



# ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Институт структурной макрокинетики  
и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова

# ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Многолетний опыт ведения фундаментальных и прикладных исследований



## Научные сотрудники

<b>Сычёв А. Е.</b>	к.т.н., в.н.с., зав. лаб.
<b>Бусурина М. Л.</b>	к.т.н., научный сотрудник
<b>Боярченко О. Д.</b>	к.ф.-м.н., научный сотрудник
<b>Карпов А. В.</b>	научный сотрудник
<b>Лазарев П. А.</b>	к.т.н., младший научный сотрудник
<b>Сивакова А. О.</b>	младший научный сотрудник, аспирант
<b>Белоусова О. В.</b>	инженер-исследователь

## Инженерно-технические специалисты

**Мухина Н. И.**, инженер  
**Качурина С. И.**, техник



## Публикации

5

патентов РФ

300+

публикаций в реферируемых научных изданиях

# Оборудование лаборатории

Оборудование  
для синтеза

- Экспериментальная установка для проведения СВС-экспериментов в трубчатой печи с программируемым нагревом
- Экспериментальные СВС-реакторы для синтеза материалов в среде аргона и в вакууме

Оптический  
анализ

- Инвертированный универсальный металлографический микроскоп Axiovert 200 MAT/M
- Оптический микроскоп МБС-10
- Лазерный анализатор размера частиц Микросайзер-201С

Элементно-  
структурный  
анализ

- Сканирующий электронный микроскоп LEO
- Сканирующий электронный микроскоп сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus
- Время-пролетный масспектрометр TOF-SIMS 5 фирмы ION-TOF GmbH (Germany)
- Рентгеновский микроанализатор JXA-733 «Superprobe», JEOL

Анализ электро-  
физических  
свойств

- Стенд для измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь
- Экспериментальный стенд для измерения электросопротивления в широком диапазоне температур

Исследование  
механических  
свойств

- Универсальная испытательная машина Instron 1195, Instron Ltd., Великобритания
- Универсальный твердомер ИТ 5010-01, предназначенный для измерения твердости металлов и сплавов по методам Виккерса и Бринелля с электронной отсчетной системой

## ГРАДИЕНТНЫЕ И СЛОЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ:

интерметаллид/Me/SiC (защитные покрытия)

## СПЛАВЫ Ti-Al-Me (Me= Fe, Ti, Co, Cu, Mn, Si, Mg)

(сплавы Гейслера, лигатуры, мишени для напыления, термоэлектрические, слабомагнитные сплавы)

## СВС-СВАРКА ИНТЕРМЕТАЛЛИД/Me

Нанесение защитных интерметаллидных покрытий TiAl/NiAl на подложки из тугоплавких металлов Ta, W, Mo, Ti, Nb, Co

## СПЛАВЫ Ni-Al-Me (Me= Fe, Ti, Co, Cu)

СВС сплавов на основе систем Ni-Al-Me (Me=Ti, Co, Cu, Mn)

## СВС МАХ-фаз

$Ti_3SiC_2$ ,  $(Zr_{0.5}Ti_{0.5})_3AlC_2$ ,  $Ti_2AlC$ ,  $Ti_3AlC_2$ ,  $Ti_2AlN$ ,  $V_2AlC$ ,  $(VCr)_2AlC$

# Наши исследования

## ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

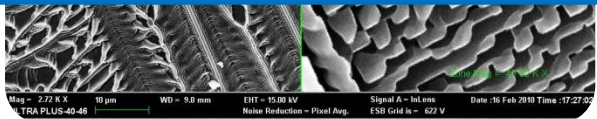
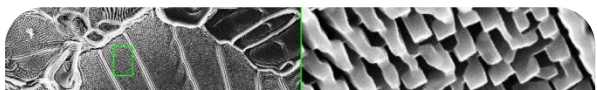
SEM, TOF-SIMS, дисперсность, диэлектрические свойства, прочность, электросопротивление, термо-ЭДС, микротвердость, плотность, пористость

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Расчет адиабатических температур синтеза бинарных систем (лабораторная программа ATC) ...

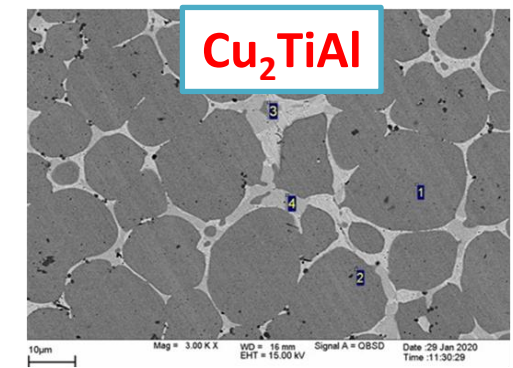
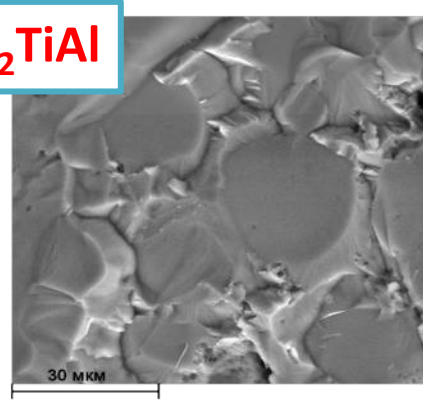
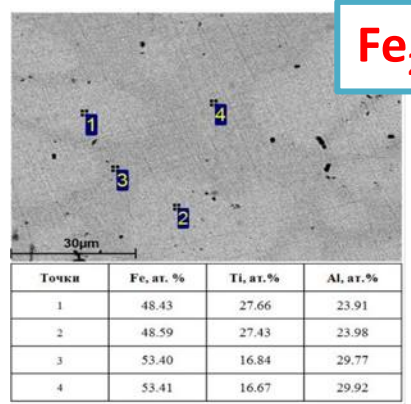
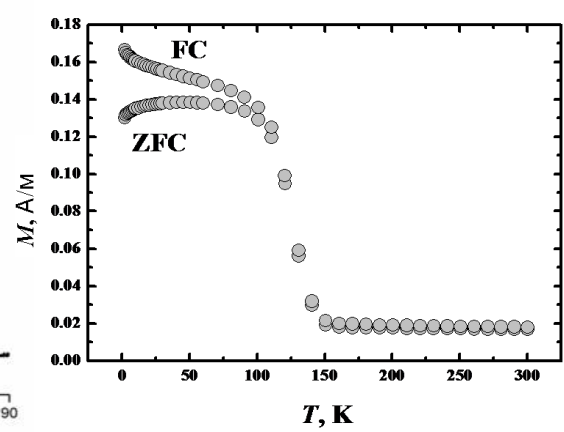
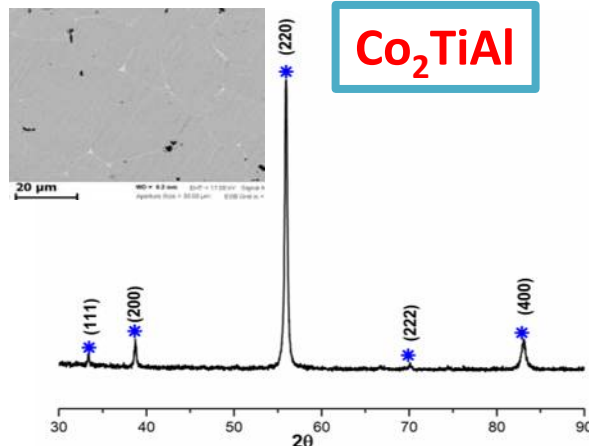
## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УГЛЕРОДА С МЕТАЛЛАМИ И ИНТЕРМЕТАЛЛИДАМИ

Интерметаллиды (TiAl, NiAl,  $Fe_3Al$ , CuAg) и металлы (Fe, Ni, Cu, Ti, Co, Al) ...

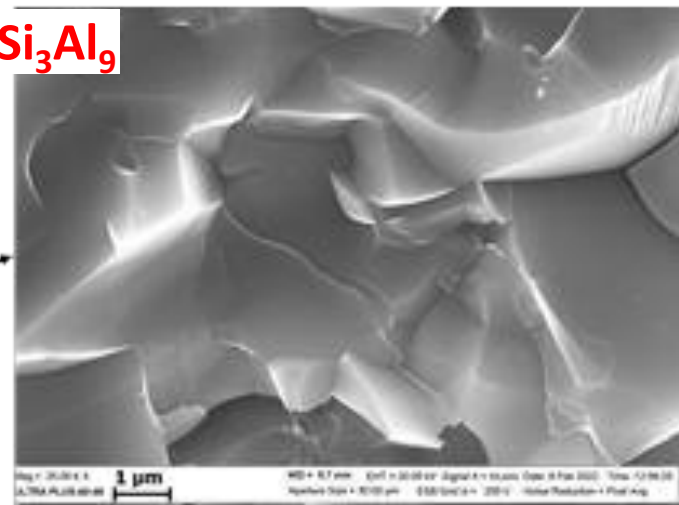
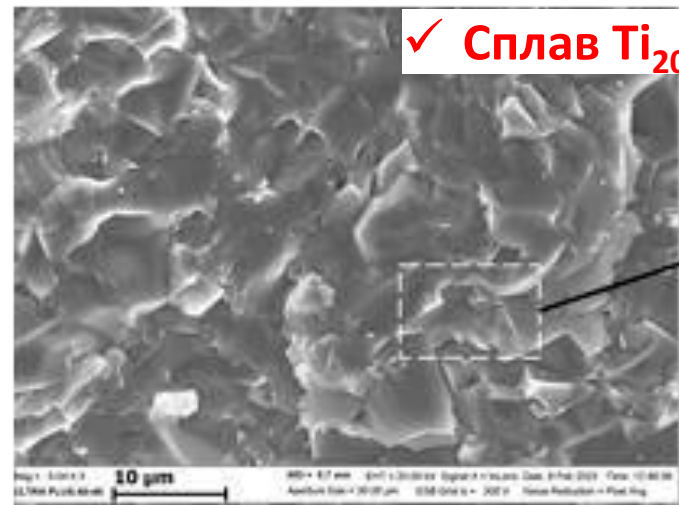


# СВС-сплавы на основе системы Ti-Al-Me (Me=Fe, Co, Cu, Si, Mn)

✓ Впервые синтезированы методом СВС **сплавы Гейслера**, общей формулы **Me<sub>2</sub>TiAl** могут быть использованы в качестве лигатур, мишеней для распыления и нанесения пленок и покрытий

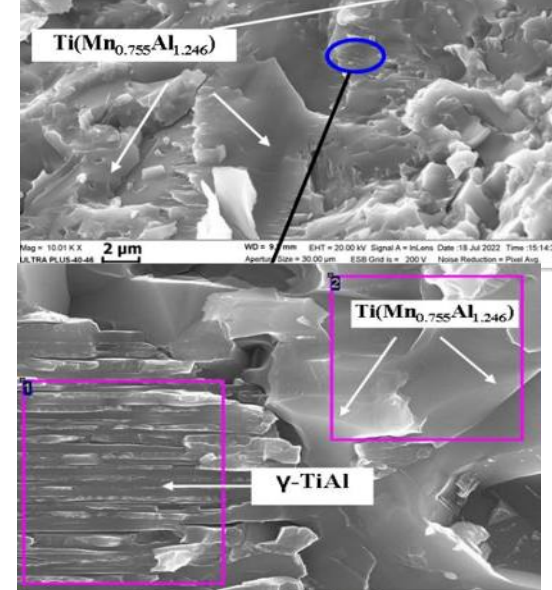


точки	Cu, ат. %	Ti, ат. %	Al, ат. %
1	49,86	29,31	20,83
2	49,71	28,52	21,77
3	74,97	25,00	23,75
4	71,50	4,95	23,55



Сплав **Ti(Mn<sub>0.755</sub>Al<sub>1.246</sub>)**

с низким температур. коэф-том электросопротивления (ТКС)

