения частичного разряда в изделиях из MMKM AlSiC ;
- контроля ультразвуковой сварки изделий из MMKM AlSiC с медными электродами ;
- контроля циклоустойкости изделий из MMKM AlSiC;
- контроля толщины покрытия изделий из MMKM AlSiC ;
- контроля адгезии никелевого покрытия изделий из MMKM AlSiC .

- **Разработан предварительный проект технологического процесса.**

Проведены исследования :

- влияния технологических режимов получения изделий из MMK AlSiC на структуру и элементный состав границ раздела «матрица-наполнитель» методом сканирующей электронной микроскопии;
- зависимости основных теплофизических и механических характеристик, микро-и макропористости от технологических параметров изготовления изделий из MMK AlSiC.

Проведены работы по оптимизации технологий:

- получения пористых заготовок из порошков карбида кремния;
- вакуумно-компрессионной пропитки пористых заготовок;
- нанесения металлического покрытия на изделия из MMK AlSiC.

- **Разработан комплект предварительной технологической документации (ТД) с литерой «П»**

- **Проведены дополнительные патентные исследования.**



Разработка технологии изготовления изделий из ММКМ AlSiC

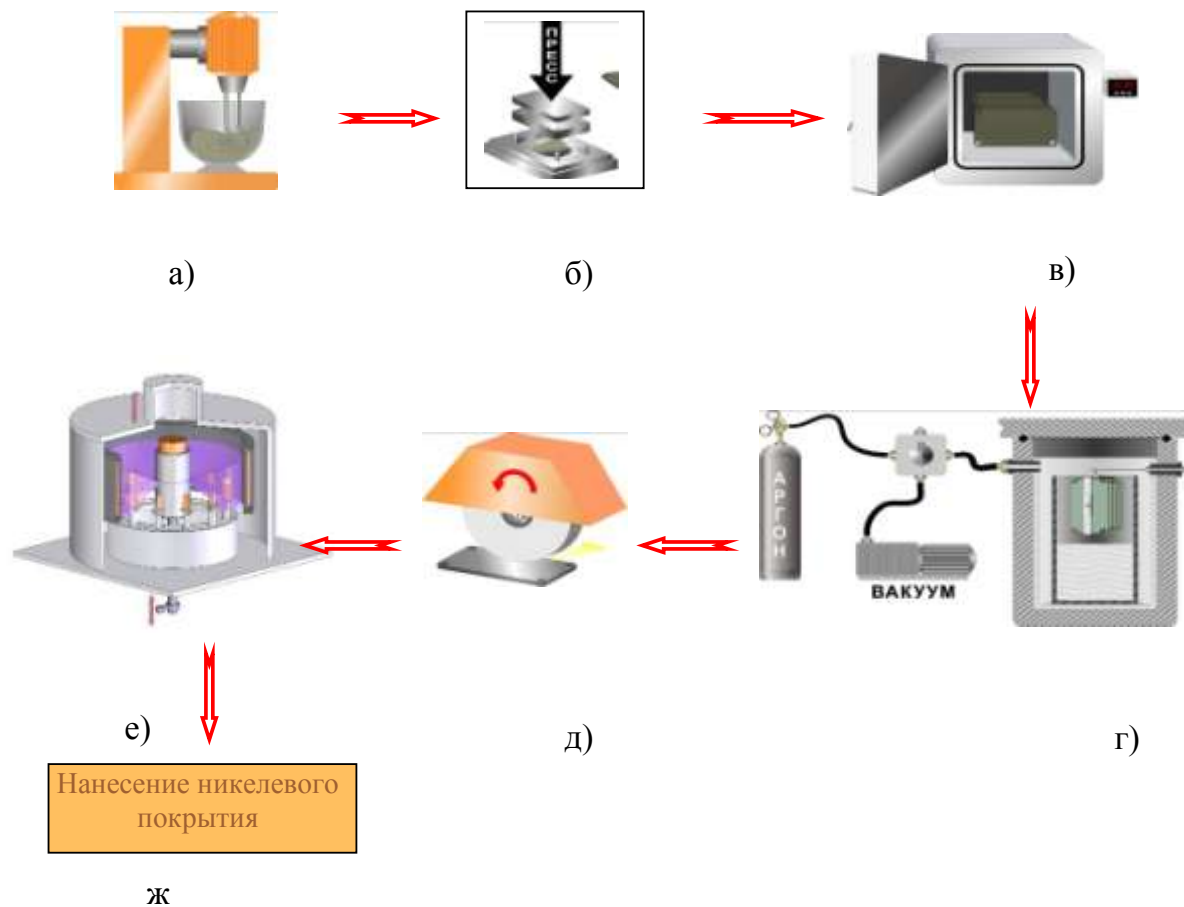


Рис.1. Схема технологического процесса изготовления ММКМ AlSiC

а) подготовка смеси порошков; б) формирование пористой заготовки; в) сушка и обжиг пористой заготовки; г) вакуумно-компрессионная пропитка; д) механическая обработка ММКМ AlSiC; е) нанесение подслоя; ж) электрохимическое никелирование.

