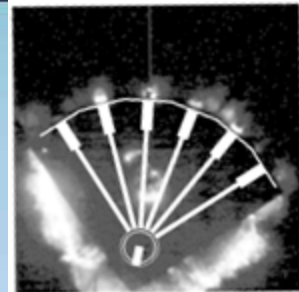


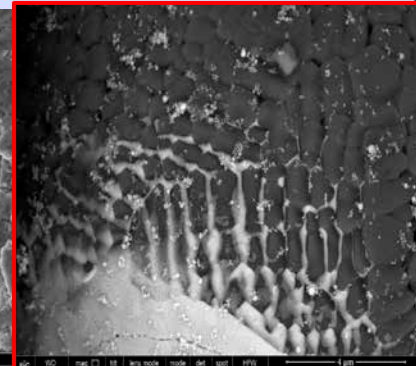
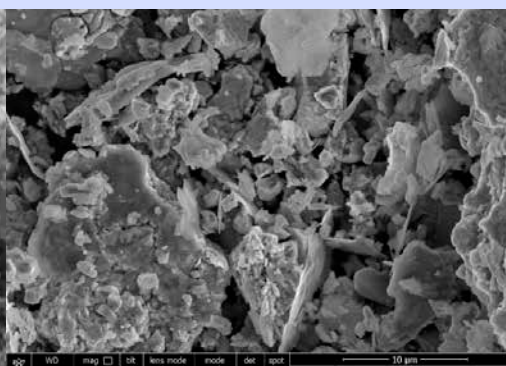
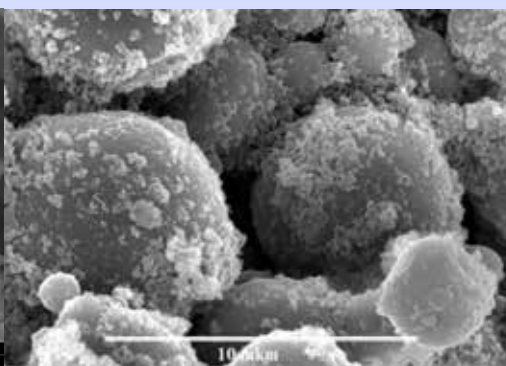
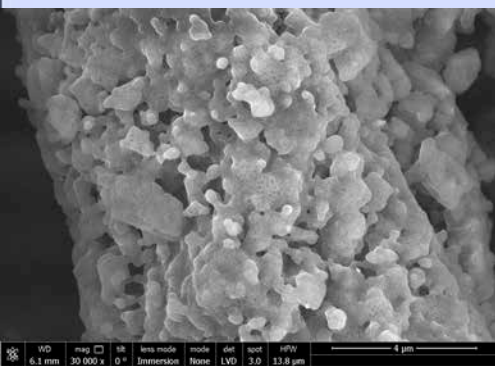


*Объединенный институт высоких температур
Российская академия наук
Лаборатория ударно-волновых воздействий*



РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

А.Ю. Долгобородов



Соавторы

ОИВТ РАН	ИХФ РАН	ИНЭПХФ РАН	МГУ	ИПХФ РАН
Янковский Б.Д. Ананьев С.Ю. Вальяно Г.Е. Бородина Т.И. Зиборов В.С. Ростиллов Т.А. Пахомов А.А.	Стрелецкий А.Н. Колбанев И.В. Бражников М.А. Кириленко В.Г. Шевченко А.А.	Лейпунский И.О. Жигач А.Н. Кусков М.Л. Пшеченков П.Ф.	Леонов А.В. Мудрецова С.Н.	Якушев В.В. Жуков А.Н.