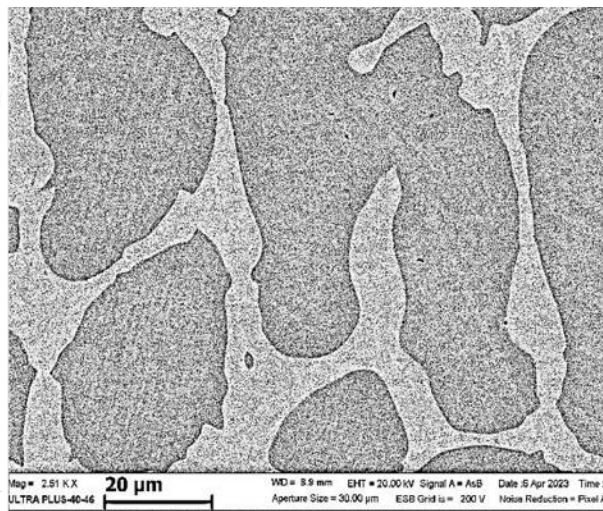
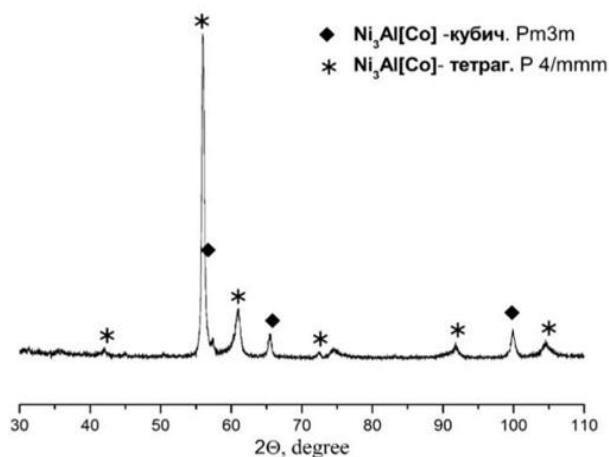


Сплав	ρ, (Ом·м)	ТКС, К <sup>-1</sup>
TiMn <sub>0.755</sub> Al <sub>1.246</sub>	69,0 × 10 <sup>-7</sup>	0,236 · 10 <sup>-4</sup> (400÷1100 К)
TiMn <sub>0.755</sub> Al <sub>1.246</sub>	69,0 × 10 <sup>-7</sup>	1,150 · 10 <sup>-4</sup> (80÷400 К)
Нихром	10,0 × 10 <sup>-7</sup>	4,0 · 10 <sup>-4</sup>
Константан	4,90 × 10 <sup>-7</sup>	0,08 · 10 <sup>-4</sup>
Манганин	4,82 × 10 <sup>-7</sup>	0,02 · 10 <sup>-4</sup>

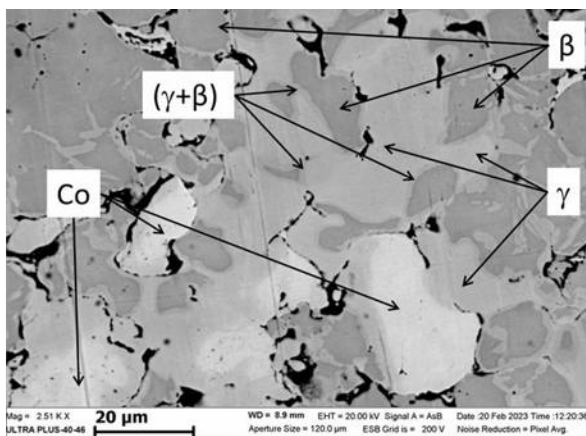
Сплав демонстрирует высокую **пластичность**, обладает хорошими механическими свойствами  $K_{Ic}=5,1\div5,7$  МПа·м<sup>1/2</sup> и  $HV_{\text{Восс.}}=8150\pm2420$  МПа, перспективен в качестве конструкционного материала

# СВС-сплавы на основе системы Ni-Al-Me (Me=Co, Mn)

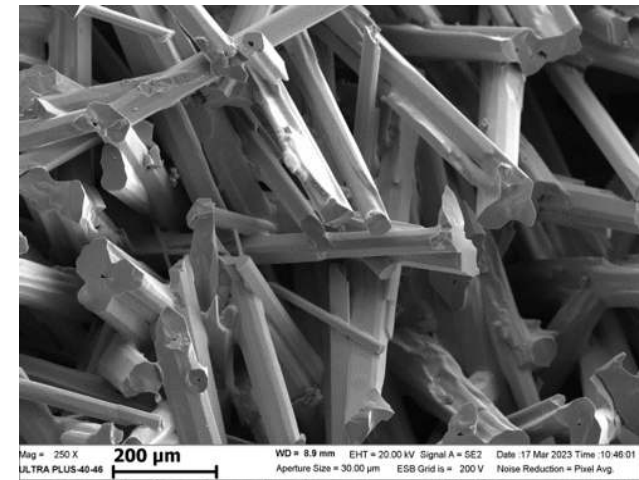
Формирование **мартенситной фазы** в сплаве на основе **Ni<sub>3</sub>Al[Co]** в процессе СВС



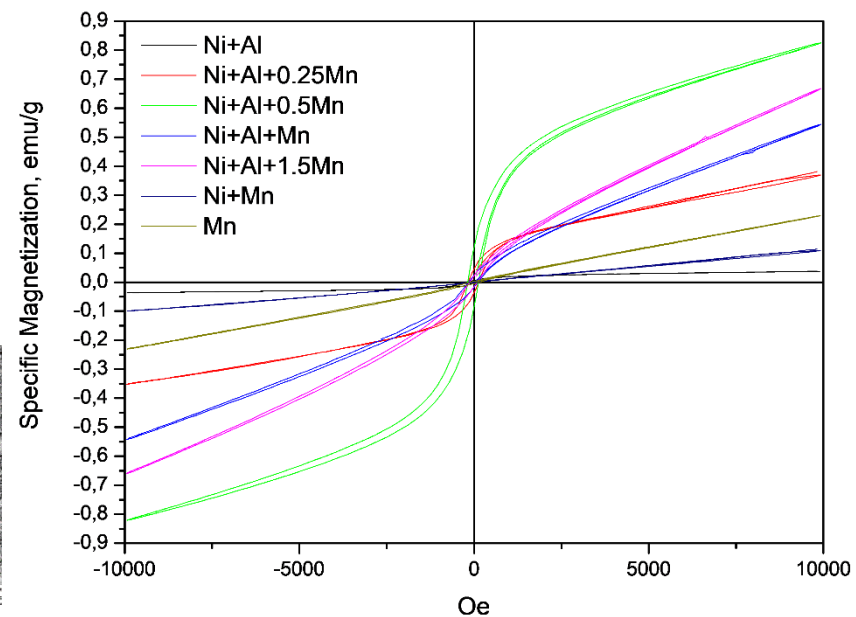
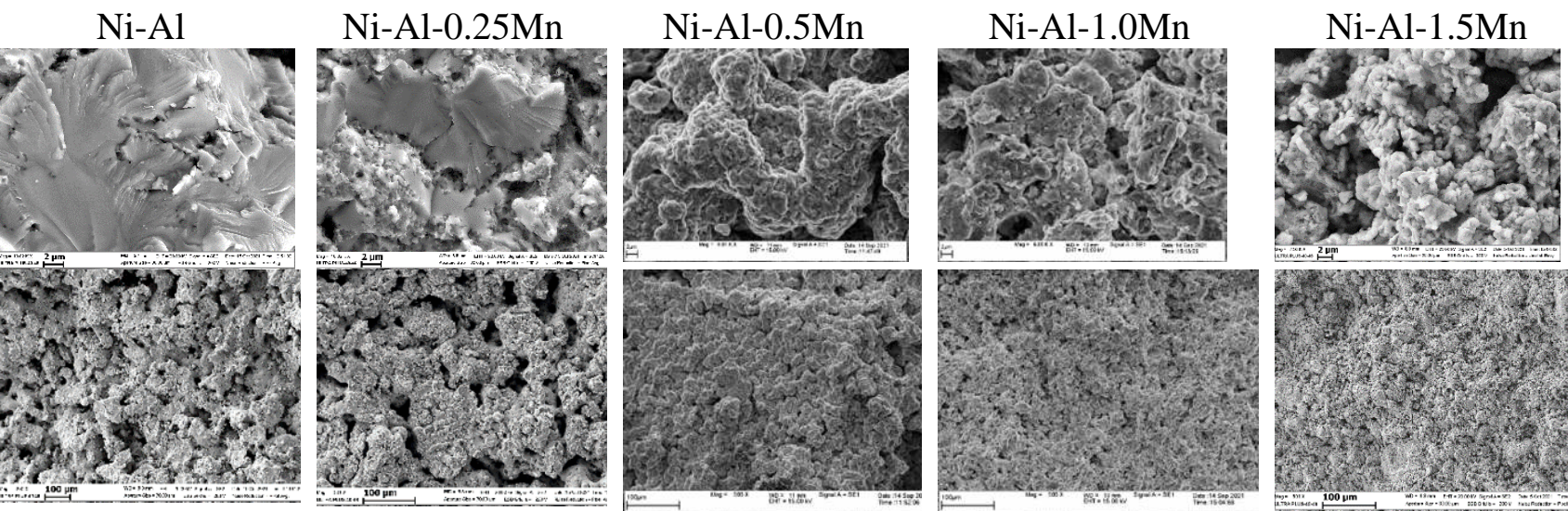
Двухфазный сплав на основе 45 Ni- 14 Al- 41 масс.% Co



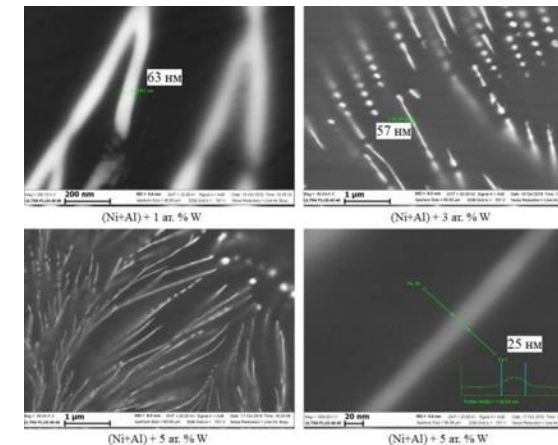
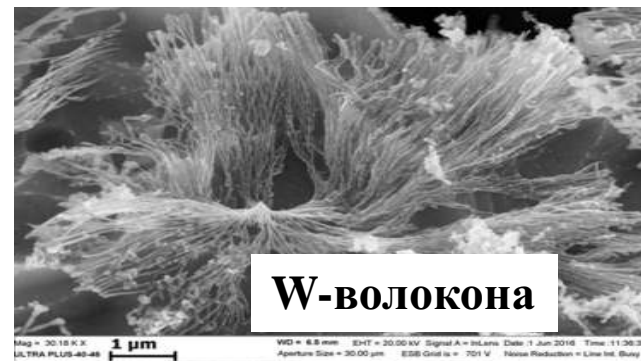
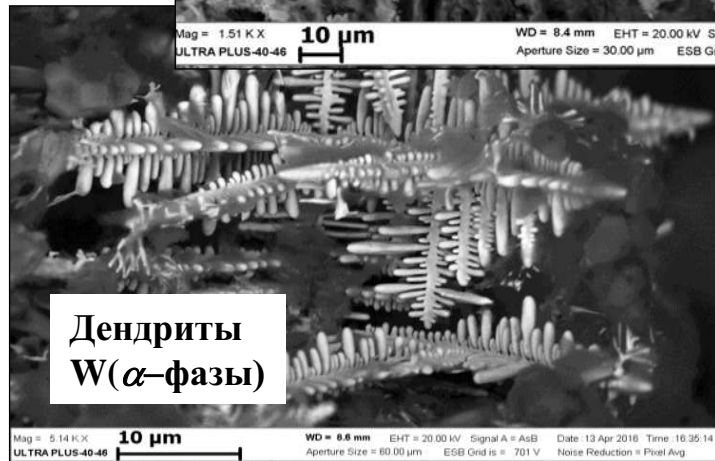
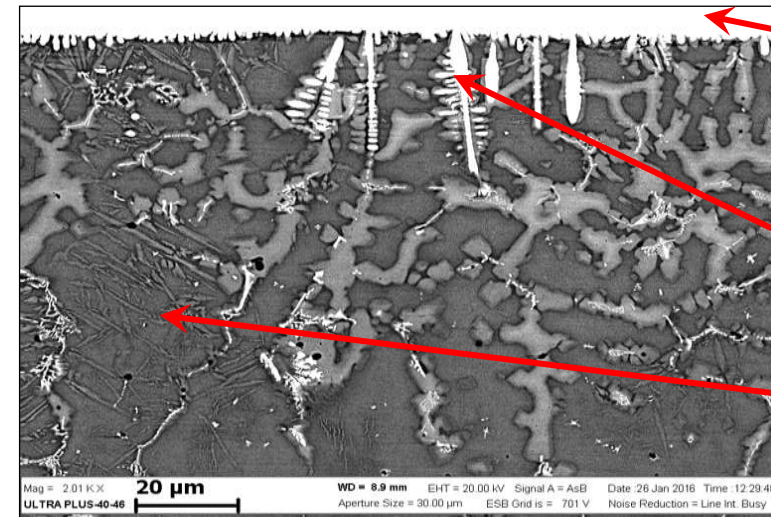
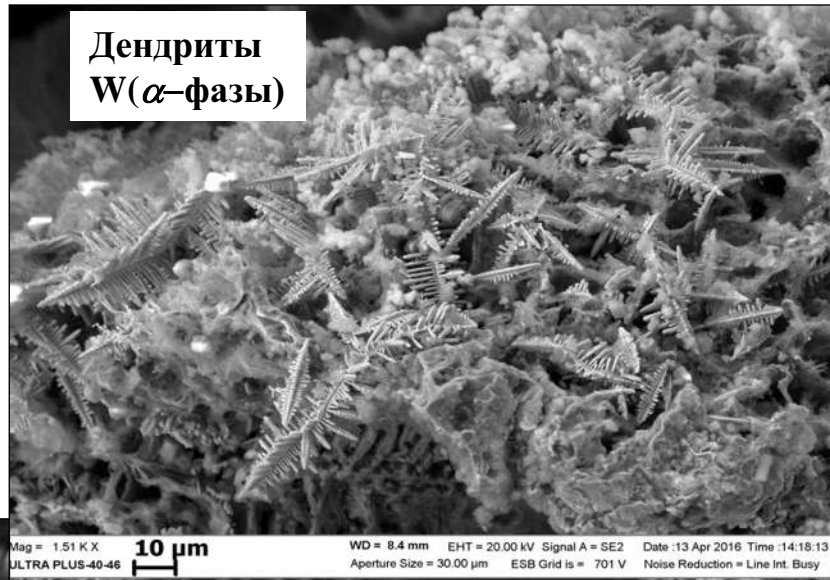
Квазикристаллы Al<sub>70</sub>Co<sub>15</sub>Ni<sub>15</sub>, синтезированные методом СВС