Контроль исходных материалов

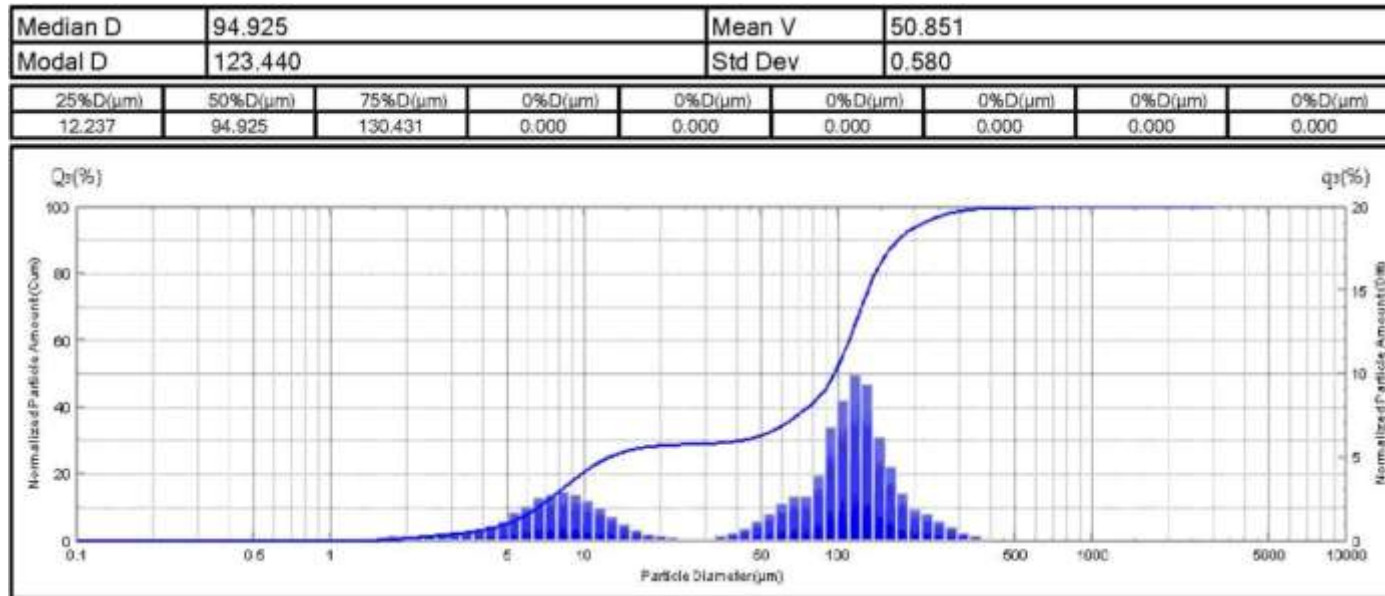


Рис. 2. Гранулометрический состав смеси порошков карбида кремния F150 (70 вес.%) - M10П (30 вес.%) для экспериментальной партии ЭПЗ



Изготовление макетов изделий



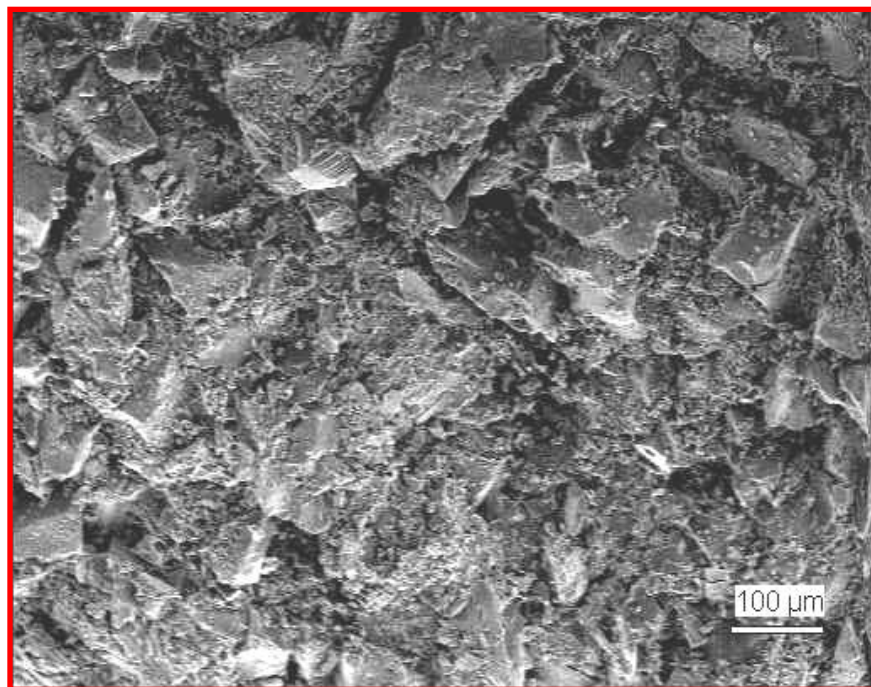
Рис. 2. Внешний вид пористых заготовок



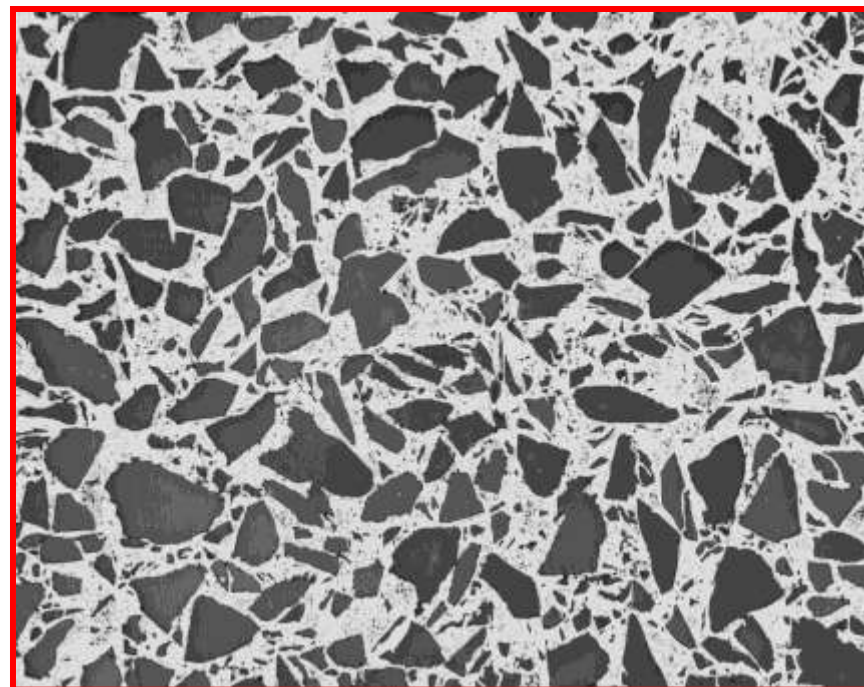
Рис. 3. Внешний вид макетов изделий из ММКМ AlSiC



Структура пористой заготовки и изделия из ММКМ AlSiC



РЭМ x200



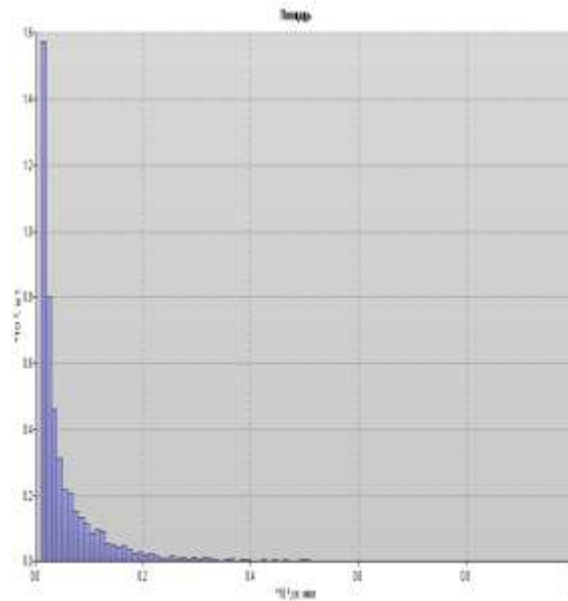
**Оптика
x100**



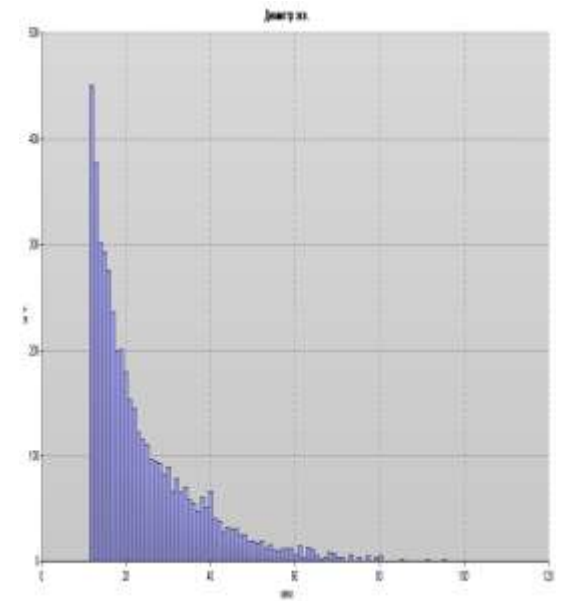
Исследование структуры шлифов ММКМ AlSiC