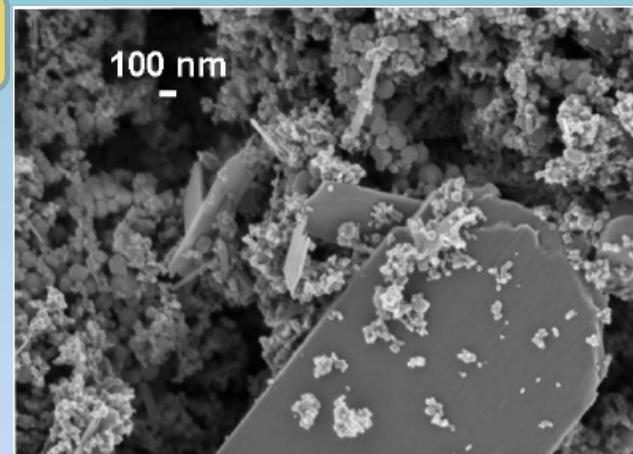
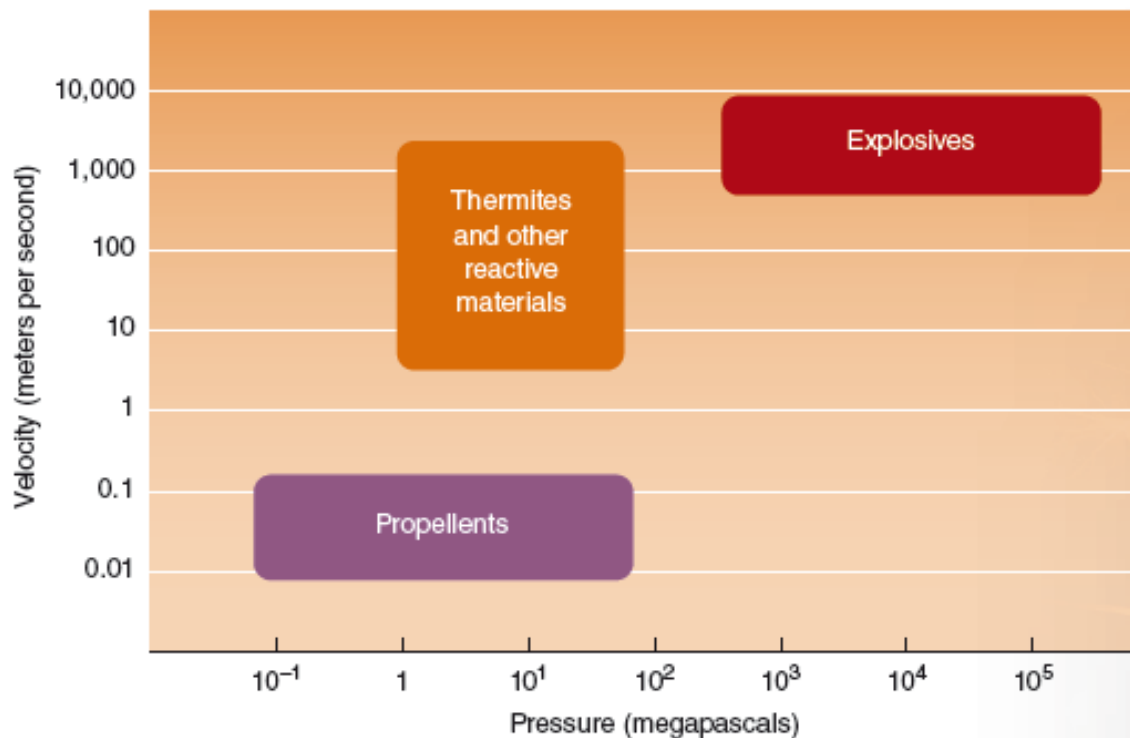
академик Фортов В.Е.

программы фундаментальных исследований Президиума РАН
«Вещество при высоких плотностях энергии»

«Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества» «Теплофизика высоких плотностей энергии»