Слабomagнитный сплав на основе **NiAl-Mn** с различным содержанием Mn



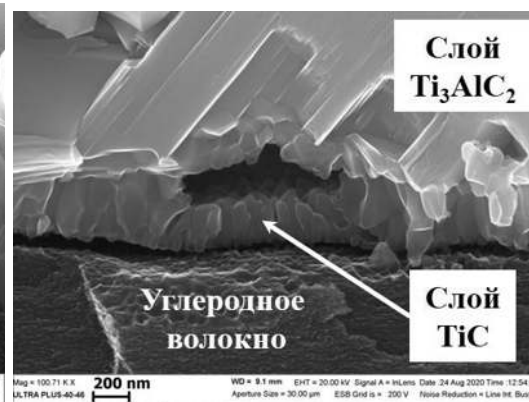
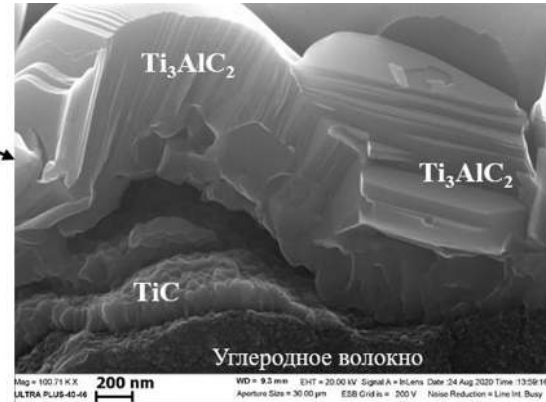
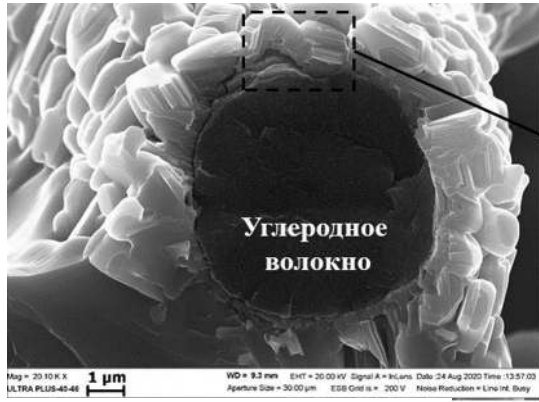
# Образование наноразмерных структур при взаимодействии системы Ni-Al с W в процессе СВС



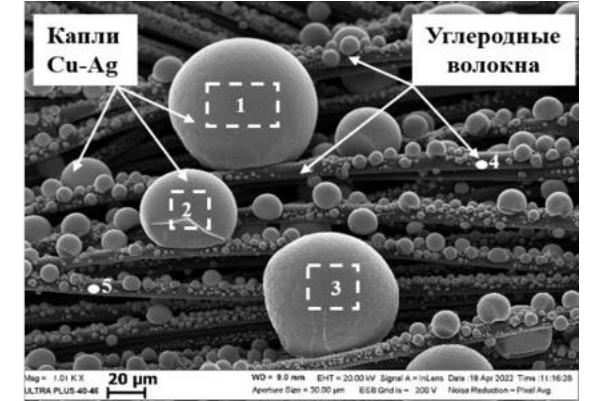
В переходном слое (Ni-Al)/W образуются дендриты W ( $\beta$ -фазы) и псевдобинарная эвтектика на основе NiAl ( $\gamma$ -фазы), содержащая преципитаты W-содержащей фазы размером менее 50 нм и игольчатые включения  $Ni_3Al$  ( $\gamma'$ -фазы), а также тройная эвтектика  $\alpha + \gamma + \gamma''$ , содержащая частицы твёрдого раствора на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  размером около 100 нм.

# Взаимодействие углерода с металлами и интерметаллидами

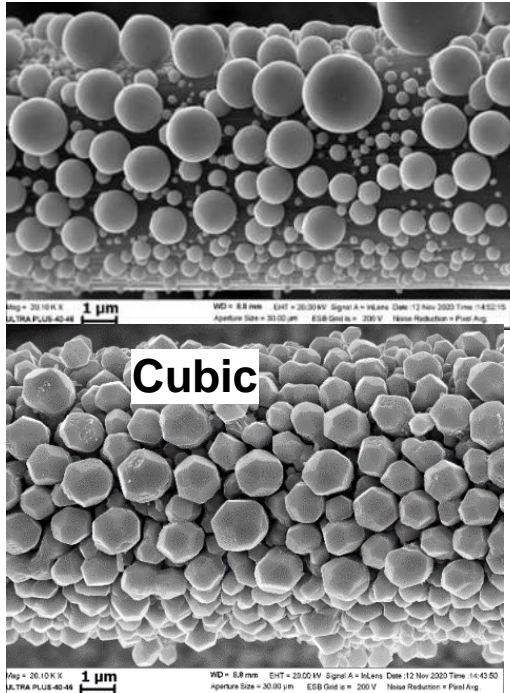
## Carbon fiber with TiC and MAX-phase $Ti_3AlC_2$ coatings



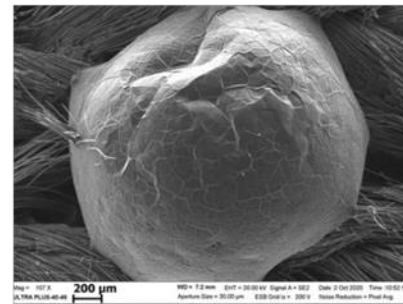
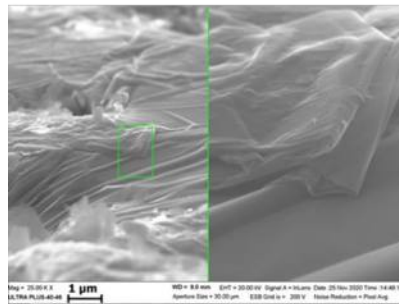
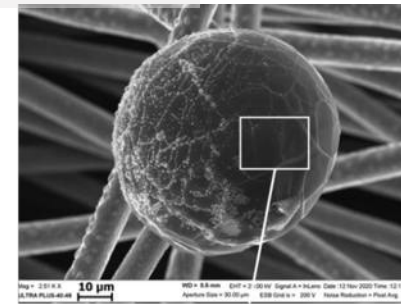
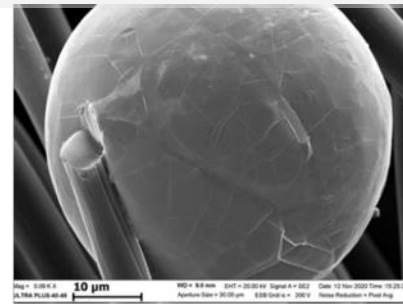
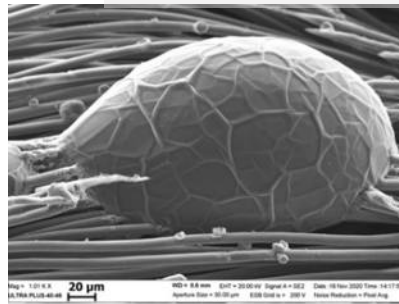
## Eutectic alloy Cu-Ag on carbon fibers



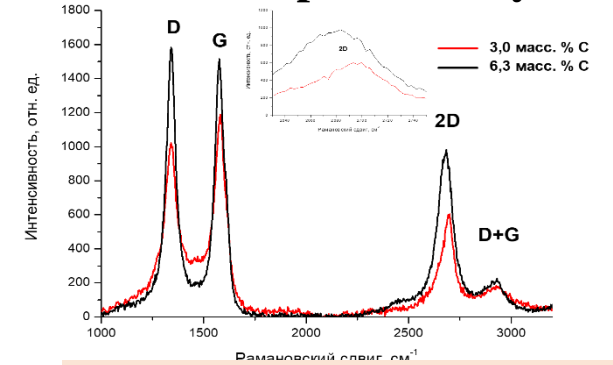
## Spherical modification of Cu-coatings on C-fibers



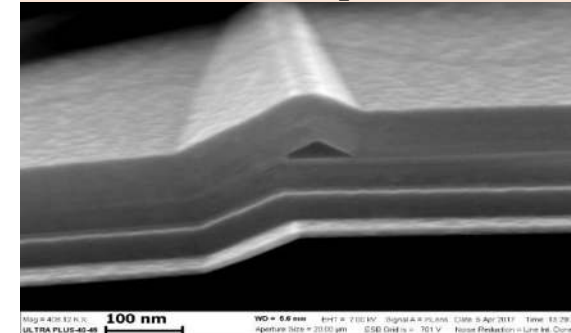
## Carbon films on metals/intermetallic surfaces



## Raman spectrometry

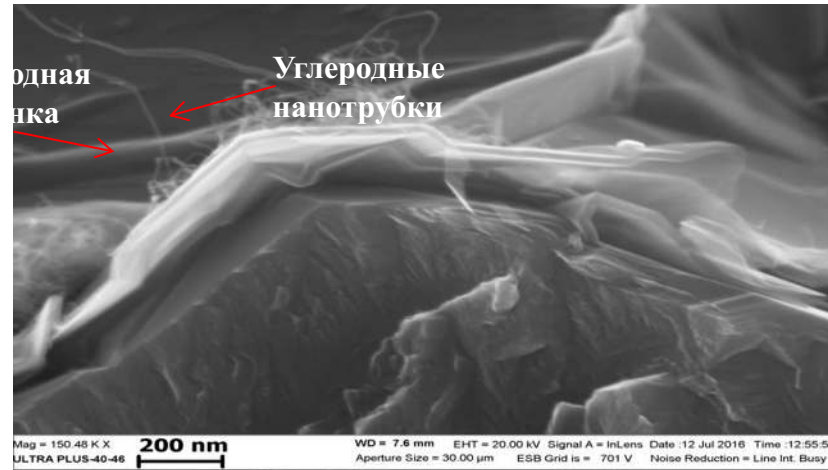
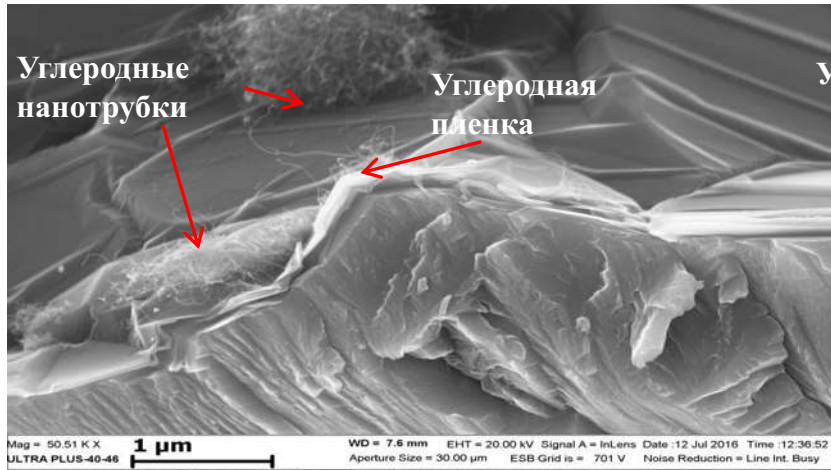