А



Б



В

Рис. 4. Параметры структуры шлифа макета изделия из ММКМ AlSiC на основе Al и порошка F220: А) Оптическое изображение шлифа; Б) Распределение по площади зерен; В) Распределение зерен по диаметрам. Среднее значение размера зерна – 24 мкм. Среднее значение площади зерна – 599 мкм²



Исследование микроструктуры макетов изделий из ММКМ AlSiC методами электронной микроскопии

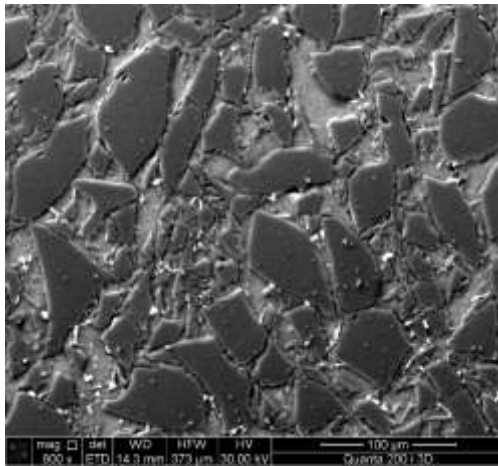


Рис.5. Микроструктура поверхности шлифа ММКМ AlSiC. Матрица: АК5+Al , наполнитель – SiC F220.

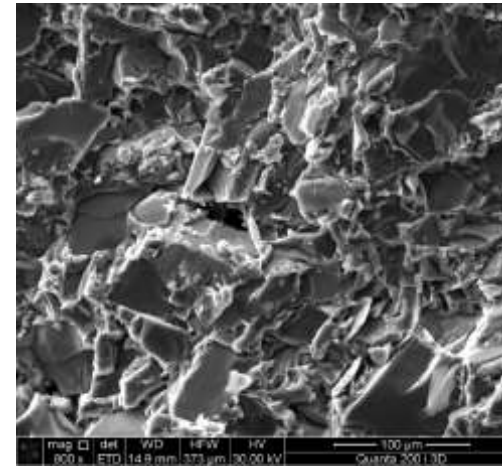


Рис. 6. Микроструктура излома ММКМ AlSiC. Матрица: АК5+Al, наполнитель – SiC F220.



Исследование элементного состава макетов изделий из ММКМ AlSiC

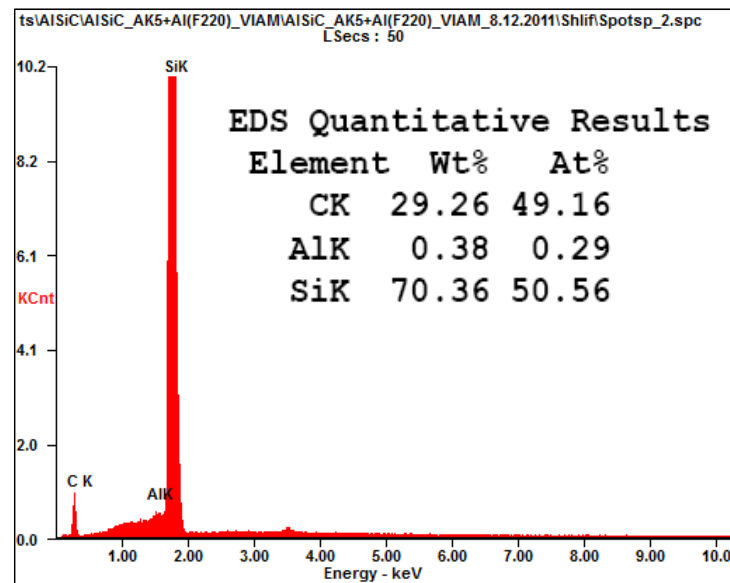
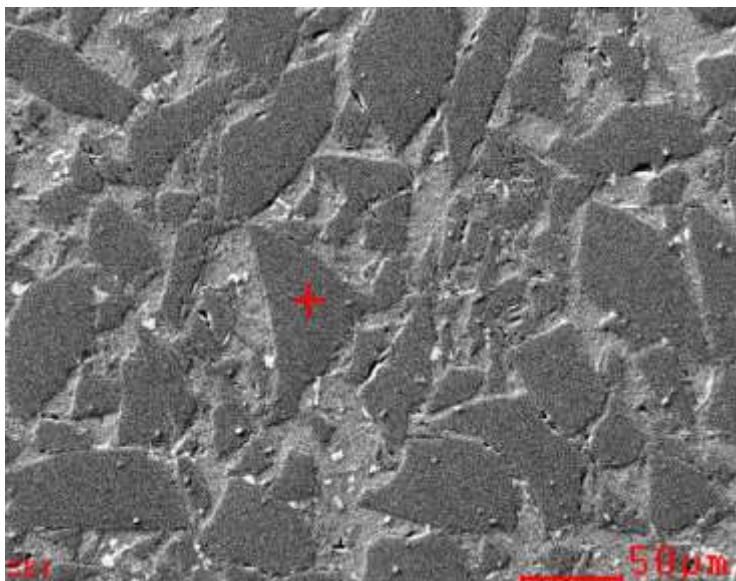
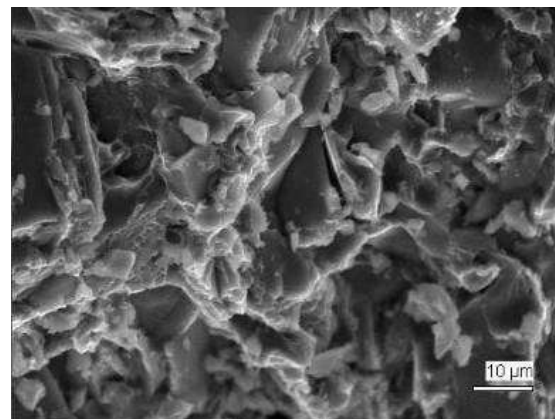
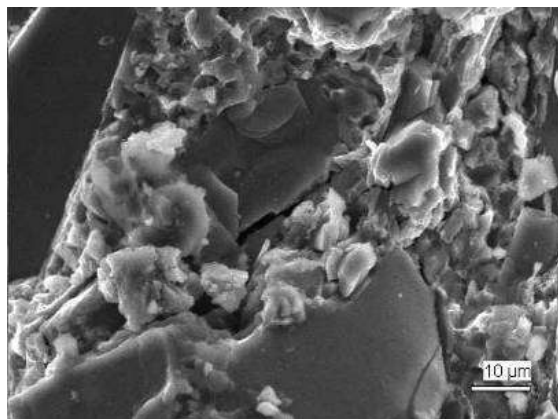
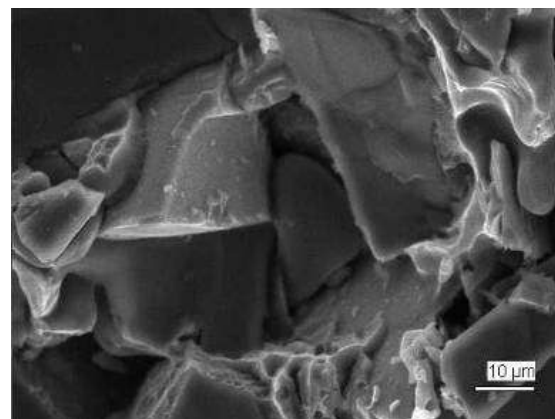
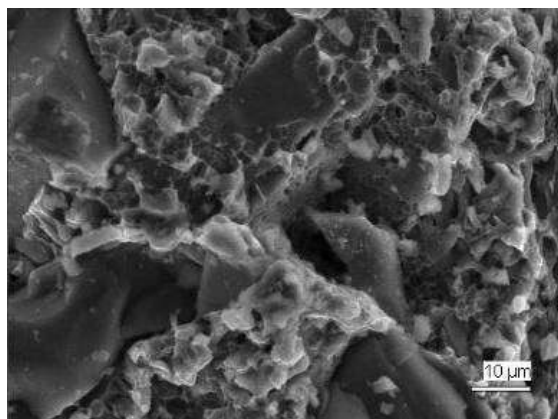