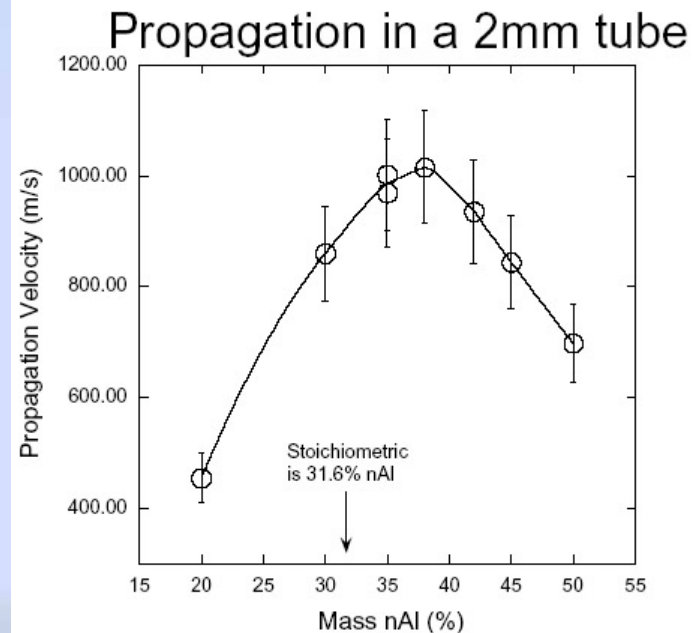
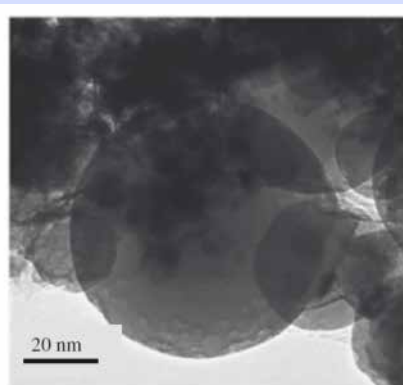
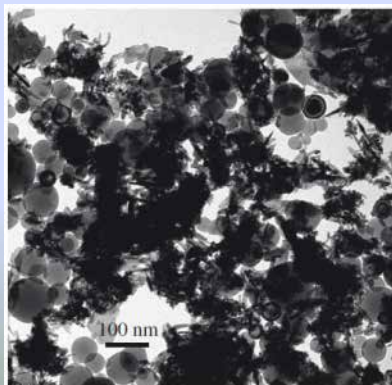
Проекты РФФИ - 06-03-32553; 09-03-00409; 12-03-00651, 16-29-01030