## Multilayered graphene films on Cu-Ag drop surface

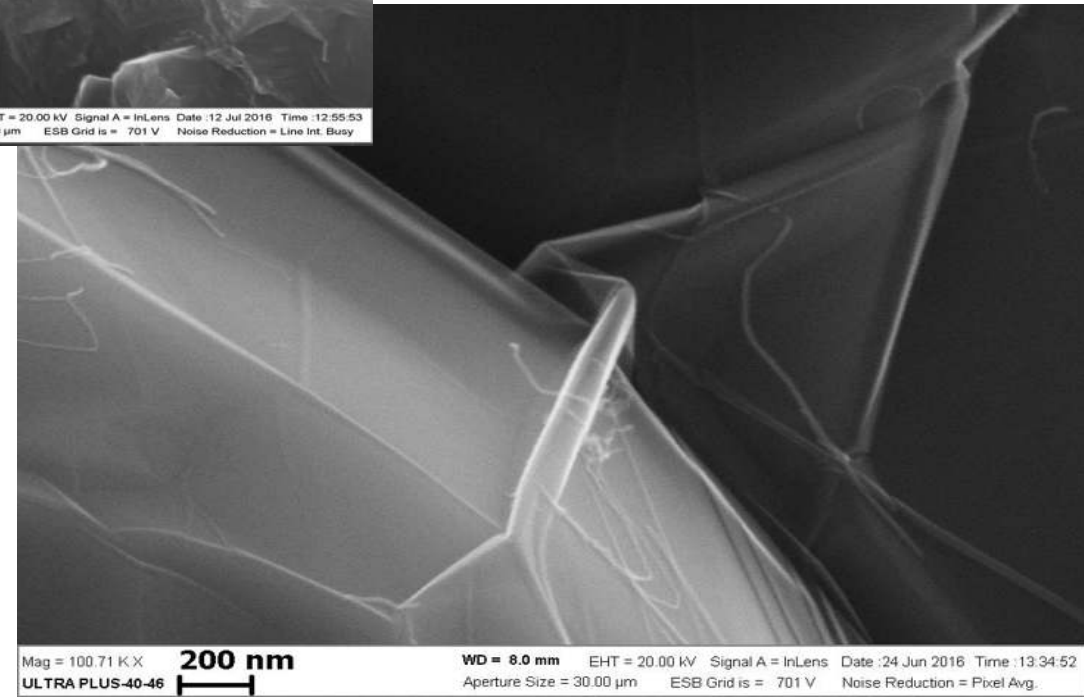


# Особенности формирования двумерных нанопокровтий в системе NiAl-C<sub>нано</sub>

Поверхность излома (и увеличенный фрагмент многослойной пленки) образца NiAl-C синтезированного в режиме СВС.



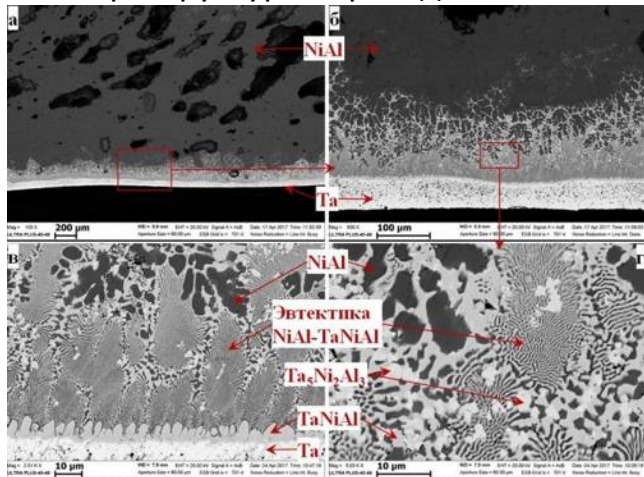
Фрагмент графитовой пленки  
на поверхности NiAl



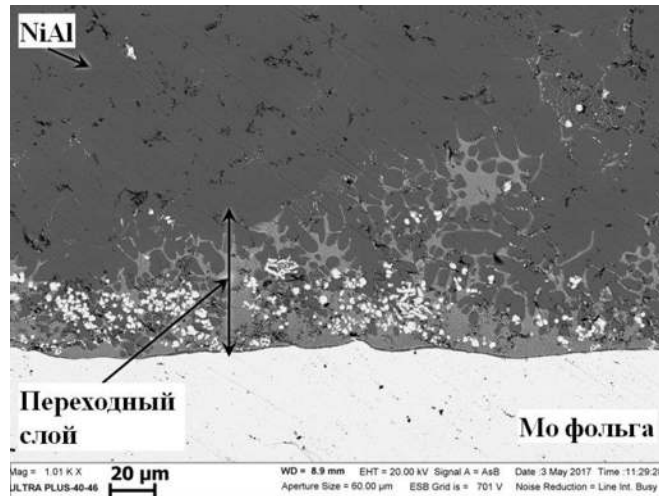
- В результате синтеза сформировалась беспористая интерметаллидная матрица на основе Ni<sub>3</sub>Al с размером зерен около 5–10 мкм .
- Углерод преимущественно располагается по границам интерметаллидных зерен Ni<sub>3</sub>Al формирует на них непрерывное/сплошное многослойное покрытие/пленку толщиной около до 15-20 нм.
- Покрытия на поверхности интерметаллидных зерен Ni<sub>3</sub>Al представляют собой α-графит (гексагональный P63/mmc). Можно предположить, что формирование многослойных углеродных нанопленок произошло в результате аллотропного превращения исходных углеродных нанотрубок в графит.

# СВС-сварка интерметаллидов с металлическими подложками

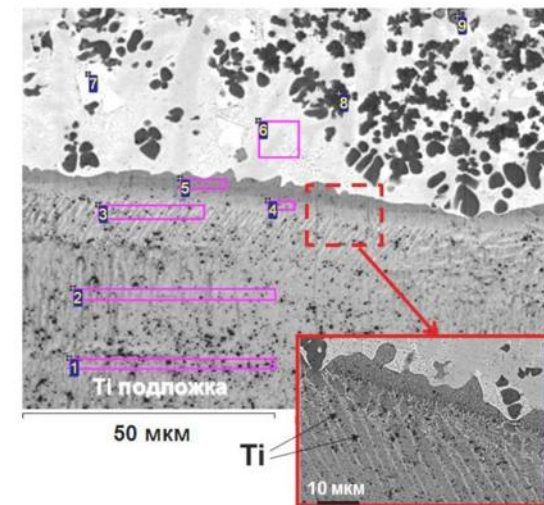
СВС-сварка (Ni+Al)- Ta подложка  
микроструктура переходной зоны



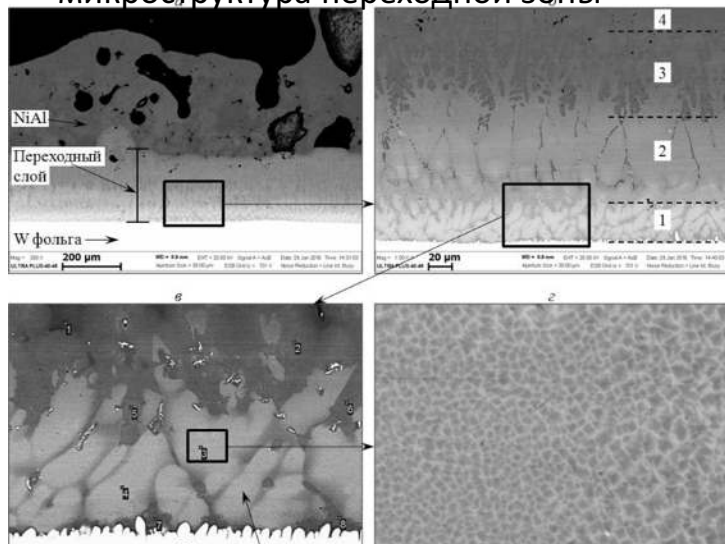
Сварка (Ni+Al)-Mo подложка  
микроструктура переходной зоны



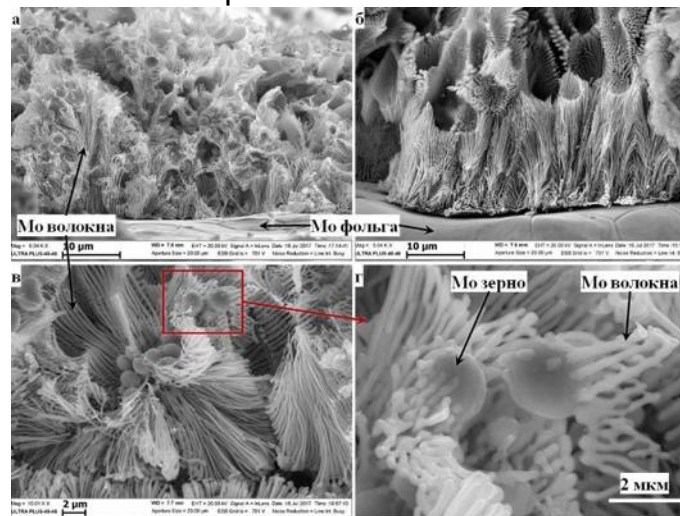
Сварка (Ni+Al) с Ti-подложкой



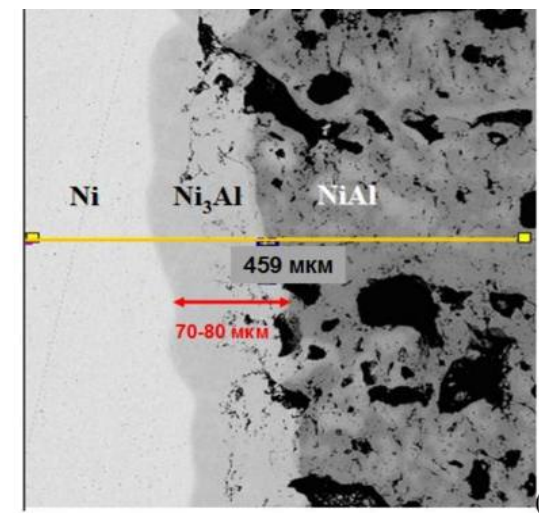
СВС-сварка (Ni+Al)-W подложка  
микроструктура переходной зоны



Микроструктура переходной зоны  
после травления - Mo нити



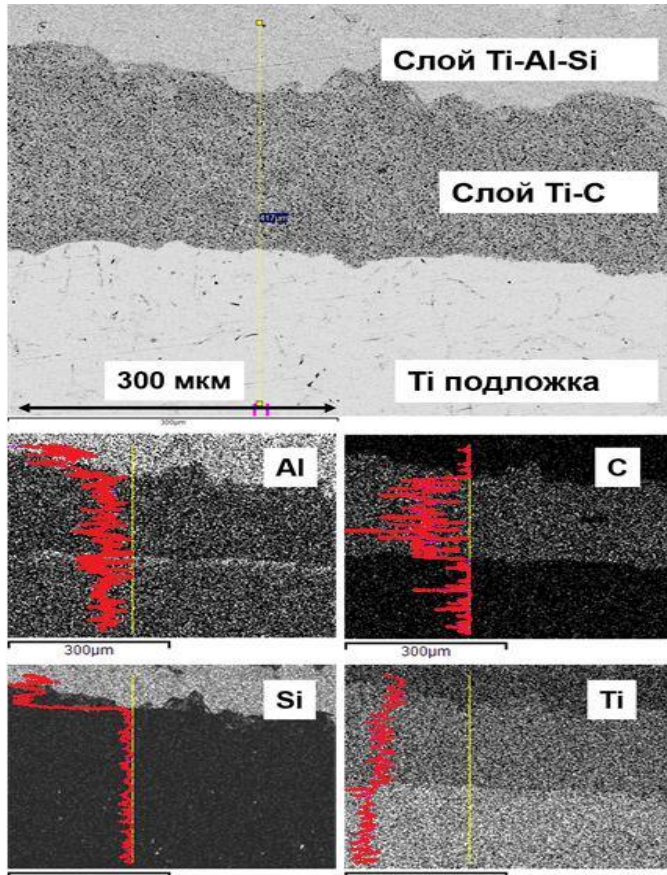
СВС-сварка NiAl с Ni-подложкой



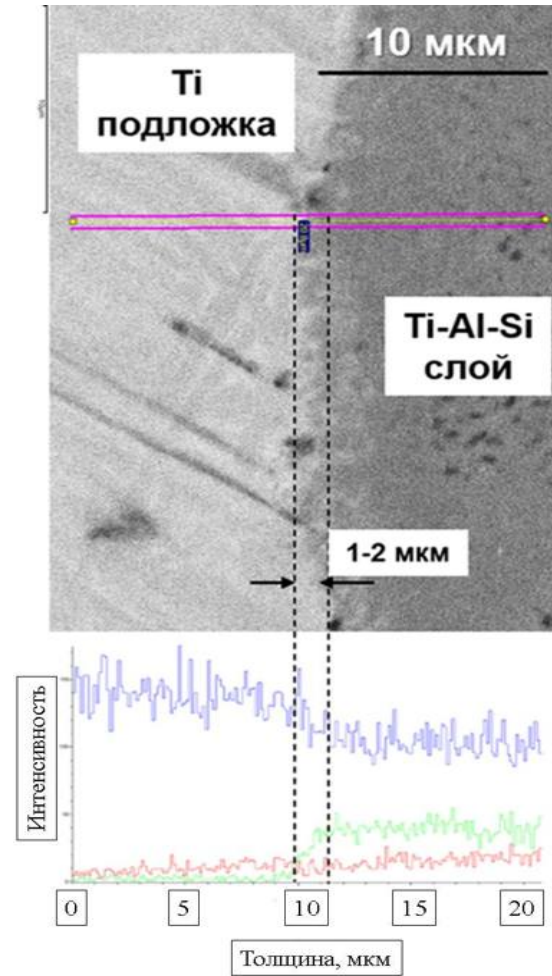
СВС-сварка может быть использована для нанесения защитных интерметаллидных покрытий