Рис. 7. Элементный состав ММКМ AlSiC в выбранной локальной области.
Матрица: AK5+Al, наполнитель – SiC. F 220.



Исследование микроструктуры макетов изделий из ММКМ AlSiC методами электронной микроскопии



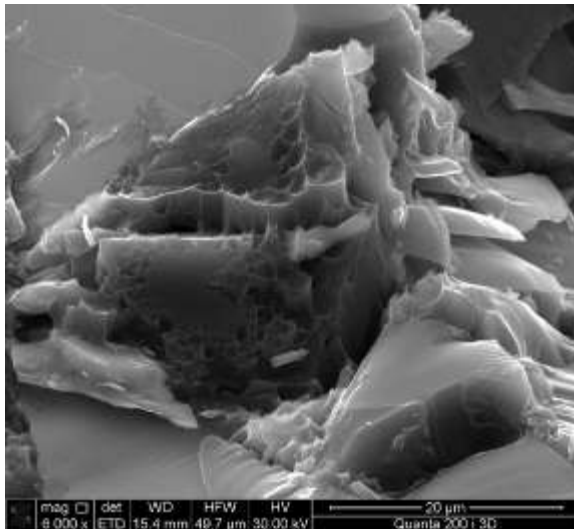
Наполнитель F150 (70% вес.)–M10П (30% вес.)

Наполнитель F220

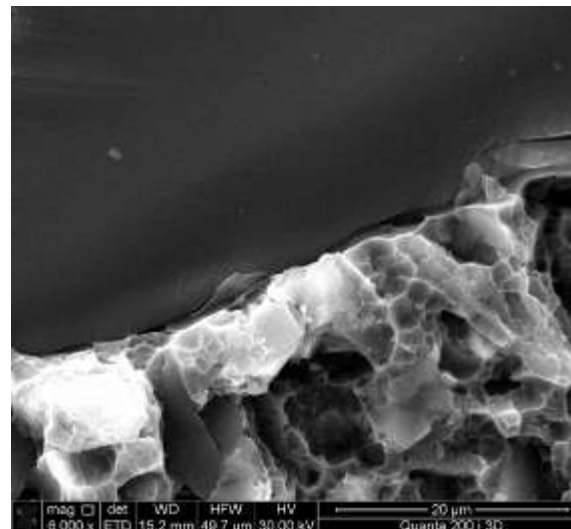
Рис. 8. РЭМ-изображения изломов макетов изделий



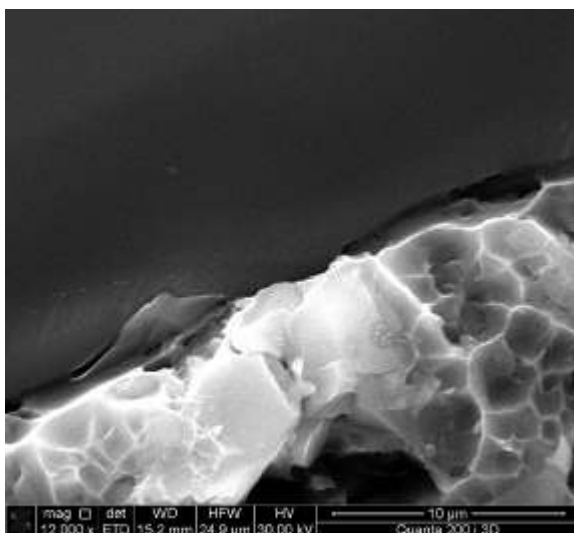
Исследование границ раздела «матрица-наполнитель» методами электронной микроскопии