Nanoscale Composite Energetic Materials



Al/MoO₃ nanocomposite

Sullivan 2015 LLNL



S. Son et al. 2007

Nanoscale Composite Energetic Materials

S.F. Son, M.L. Pantoya, K.T. Sullivan, E. Dreizin, M.R. Zachariah, C. Rossi

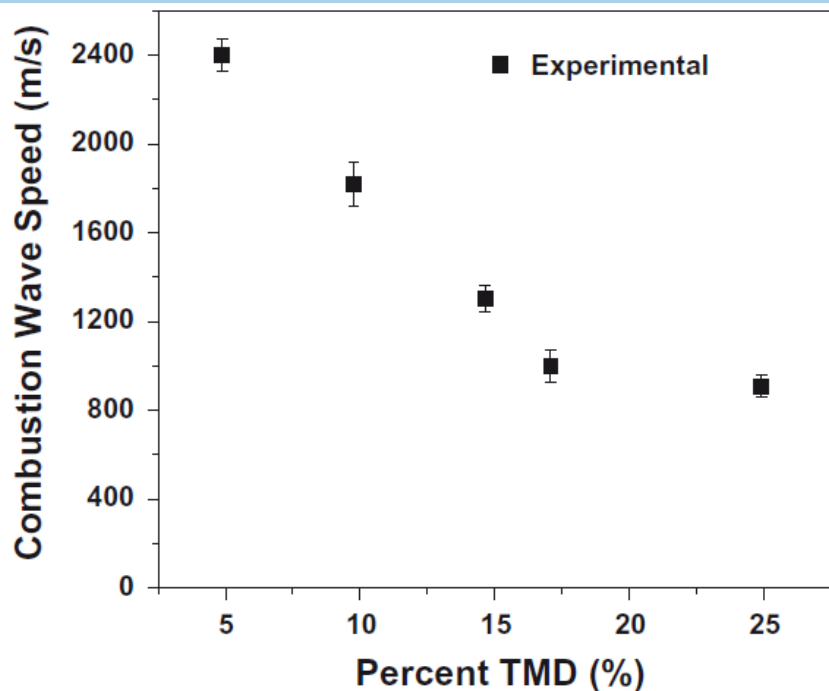


Fig. 7. Combustion wave speeds of CuO-100/Al as a function of % TMD

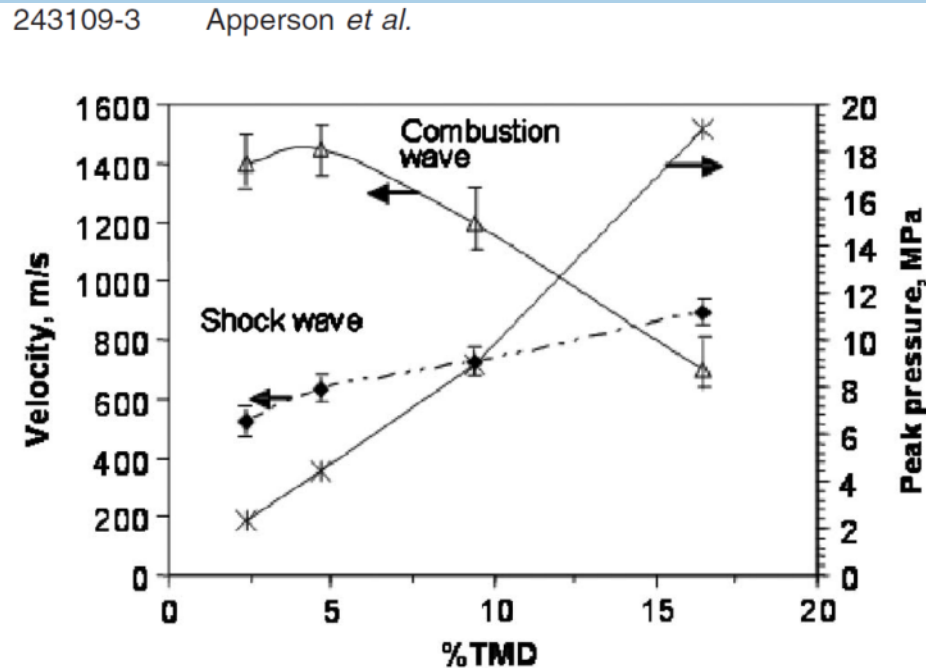


FIG. 4. Plot of combustion velocity, shock wave velocity, and peak pressure as a function of the density of physically mixed CuO/Al composite.

Al/CuO Thiruvengadathan et al. 2011

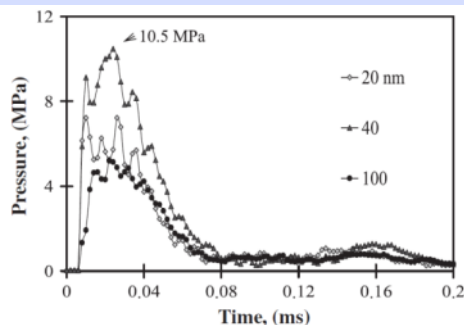


Figure 9. Temporal pressure rise during reaction of mixture (80 wt%) Bi₂O₃/Al with 20, 40 and 100 nm of average particles size of Bi₂O₃ at V = 0.342 l and m = 0.5 g.

Apperson et al. 2007

Al/Bi₂O₃ nanoparticles (40–50 nm)
 u ~2500 m/s
 Martirosyan et al.

Arrested Reactive Milling (ARM)

New Jersey Institute of Technology, USA

E.L. Dreizin, M. Schoenitz, Y.L. Shoshin.....