# СВС-слоевые и градиентные материалы

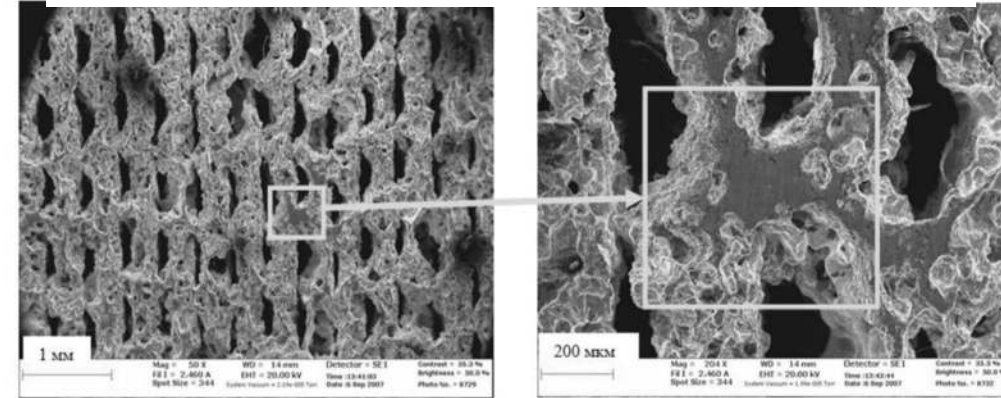
Сварное соединение  $Ti_{20}Al_3Si_9/TiC/Ti$   
СВС-прессование



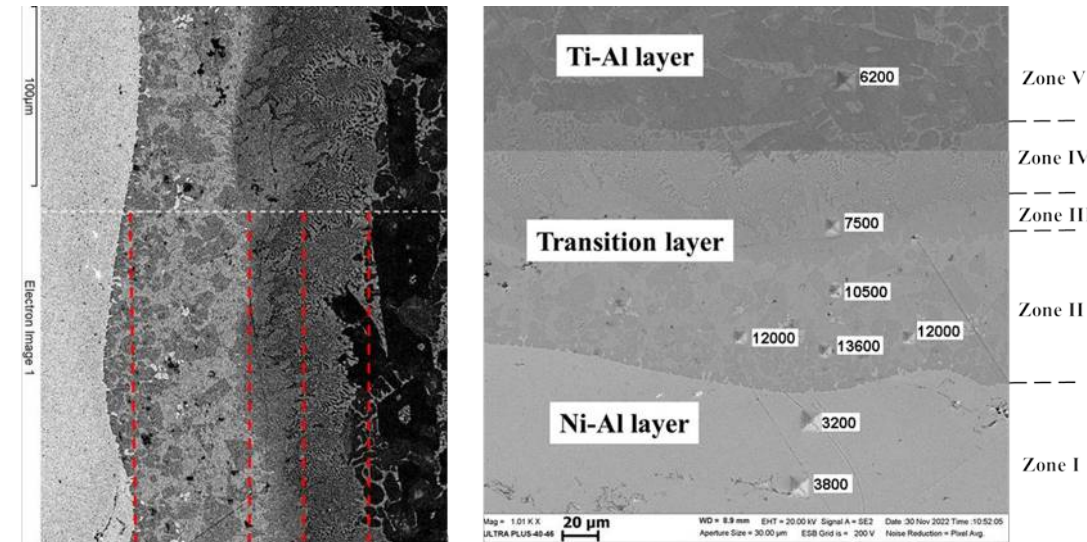
СВС-сварка интерметаллида  
 $Ti_{20}Al_3Si_9$  с Ti-подложкой



Многослойное сварное соединение лент  
на основе  $0.45Ti+0.3Al+0.35C=0.25 Nb$



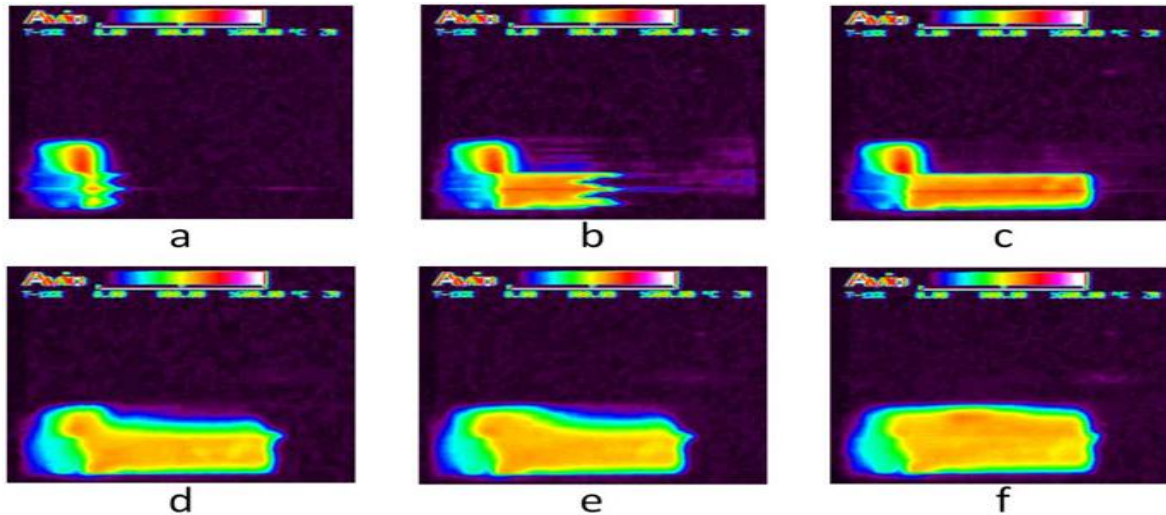
Сварное соединение интерметаллидов NiAl/TiAl  
Микроструктура переходной зоны.



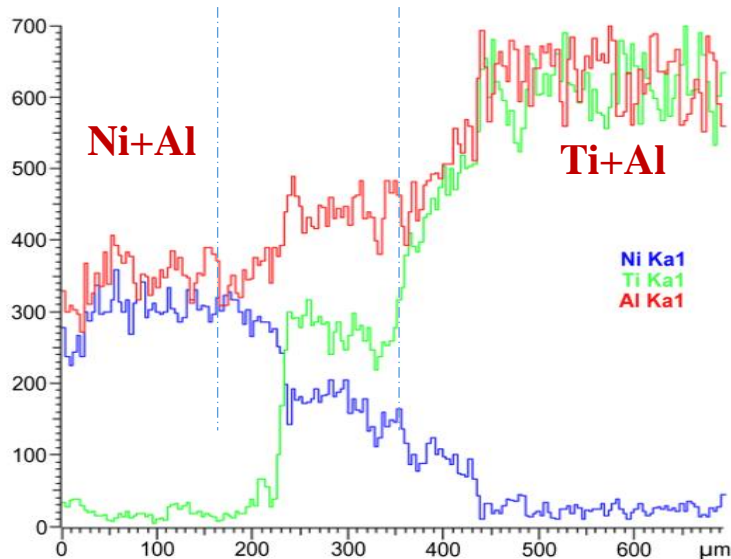
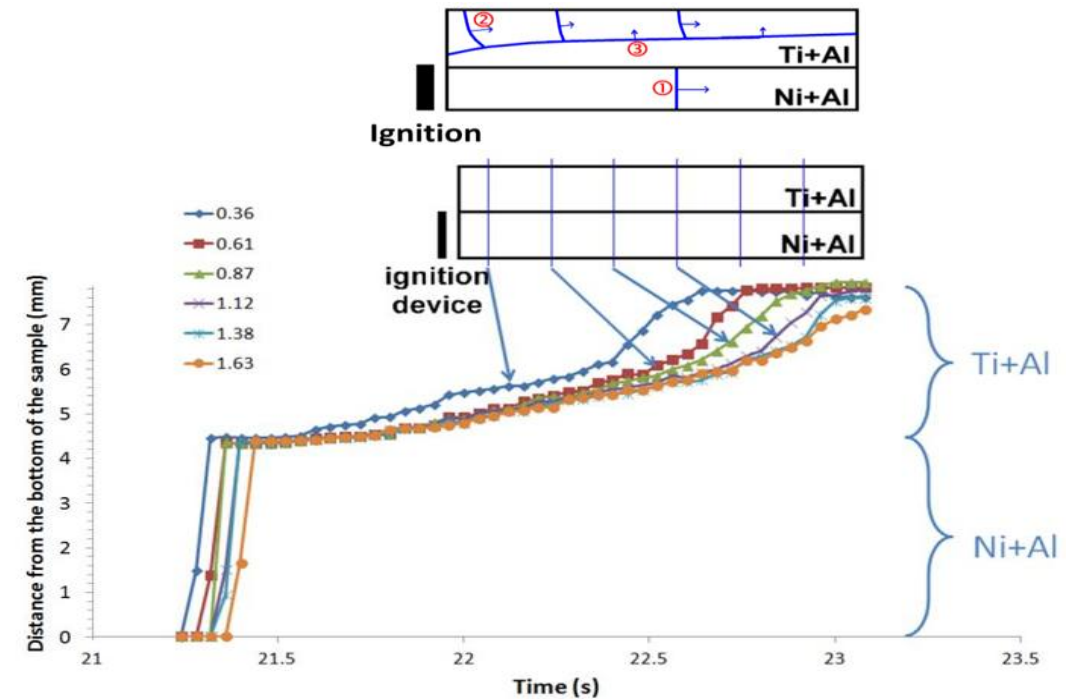
Слой	Микротвердость $H_{\mu}$ ГПа	Коэффициент трещиностойкости, $K_{Ic}$ МПа $m^{1/2}$
Ti-Al-Si	10,1	5,1-5,7 (настоящая работа)
Ti-C	12,3	2,5-4,3 [1]
Ti подложка	4,1	50-55 [2]