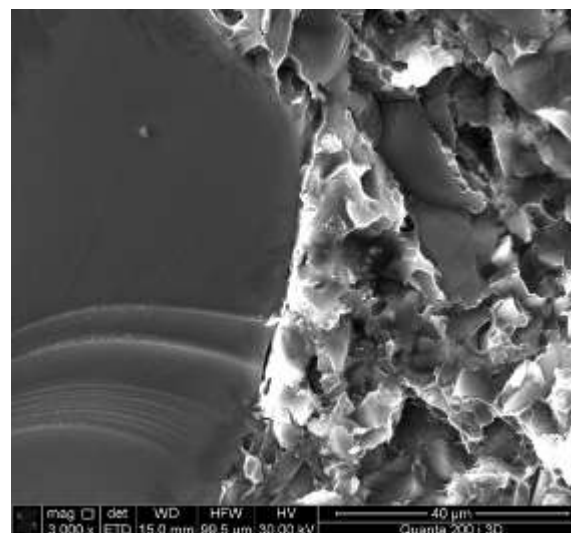
AK12+ SiC F220. 6000x



AK5+Al+ SiC F220. 6000x



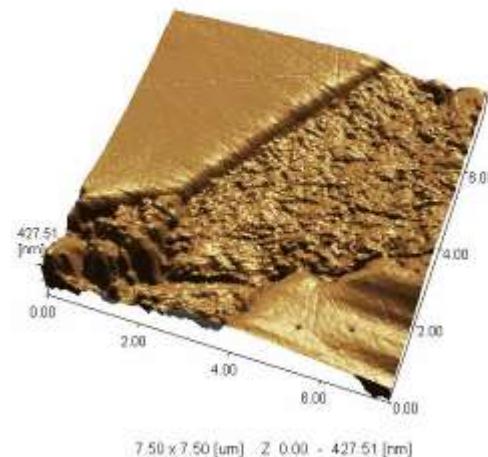
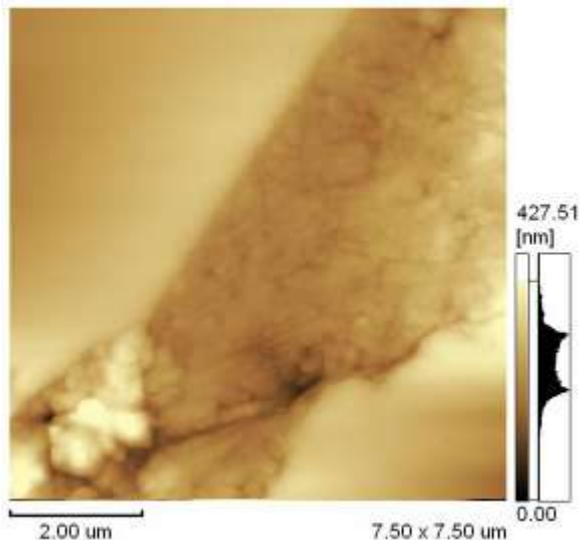
AK5+Al + SiC F150 x12000



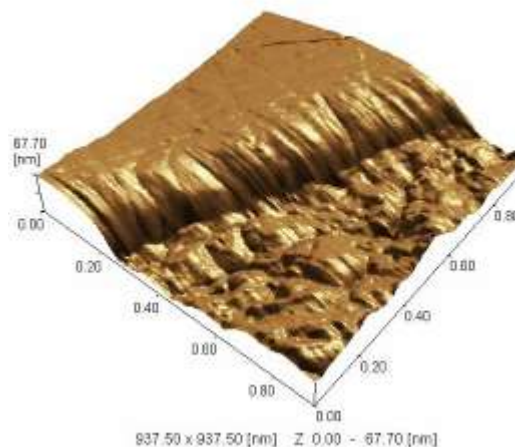
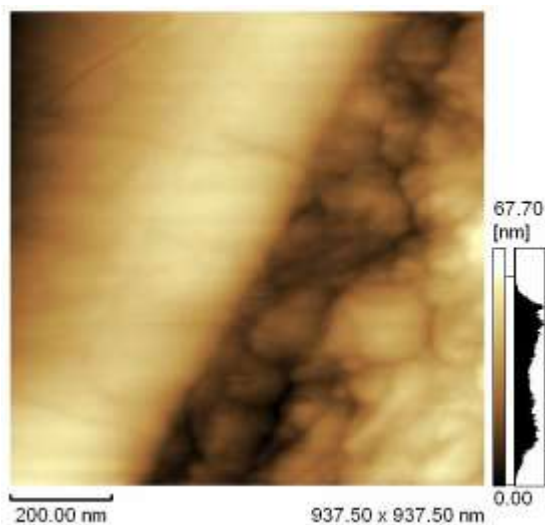
AK7 + SiC F150. 3000 x.



Исследование границ раздела «матрица-наполнитель» методами сканирующей зондовой микроскопии



СЗМ-изображения границ раздела «матрица-наполнитель» ММКМ на основе АК5+Al



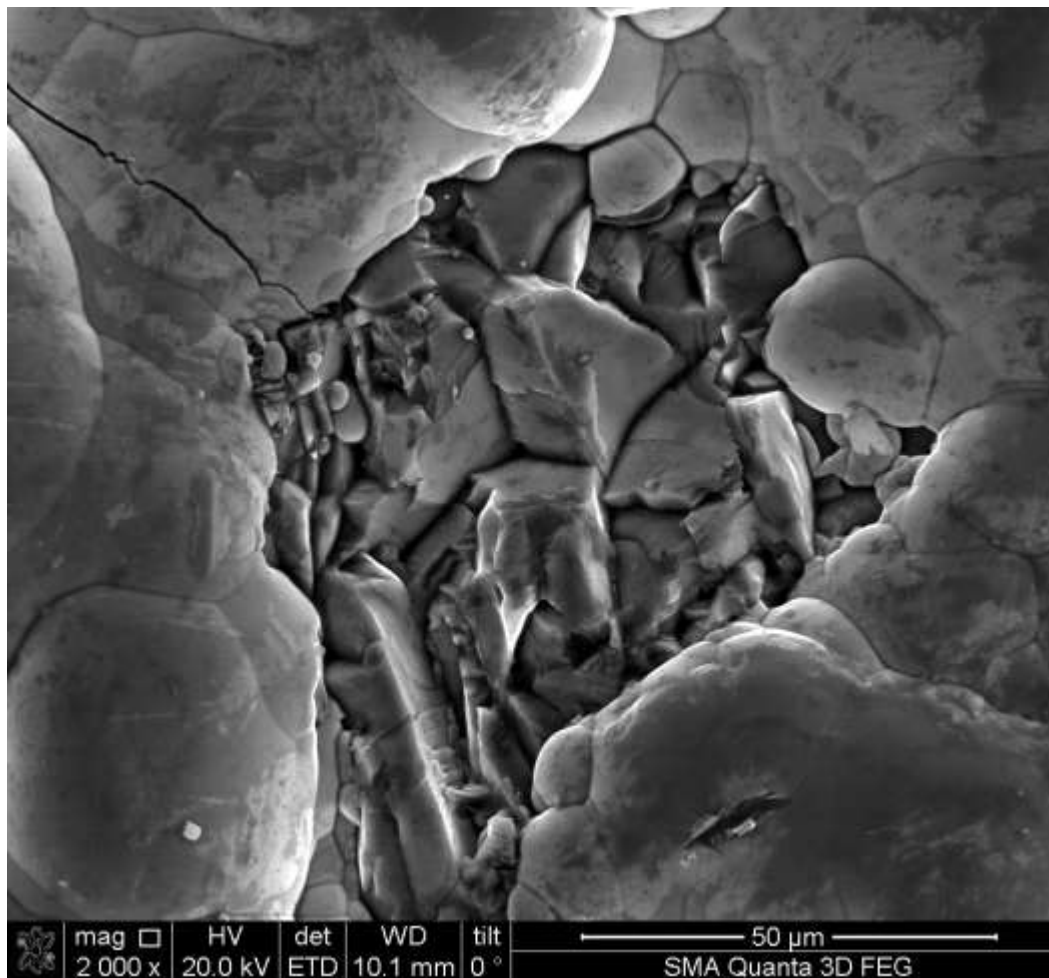


Соответствие достигнутых параметров и характеристик макетов изделий из ММКМ AlSiC установленным техническим требованиям