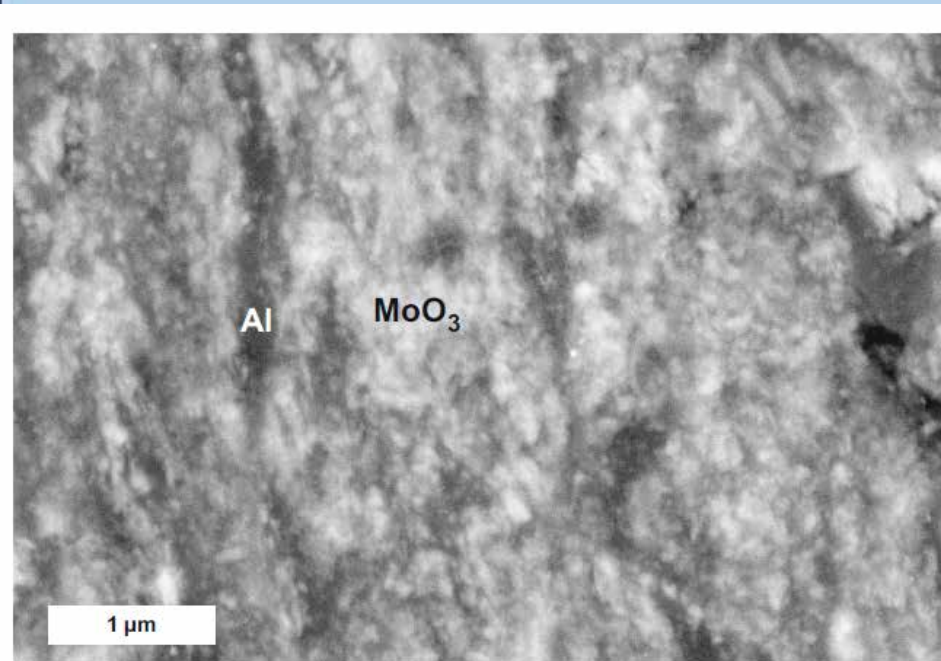


Figure 6 Cross section of a milled Al-MoO₃ thermite nanocomposite particle.

Al/MoO₃

Al/CuO

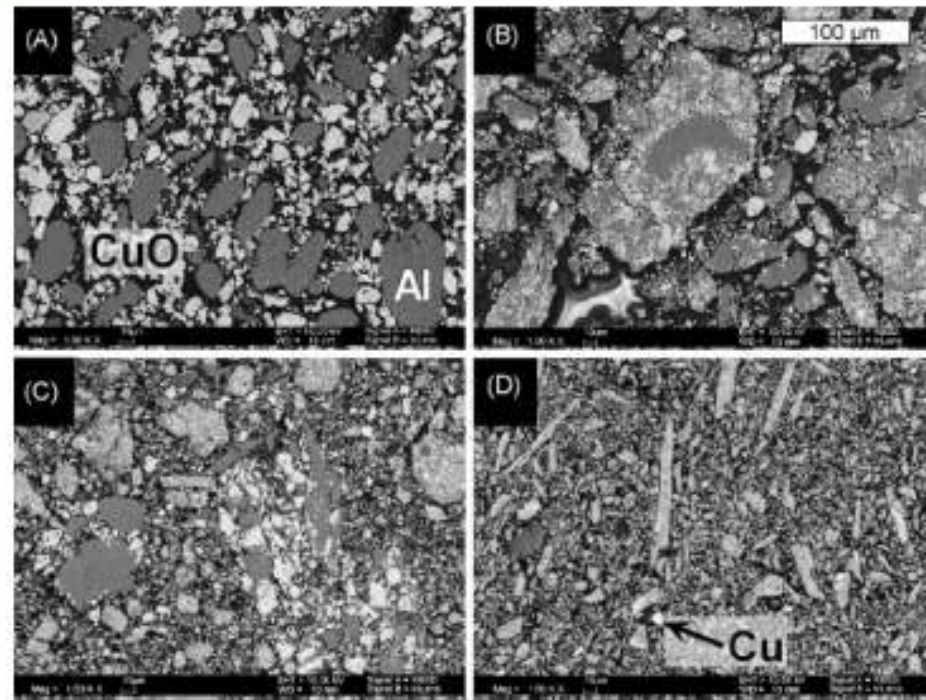


Figure 2. Backscattered electron images of Al/CuO nanocomposites prepared through ARM. (a) Original material. (b) After 2 min milling without hexane. (c) After 16 min milling with 1 mL of hexane. (d) After 60 min milling with 8 mL of hexane.³⁶

Nanoscale Composite Energetic Materials

Reactive Bonding

Micro Ignition and Rapid Initiation

Synthesis and Processing of Materials

Micro-Actuation/Propulsion

Propellant Additives

Biomedicine-Related Applications

Micro Power Generation

Energy Storage and Transfer

Bi₂O₃/Al/nitrocellulose-based actuator to induce intranuclear molecular transport.