# Особенности горения слоевой системы (Ti-Al) / (Ni-Al)

Видеокадры записи на ИК-камеру процесса горения

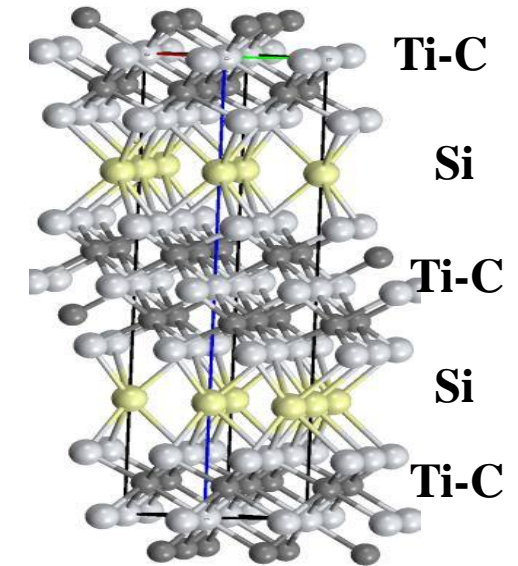
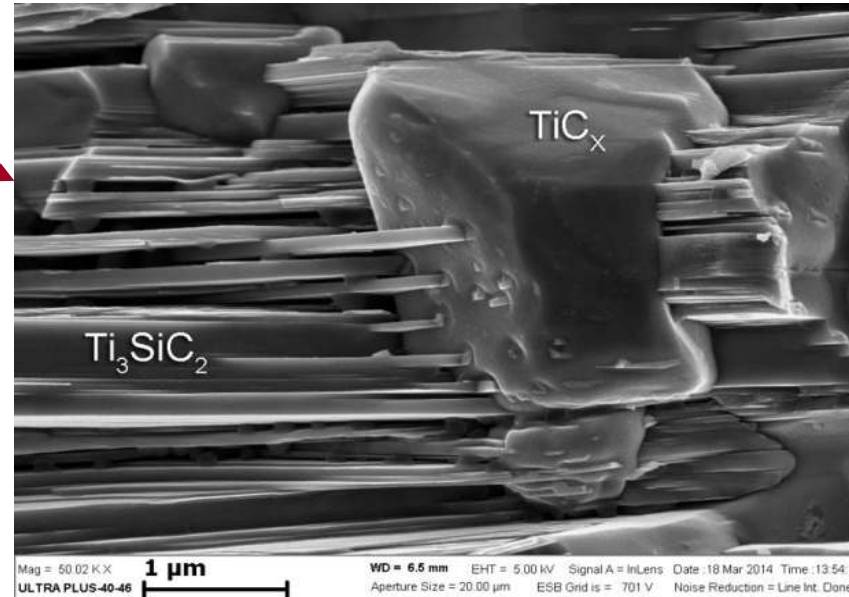
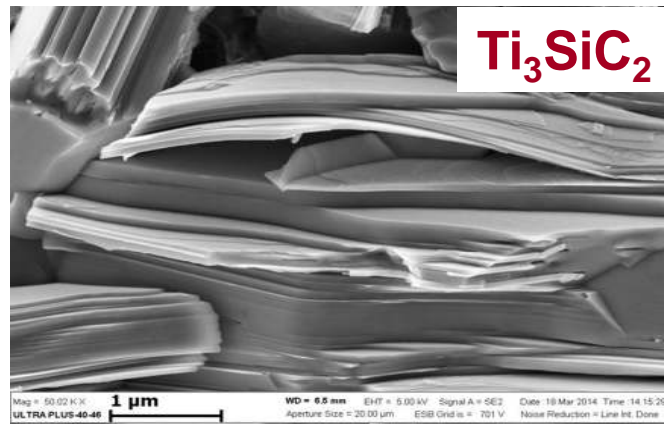


Кинетика фронта горения в слоевой системе

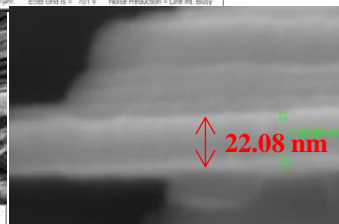
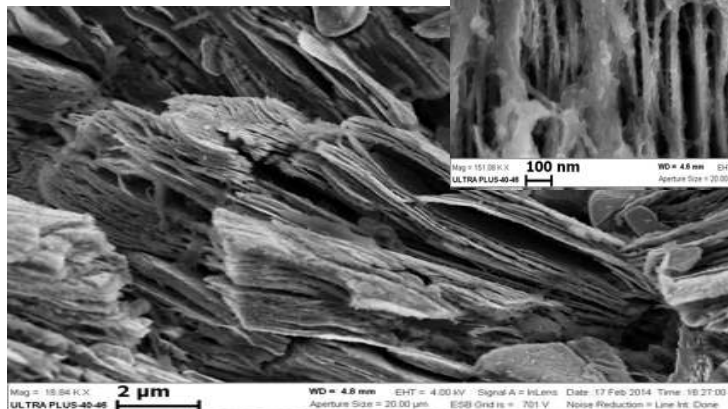
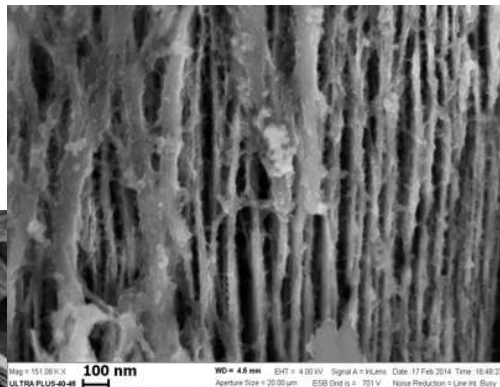


- Показано доминирующее влияние теплового эффекта при горении слоя Ni+Al на протекание смежной реакции в слое Ti+Al.
- Границу раздела между двумя слоями имеет высокие градиенты концентрации Ni, Al и Ti, что указывает на активное взаимопроникновение элементов с формированием градиентной переходной зоны обеспечивающей высокие механические свойства сварного соединения.

# Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в системе Ti–Si–C : MAX-фаза и MXen

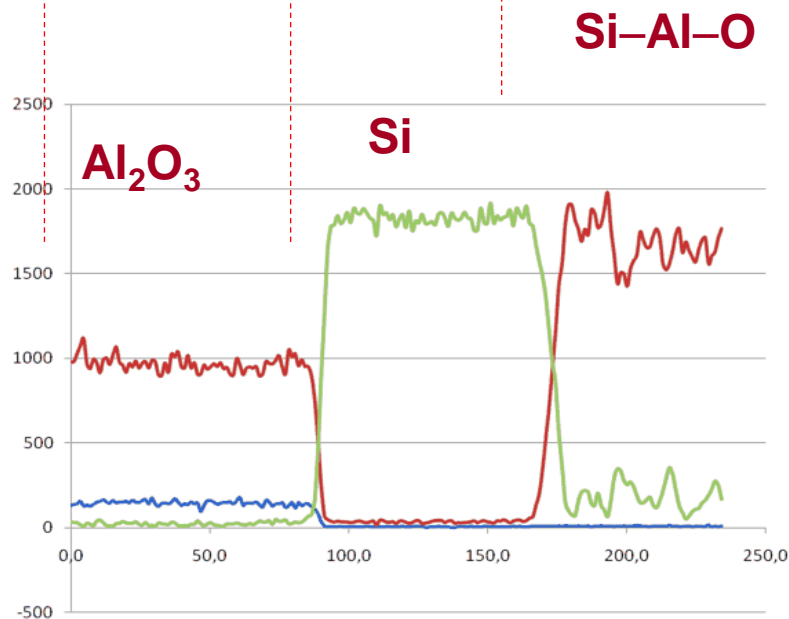
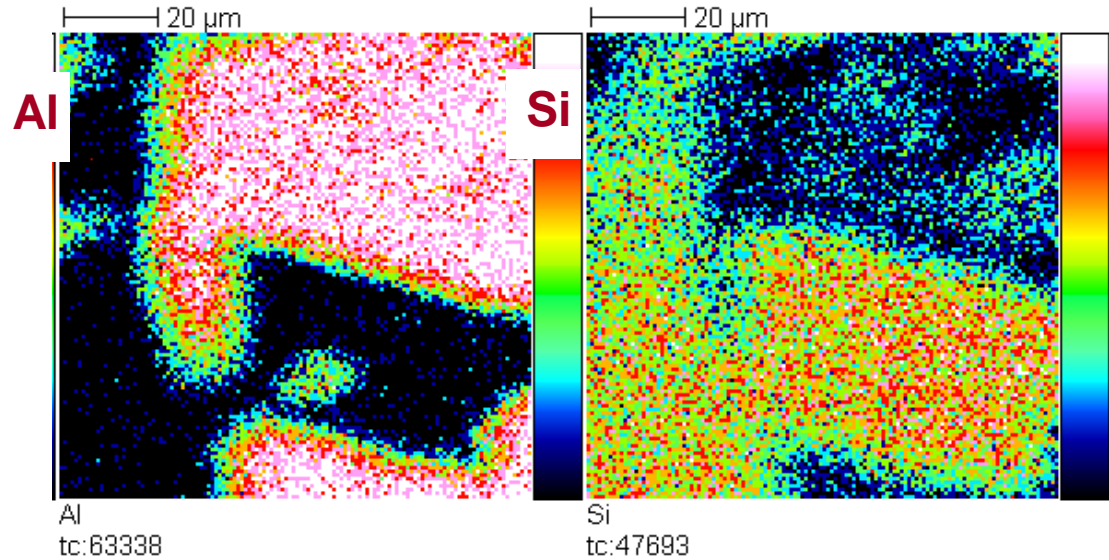
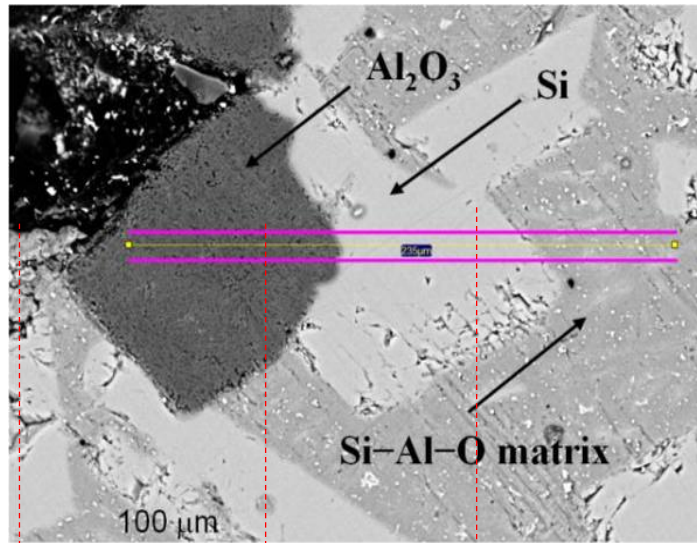


**MXen Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>**



- Кристаллическая структура MAX-фазы представляет собой послойную упаковку блоков TiC<sub>x</sub>, разделённых гексагональными монослоями атомов Si.
- Слои образуют плотные упаковки индивидуальных зерен Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>. В среднем толщина каждого слоя составляет 20 – 30 нм, что позволяет рассматривать Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> как наноструктурированный материал.
- Получен материал со структурой MXen состава Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

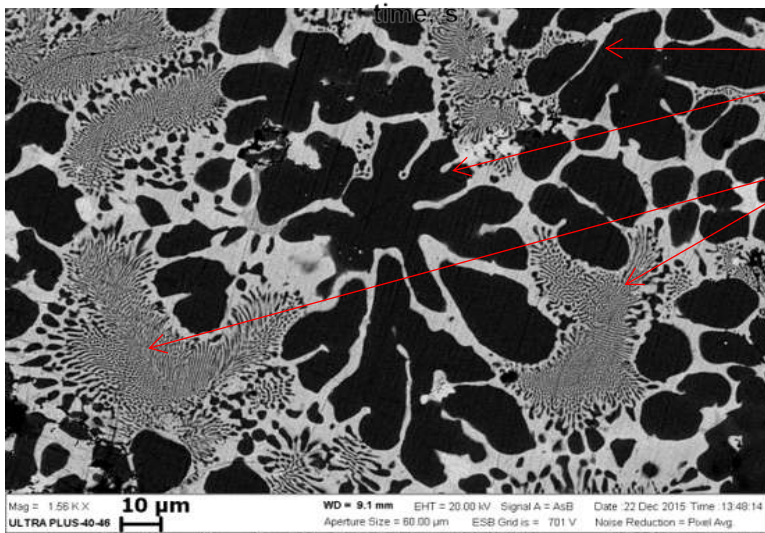
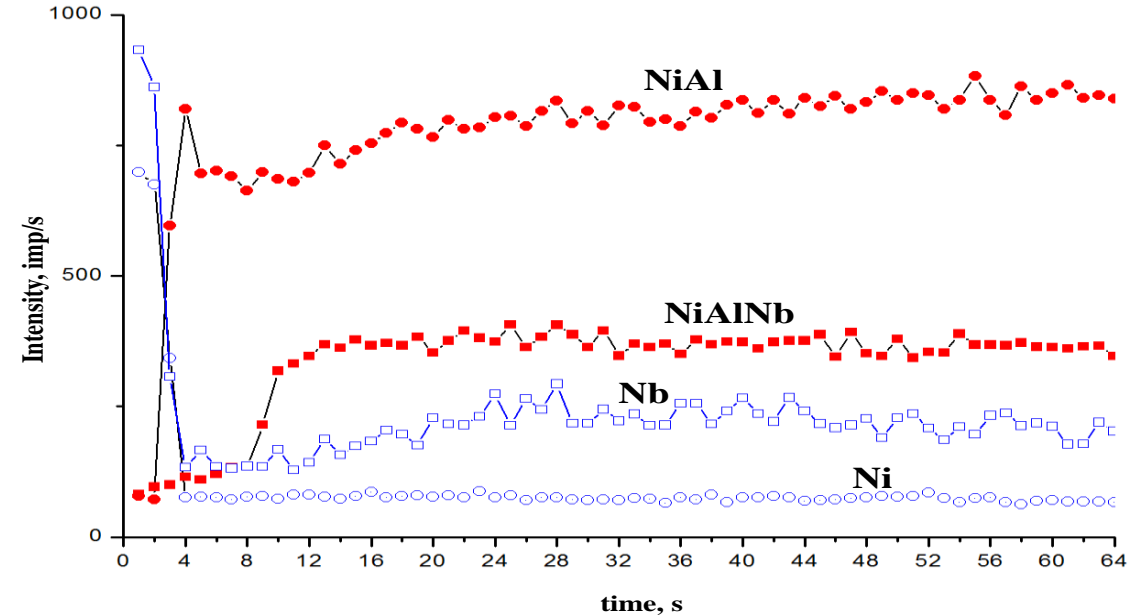
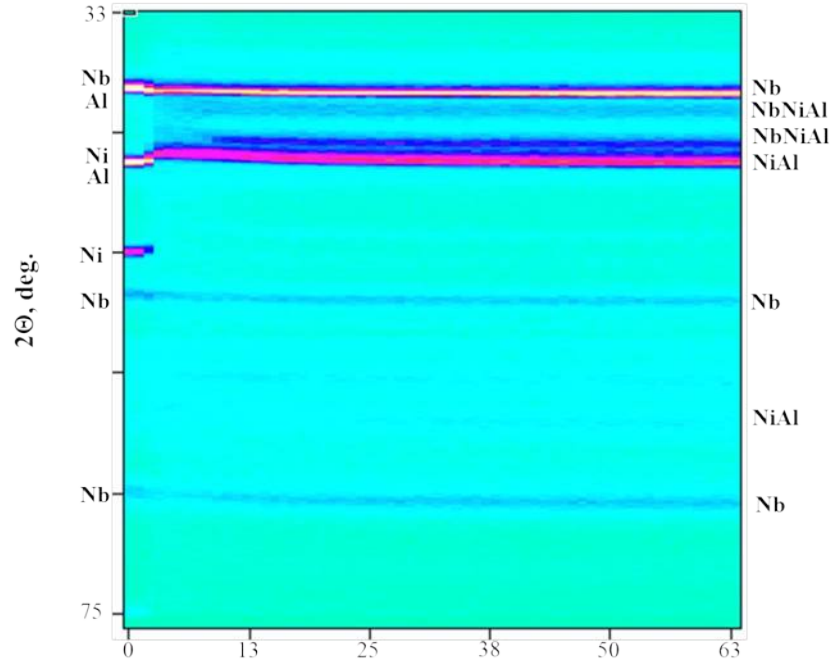
# Структуро- и фазообразование композитной керамики в процессе СВС-синтеза в системе Al-SiO<sub>2</sub>