Наименование показателя	Требования ТЗ	Метод анализа	Результаты испытаний
Объемное содержание, % Матричный сплав SiC	от 23 до 31 от 69 до 77	Весовой метод ГОСТ 18898-89	27,7 72,3
КТР·10 ⁻⁶ , град ⁻¹	от 5.0 до 7.0	Метод дилатометрии ГОСТ 24409-80	6,48
Плотность, г/см ³	от 2.8 до 3.2	Метод по ГОСТ 20018-74	2,99
Удельная теплоемкость при температуре +20 С, Дж/(кг·град.)	от 0.70 до 0.80	Метод дифференциальной калориметрии ГОСТ 23630.1	0,724
Теплопроводность при температуре +20 С, т/(м·град.)	от 180 до 200	Импульсный метод лазерной вспышки СТП 1-595-4-234-88	169
Модуль упругости, не менее, ГПа	не менее 220	Метод испытания на растяжение ГОСТ 25.601-80	234
Прочность при изгибе, МПа	от 300 до 370	Метод 3-х точечного изгиба ГОСТ 25.604-82	314
Прочность на растяжение, МПа	от 125 до 225	Метод испытания на растяжение ГОСТ 25.601-80	137



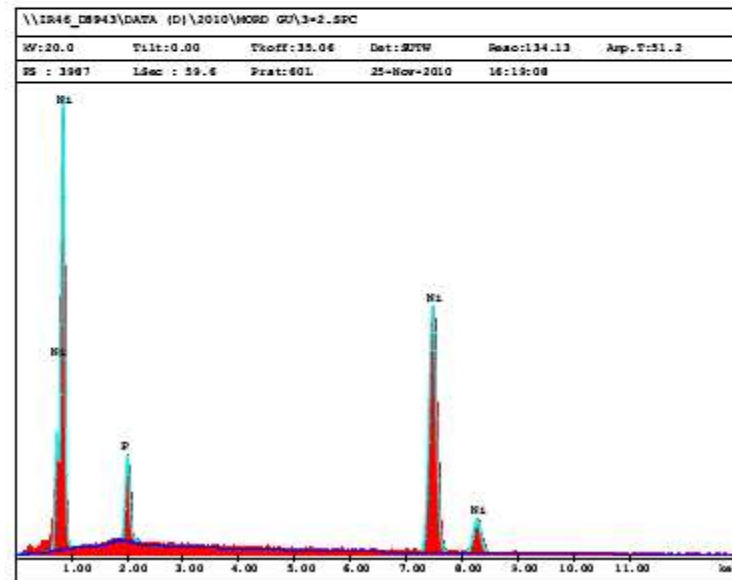
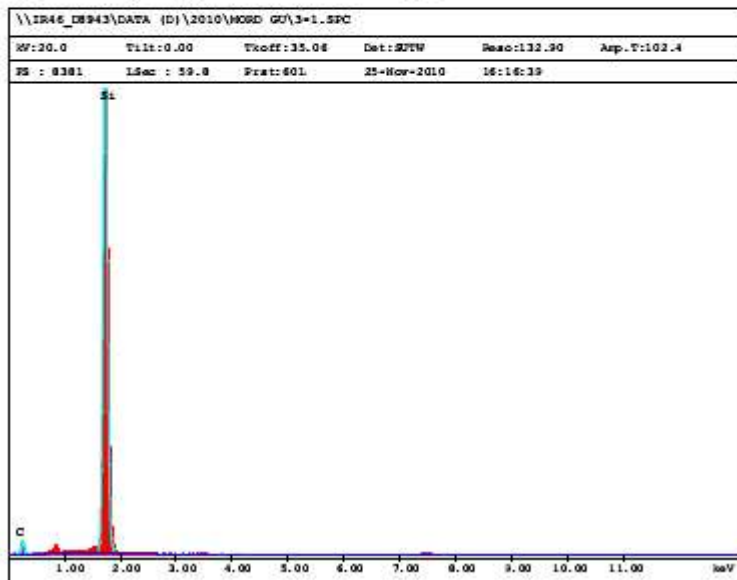
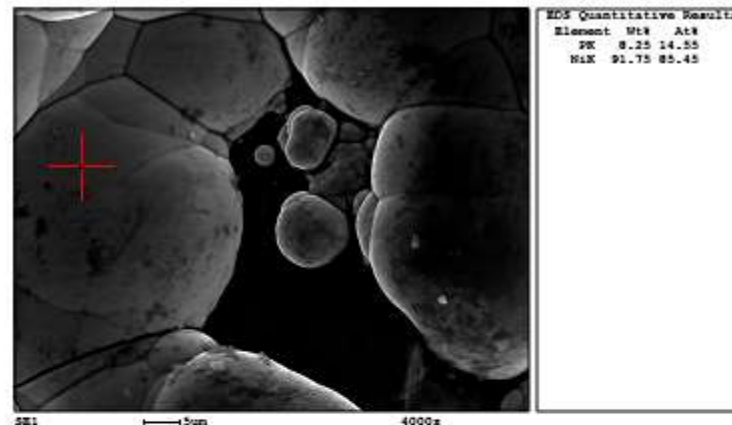
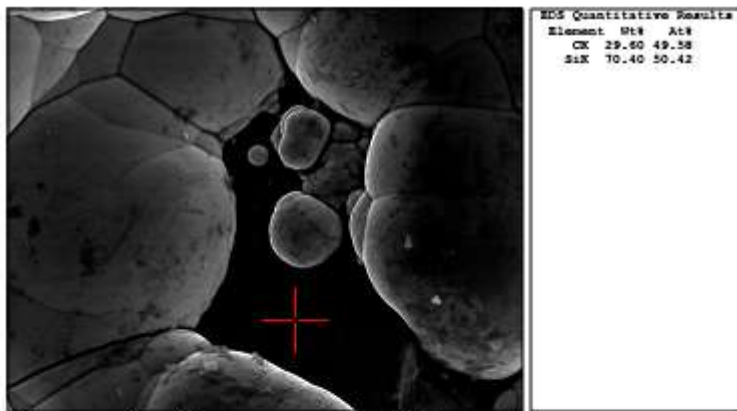
Проблема: качество покрытия



ЭМ изображение участка поверхности покрытия изделия №3 с нарушением его сплошности (2 000x) (МГУ им.Н.П.Огарева)