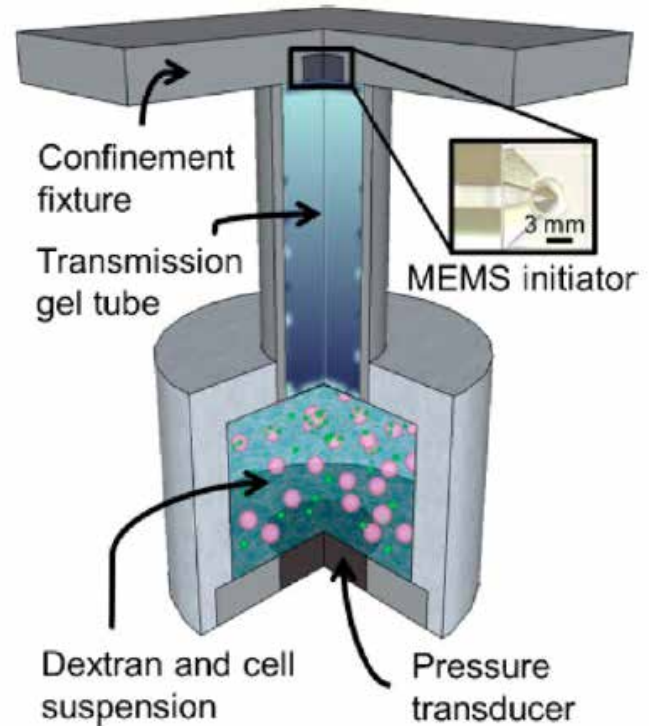
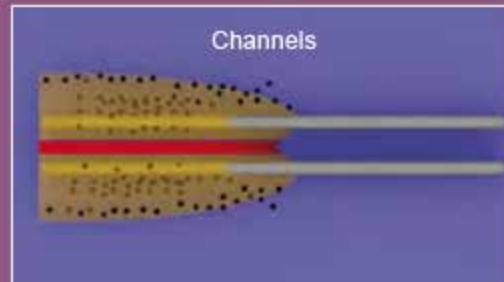


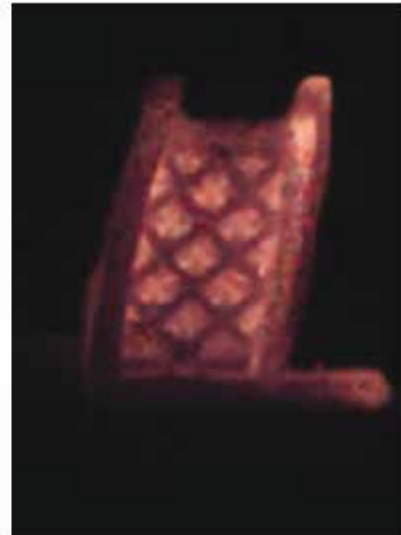
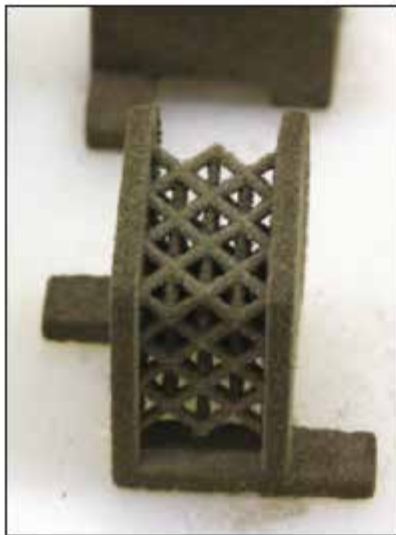
Figure 11. Cross-sectional illustration of MEMS-based actuator for pressure-mediated molecular delivery.¹⁴⁹

Manufacturing Energetic Materials

Three-dimensional (3D) thermite test structures illustrate how architectural features can be used to better understand and tailor thermite behavior. (left) Parallel channels experience overlapping reaction waves that accelerate reaction speed. (right) Perpendicular hurdles, depending on their spacing, can either help or hinder the reaction by either misdirecting reaction waves or propelling hot particles forward.