- Методом СВС в результате восстановления SiO<sub>2</sub> алюминием в инертной среде Ar получен композиционный керамический материал, содержащий Si высокой чистоты (около 99 масс. %).
- Изучено влияние размеров и соотношения исходных компонентов на структуру и свойства конечного продукта. Показана возможность получения частиц кремния размерами до 400 – 500 мкм.

# Эволюция фазообразования в системе Ni-Al-Nb в условиях теплового взрыва

Дифракционная картина динамика фазообразования при СВС смеси 2Ni-2Al-Nb.



NiAl ( $\beta$ -фаза)

NbNiAl (фаза Лавеса)

СВС в условиях теплового взрыва порошковой смеси на основе Ni-Al-Nb приводит к образованию двухфазного материала NiAl-NbNiAl с содержанием фазы Лавеса порядка 35 масс. %.

SHS Joining by Thermal Explosion in (Ni + Al)/Nb/(Ni + Al + Nb) Sandwiches: Microstructure of Transition Zone. A.E. Sytschev, D. Vrel, O.D. Boyarchenko, D.S. Khrenov, N.V. Sachkova, and I.D. Kovalev. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2017, Vol. 26, No. 1, pp. 49–53.

# Термодинамические расчеты

**ATC - Adiabatic Temperature Calculator** - программа для расчета адиабатических температур реакций и визуального наблюдения фазовых диаграмм (разработчик - сотрудник лаборатории Щукин А.С.)

## Возможности программы:

- ✓ Определение равновесного состава
- ✓ Расчет адиабатической температуры системы
- ✓ Построение зависимостей термодинамических функций ( G, H, F) от температуры и состава, 3D-визуализация графиков

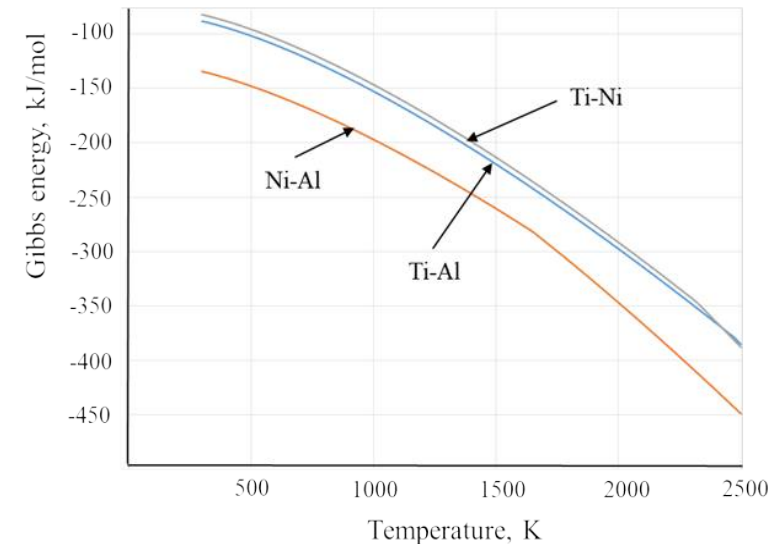
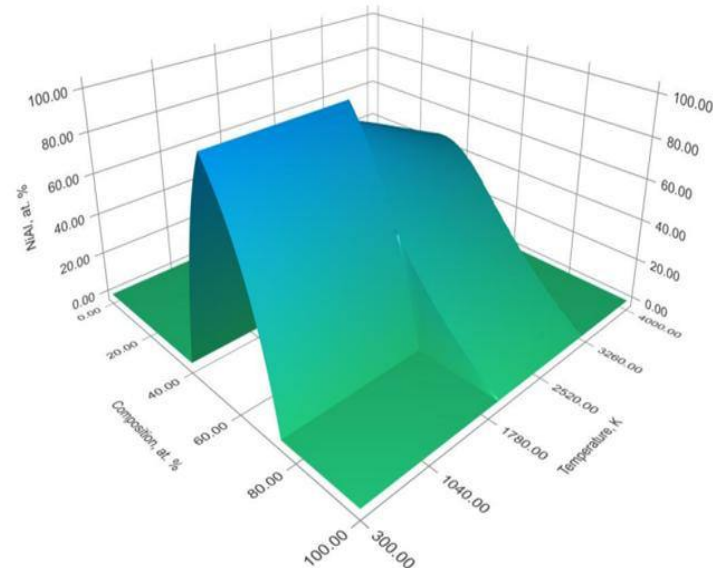
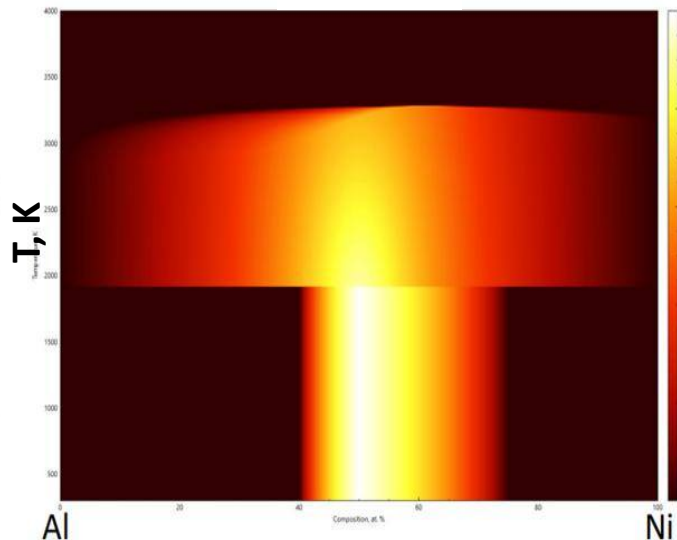
Примеры использования программы ATC для построения графиков и диаграмм

Workmode  
Temperature-composition range

Target: Liquid solution  
Equilibrium: One  
H initial by: Database  
By minimum Gibbs energy: HSC  
Minimization function: Extrapolation  
Gibbs energy: Enable

Range: Composition Temperature Pressure  
Start: 0 300 0.1  
Stop: 100 4000 1  
Step: 0.1 10 0.1  
Units: at. % K MPa

For example, composition of the NiAl in the Al-Ni system  
NiAl, at. %



Температурная зависимость энергии Гиббса для возможных продуктов слоевой системы TiAl/NiAl

# Научно-публикационная активность

- ✓ Более 300 публикаций в реферируемых отечественных и иностранных изданиях
- ✓ 5 патентов РФ
- ✓ Участие в проектах РФФИ, РНФ, хоздоговорах и заданиях по Гособоронзаказу



## ПАТЕНТЫ:

- «Способ получения интерметаллидных сплавов Гейслера на основе системы Ti-Al-Me», Бусурина М.Л., Сычев А.Е. заявка 2021 г

**№2020133005/05(060149)**, дата приоритета 06.10.20. Патент RU.

-«Устройство для проведения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в космосе» 2756083,. - Патент на изобретение № 2245222. заявка **№2003122255**, приоритет изобретения 22 июля 2003.

-«Способ получения пористых материалов на основе никелида титана.» - С.Г.Вадченко, О.К.Камынина, А.Е.Сычев, А.С.Рогачев. Патент РФ **№ 2310548**, заявка 2006105572/02 от 22.02.2006г.

- «Способ получения биомедицинского материала и материала, полученного этим способом.» С.Г.Вадченко, О.К.Камынина, А.Е.Сычев, Крылова Е.А., Плащина И.Г., Селезнева И.И., Григорян А.С., Топоркова А.К. Патент **№ 2341293**, заявка № 2007128453 от 25.07.2007г.

# Спасибо за внимание!

Телефон:  
8 (49652) 46-384  
+7 (903) 740-2302

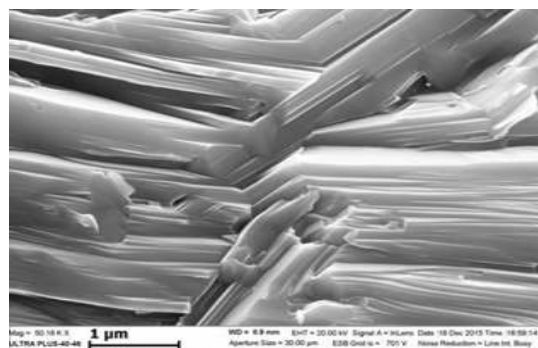
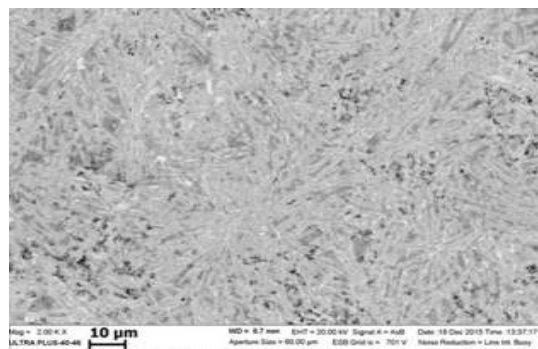
E-mail  
[sytschev@ism.ac.ru](mailto:sytschev@ism.ac.ru)

WWW  
<https://www.ism.ac.ru/struct/sytschev/index.php>

# Синтез и кристаллическая новая МАХ фазы $(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})_3\text{AlC}_2$

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из порошковой смеси Zr-Ti-Al-C впервые получен материал, содержащий МАХ фазу состава  $(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})_3\text{AlC}_2$

Структура материала

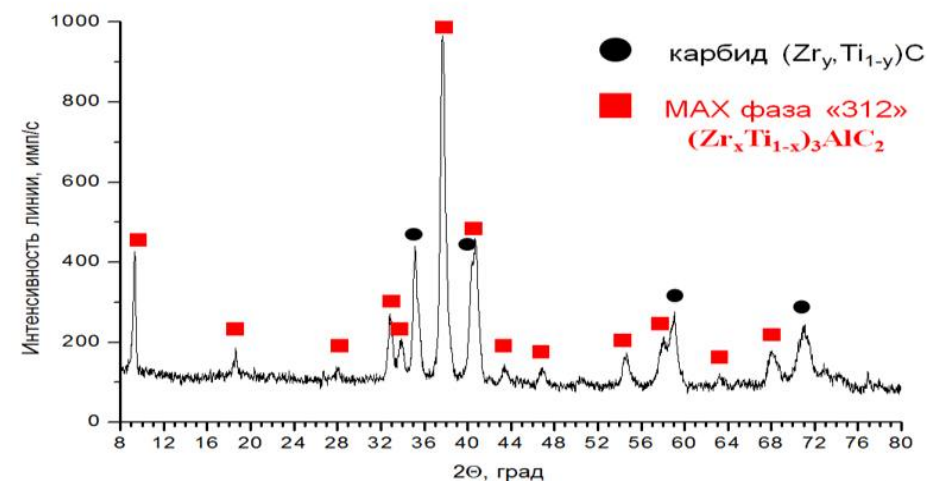


Кристаллографические данные  $(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})_3\text{AlC}_2$