Проблема: качество покрытия

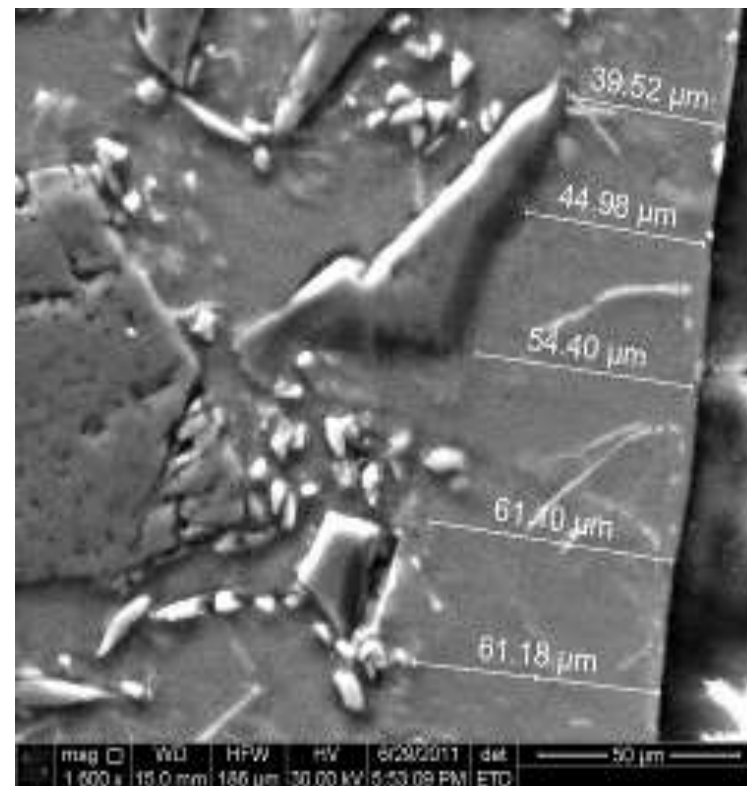
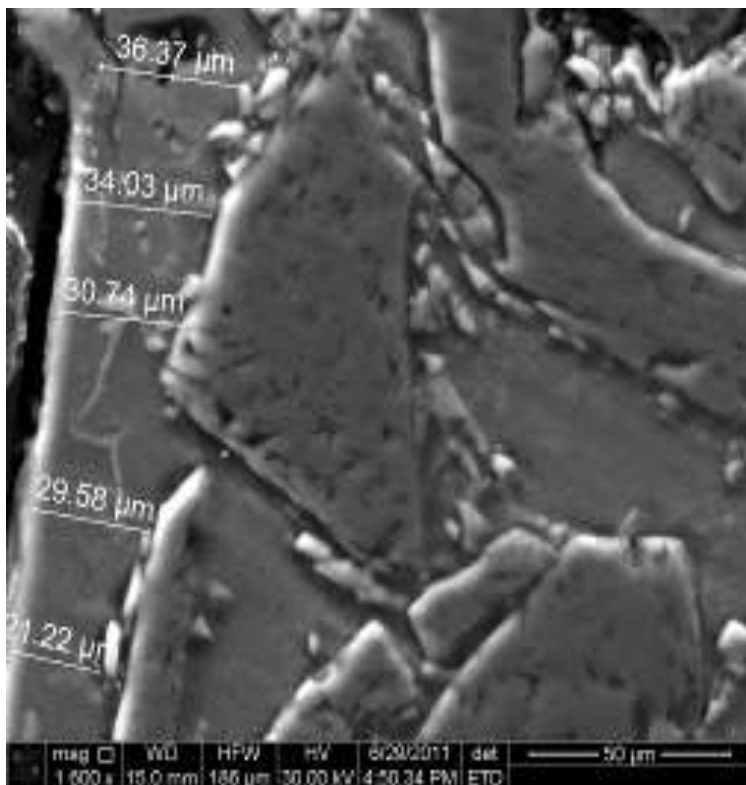


РЭМ изображения поверхности никелевого покрытия изделия №3
и элементный состав выделенных локальных областей