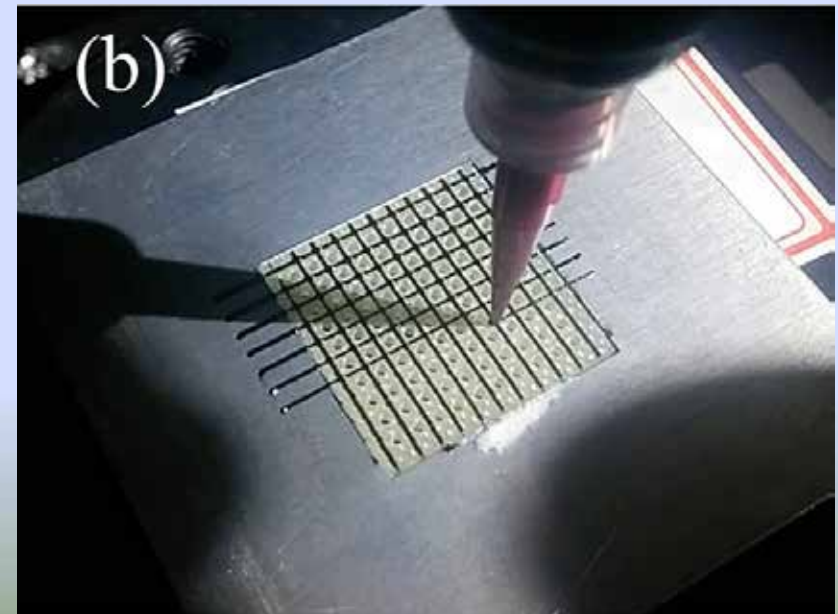


K. T. Sullivan, et al. LLNL



Livermore researchers are designing, building, and testing 3D reactive structures, including both thermite and intermetallic formulations. An example skin-lattice design, produced by engineer Robert Reeves, is shown (left) before and (right) during a reaction. Ongoing work is examining the trade-off between material reactivity and strength and investigating how materials such as this can be used as structural components in energetic systems.

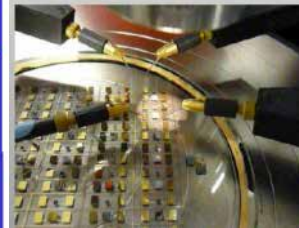
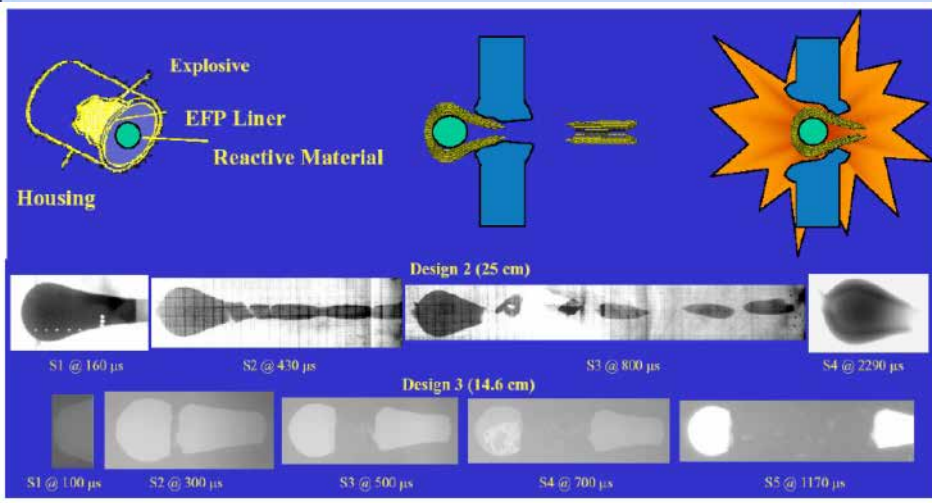
On-chip application,
micropropulsion systems,
solid propellant microthruster