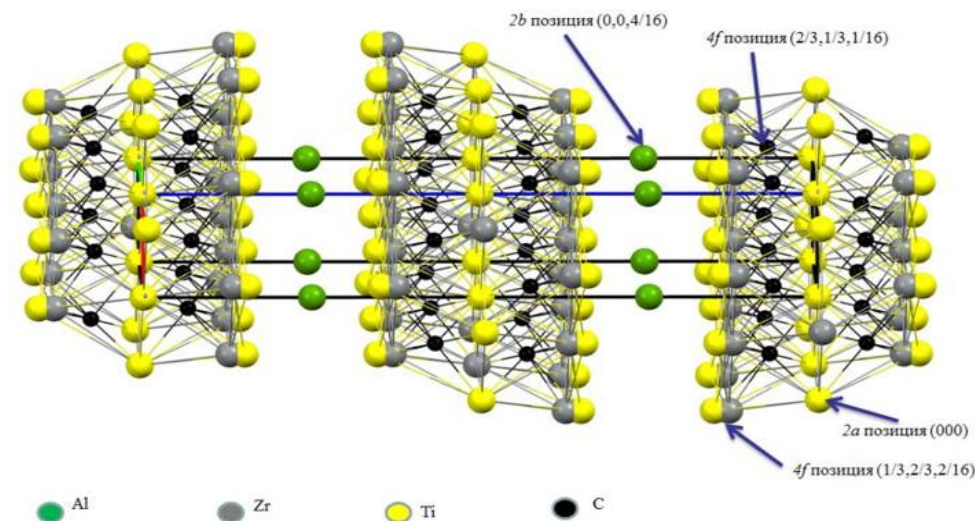
Параметр	$(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})_3\text{AlC}_2$
$a$ , Å	3.174(2)
$c$ , Å	19.08(1)
$V$ , Å <sup>3</sup>	166.5(2)
Пр.гр.	$R\bar{3}/mnc$
$d$ , г/см <sup>3</sup>	5.18
Zr <sup>1</sup> - C, Å	2.503
Zr <sup>2</sup> - C, Å	1.996 (2.062)
Zr <sup>1</sup> - Zr <sup>1</sup> , Å	3.174
Zr <sup>2</sup> - Zr <sup>2</sup> , Å	3.174 (3.174)
Zr <sup>2</sup> - Zr <sup>1</sup> , Å	3.098 (3.224)
Zr <sup>2</sup> - Al, Å	2.919 (2.808)

Определены структурные параметры синтезированной фазы  $(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})_3\text{AlC}_2$ . Установлено, что она относится к гексагональной сингонии с пространственной группой  $R\bar{3}/mnc$  и представляет собой твёрдый раствор со структурой, в которой атомы Ti и Zr расположены в метало-углеродном слое разупорядочено, занимая в равных долях позиции 2a и 4f.

Дифрактограмма синтезированного материала



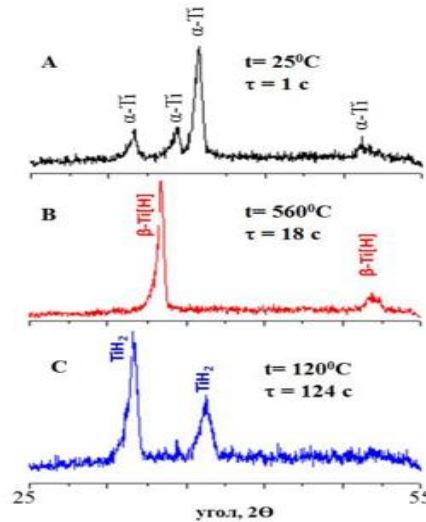
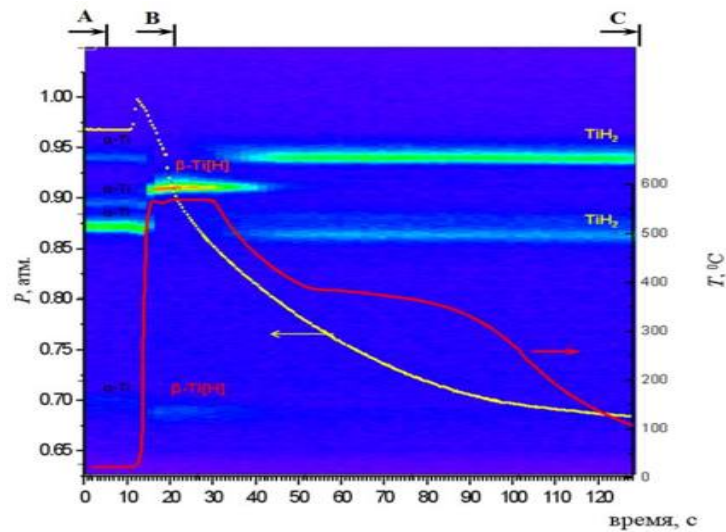
Фрагмент кристаллической структуры  $(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})_3\text{AlC}_2$



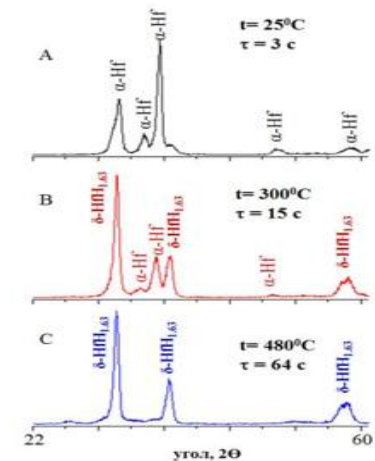
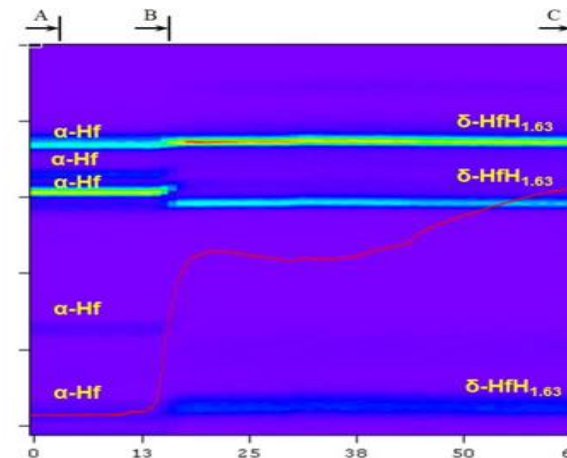
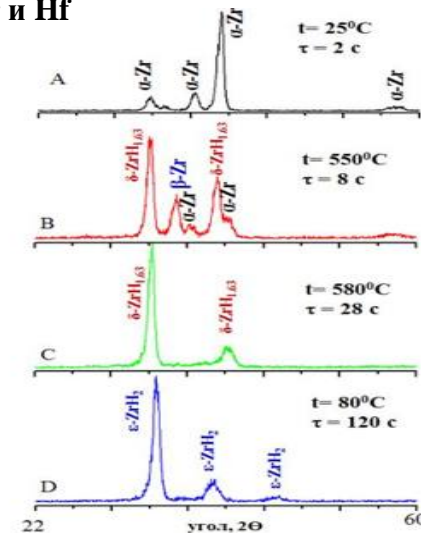
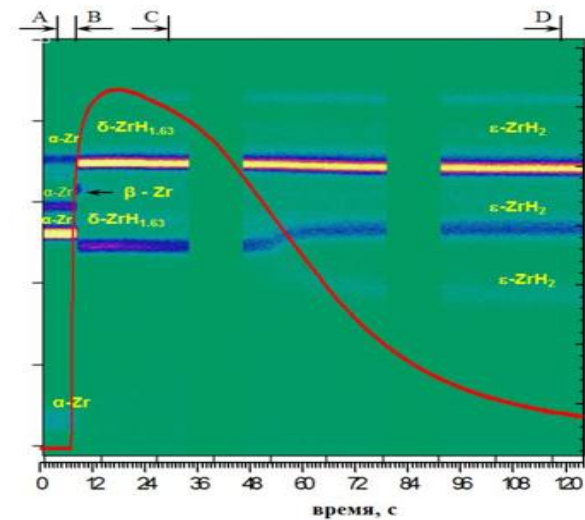
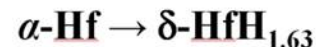
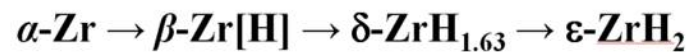
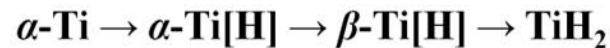
# Гидрирование металлов IVB группы Ti, Zr и Hf при СВС

Цель исследования - установление последовательности и кинетических закономерностей фазовых переходов при гидрировании Ti, Zr и Hf в условиях СВС на основе метода времяразрешающей рентгеновской дифракции.

Дифракционные картины процесса гидрирования Ti, Zr и Hf



Последовательность фазовых переходов при гидрировании



# Наиболее значимые публикации сотрудников лаборатории

1. V.A. Shcherbakov, A.N. Grydunov, I.E. Semenchuk, G.R. Nigmatullina, A.E. Sytshev, and M.I. Alymov. The influence of mechanical activation on the structure and phase formation of an electro-thermal explosion in the Ti–Zr–C system. *Ceramics International*. Available online 13 March 2023  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.123>
2. A.E. Sytshev, S.G. Vadchenko, A.S. Shchukin, A.V. Aborkin, A.V. Karpov, P.A. Lazareva, and O.D. Boyarchenko. High-Temperature Interaction of Carbon Fibers with a Nickel Melt. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2022, Vol. 16, No. 1, pp. 167–174. DOI: 10.1134/S1990793122010158
3. Sychev A. E., Gorshkov V.A., Karpov A. V., Sashkova N. V., Kovalev I. D., Belikova A. F. Synthesis and properties of composite material based on (V,Cr)AlC solid solution. February 2021. *The Physics of Metals and Metallography* 122(3):286-292 DOI:10.1134/S0031918X21030145
4. N.A. Kochetov, A.E. Sytshev. Effects of magnesium on initial temperature and mechanical activation on combustion synthesis in Ti–Al–Mg system. Available online 6 September 2020. *Materials Chemistry and Physics*. Volume 257, 1 January 2021, 12372. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.1237275>.
5. Shchukin, A.S., Vrel, D. and Sytshev, A.E. Interaction of NiAl Intermetallic during SHS synthesis with Ta Substrate. (2018), *Adv. Eng. Mater.*, 1701077. Q1, IF 3,217 <https://doi.org/10.1002/adem.201701077>
6. Sytshev, Alexander E.; Kovalev, Dmitry Yu.; Vrel, Dominique; Vadchenko, Sergey G. Combustion synthesis in the Ni-Al-Nb ternary system: A Time-Resolved X-ray Diffraction study. *Results in Physics* 7 1878 1882 2017 <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.05.0307>.
7. D.Yu. Kovalev, M.A. Luginina, S.G. Vadchenko, S.V. Konovalikhin, A.E. Sytshev, A.S. Shchukin. Synthesis of a new MAX phase in the Ti–Zr–Al–C system. *Mendeleev Communications* 02/2017; 27(1):59-60. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2017.01.018>
8. A.E. Sytshev, Dominique Vrel, O.D. Boyarchenko, D.V. Roshchupkin, N.V.Sachkova. Combustion synthesis in bi-layered (Ti–Al)/(Ni–Al) system. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 240, February 2017, Pages 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.010>
9. Busurina, M.L., Sychev, A.E., Kovalev, I.D., Karpov F.V., Sachkova N.V. Thermal Explosion in a 2Co–Ti–Al System: Combustion, Phase Formation, and Properties. *Combust Explos Shock Waves* 56, 317–323 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0010508220030089>
10. Лазарев П. А., Сычев А.Е., Бусурина М.Л., Грядунов А.Н. Получение слоевого материала Ti-Al-Si/TiC/Ti методом СВС-прессования. *Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. № 1, 2023 г.
11. A.E. Sytshev, S.G. Vadchenko, A.S. Shchukin, M.L. Busurina. Interaction of Cu Melt with Graphite Fibers *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2022, Vol. 31, No. 1, pp. 51–53, <https://doi.org/10.3103/S1061386222010113>
12. A.E. Sytshev, A. G. Merzhanov, “Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials”, *Russian Chem. Reviews*, 73:2 (2004), 147–159  
[doi.org/10.1070/RC2004v073n02ABEH000837](https://doi.org/10.1070/RC2004v073n02ABEH000837)