Формирование алюминиевого подслоя

Цель - создание условий для нанесения качественного паяемого покрытия

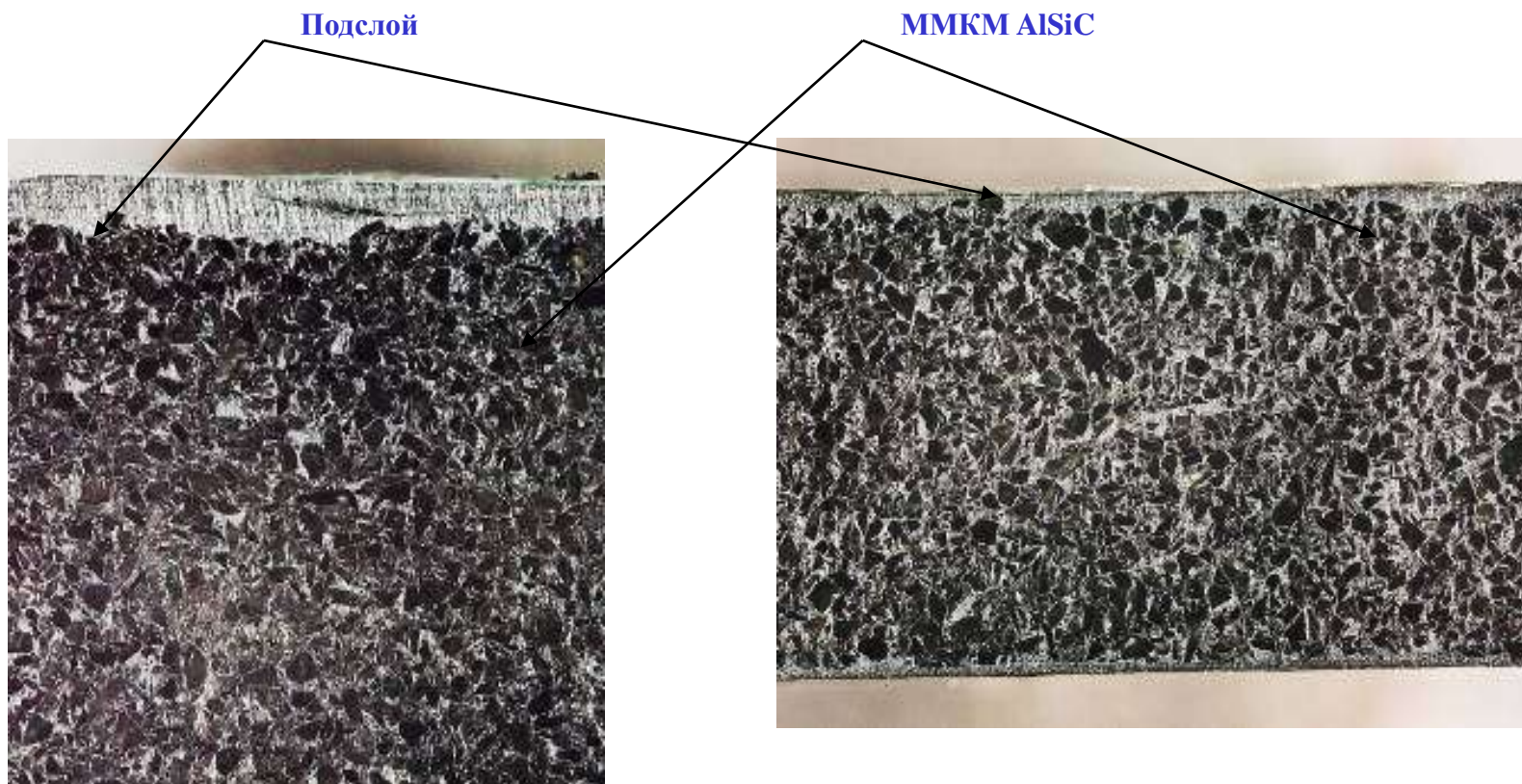


Микроструктура торца образца Y4 с подслоем из алюминиевого сплава (1600x) (МГУ им.Н.П.Огарева)



Формирование алюминиевого подслоя

Цель - создание условий для нанесения качественного паяемого покрытия



Микроструктура MMKM AlSiC с подслоем из алюминиевого сплава до (а) и после (б) выравнивания поверхности (ФГУП ВИАМ)

Рынок

В России потребность в изделиях из ММКМ AlSiC - **15 – 20 тыс. шт. в год (200 млн. руб.)**.

Планируется занятие до **70 %** доли российского рынка , а также расширение рынков сбыта изделий из ММКМ AlSiC за счет поставок **в зарубежные страны**.

К 2017 году производство изделий из ММК AlSiC планируется довести до **35 000 штук (600 млн. руб.) в год**.

Сравнительные стоимостные характеристики материалов:

Микрошлифпорошки карбида кремния зеленого 64С-63С –

Ф 120-100 : 50 руб. за 1 кг (в изделии 90 вес %)

М14-10: 115 руб. за 1 кг (в изделии 10 вес %)

Медь: 260 руб. за 1 кг

Плотность меди: 8,9 г/см³

Плотность AlSiC: 3 г/см³

Объем 1 изделия 2 типа :18,4 см³

Масса 1 изделия (типоразмер 2):

Медь: 163,8 г

Алсик:55,2 г

Масса 1000 изделий :

Медь:163,8 кг ,затраты на материал: 42590 руб.

Алсик: 55,2 кг, затраты на материалы:3120 руб

Выигрыш в стоимости материалов: в 8 раз!!



Список публикаций по проекту:

1. Е.Н. Каблов, Б.В. Щетанов, А.А. Шавнев, А.Н. Няфкин, В.В. Чибиркин, В.А. Мартыненко, В.Г. Мускатыньев, Л.А. Эмих, С.М. Вдовин, К.Н. Нищев. Повышение надежности силовых IGBT-модулей с помощью высоконаполненного МКМ системы Al-SiC. АВИАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ. №4,2010.С. 3-6.
2. Е.Н. Каблов, Б.В. Щетанов, А.А. Шавнев, А.Н. Няфкин, В.В. Чибиркин, В.А. Мартыненко, В.Г. Мускатыньев, Л.А. Эмих, С.М. Вдовин, К.Н. Нищев. Повышение надежности силовых IGBT-модулей с помощью высоконаполненного МКМ системы Al-SiC. Свойства и применение высоконаполненного металломатричного композиционного материала Al-SiC. ФИЗИКА И ХИМИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (электронное научное периодическое издание, № гос. регистрации в Государственном регистре баз данных НТЦ "Информрегистр": 0420800073). №2(8),2010.
3. Е.Н. Каблов, Б.В. Щетанов, А.А. Шавнев, А.Н. Няфкин, В.В. Чибиркин, В.А. Мартыненко, В.Г. Мускатыньев, Л.А. Эмих, С.М. Вдовин, К.Н. Нищев. СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОНАПОЛНЕННОГО МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Al-SiC. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ. №3(105),2011.С. 5-4.
4. Е.Н. Каблов, Б.В. Щетанов, А.А. Шавнев, А.Н. Няфкин, В.В. Чибиркин, В.А. Мартыненко, В.Г. Мускатыньев, Л.А. Эмих, С.М. Вдовин, К.Н. Нищев. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ IGBT-МОДУЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА AlSiC. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ. №2(14),2011. С.49-52.
5. Нищев К.Н., Кяшкин В.М., Новопольцев М.И. Исследование структуры и фазового состава Al-SiC методами рентгеноструктурного анализа. ФИЗИКА И ХИМИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (электронное научное периодическое издание, № гос. регистрации в Государственном регистре баз данных НТЦ "Информрегистр": 0420800073. №2(10),2011.С. 1-7.
6. Ускова Е.Н., Окина Е.В., Нищев К.Н., Вовод Ю.В. Использование нековалентно модифицированных сорбентов для определения микроконцентраций меди в ММКМ AlSiC. ФИЗИКА И ХИМИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (электронное научное периодическое издание, № гос. регистрации в Государственном регистре баз данных НТЦ "Информрегистр": 0420800073. №1(9),2011.С. 1-10.
7. К.Н. Нищев, Елисеев В.В., Щетанов Б.В., Л.А. Эмих, Новопольцев М.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Фомин Н.Е., Юдин В.А. Применение металломатричного композиционного материала Al – SiC для теплоотводящих оснований приборов силовой электроники. Все материалы (энциклопедический справочник). №1,2012.
8. К.Н. Нищев, Елисеев В.В., Щетанов Б.В., Л.А. Эмих, М.И. Новопольцев, Фомин Н.Е., Юдин В.А. Исследование физических свойств металломатричного композиционного материала AlSiC. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. №4(20),2011.С. С.88-95.

Патенты:

1. Каблов Е.Н., Чибиркин В.В., Вдовин С.М., Гращенко Д.В., Щетанов Б.В., Прокофьев С.А., Мускатиньев В.Г., Нищев К.Н. **Устройство для получения изделия из металломатричного композиционного материала.** Патент на полезную модель № 110310, 20.11.2011.
2. Нищев К.Н., Каликанов В.М., Фомин Ю.А., Юдин В.А. **Устройство для определения теплопроводности теплопроводящего основания полупроводникового силового прибора.** Патент на полезную модель № 110190, 10.11.2011.
3. Е.Н. Каблов, В.В. Чибиркин, С.М. Вдовин, Б.В. Щетанов, А.А. Шавнев, С.А. Прокофьев, А.Н. Няфкин, Б.В. Пряжников. **Способ получения изделия из композиционного материала.** Патент на изобретение. №2448808. Опубл. 27.04.2012. Бюл. №12.