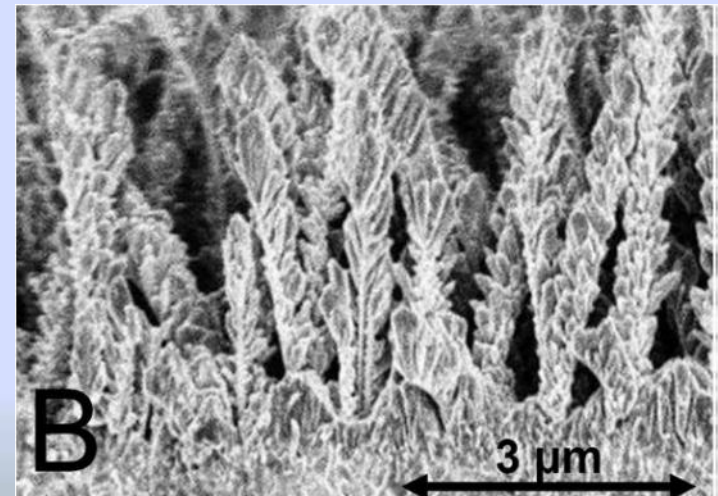
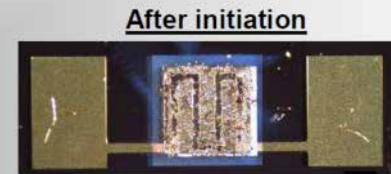
Реакционные материалы (PM)

HDRM высокоплотные реакционные материалы (High Density Reactive Materials)

Нано-ВВ, Нанотермиты (nanoenergetics-on-a-chip, explosive-on-a-chip, MEMS-based pyrotechnical microthrusters)



A few ms & watts

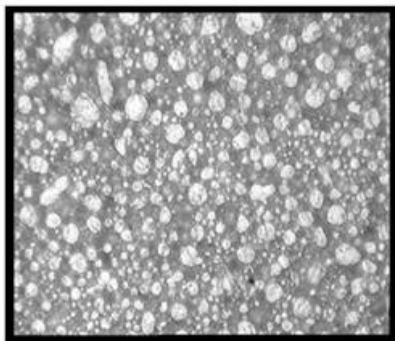


Pyrotechnical Micro Initiator integrating nano-sized Al/CuO thermite

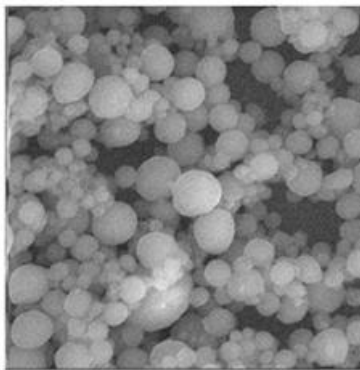
УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ В СМЕСЯХ ОКИСЛИТЕЛЬ-ГОРЮЧЕЕ

Стехиометрический состав (вес.)	Γ_{\max} , г/см ³	Реакция	Q, ккал/кг	Q _x × 10 ⁻³ , ккал/м ³
Al/S, 36/64	2.26	2Al + 3S = Al₂S₃	1150	2600
Al/MoO₃, 27/73	3.91	2Al + MoO₃ = Al₂O₃ + Mo	1120	4380
Al/Fe ₂ O ₃ , 25.5/74.5	4.23	2Al + Fe ₂ O ₃ = Al ₂ O ₃ + 2Fe	950	4020
Al/WO ₃ , 19/81	5.45	2Al + WO ₃ = Al ₂ O ₃ + W	710	3870
Al/CuO, 18.5/81.5	5.13	2Al + 3CuO = Al₂O₃ + 3Cu	970	4980
Al/BaO ₂ , 17.5/82.5	4.32	4Al + 3BaO ₂ = 2Al ₂ O ₃ + 3Ba	560	2420
Al/CrO ₃ , 35/65	2.76	2Al + CrO ₃ = Al ₂ O ₃ + Cr	1680	4640
Al/(-C₂F₄-), 26.5/73.5	2.31	4Al + 3(-C₂F₄-) = 4AlF₃ + 6C	2070	4780
Zr/(-C ₂ F ₄ -), 47.5/52.5	3.20	Zr + (-C ₂ F ₄ -) = ZrF ₄ + 2C	1380	4420
Zr/MoO ₃ , 48.5/51.5	5.41	3Zr + 2MoO ₃ = 3ZrO ₂ + 2Mo	770	4170
Ti/MoO ₃ , 33.5/66.5	4.63	3Ti + 2MoO ₃ = 3TiO ₂ + 2Mo	740	3430
Mg/(-C₂F₄-), 32.5/67.5	2.02	2Mg + (-C₂F₄-) = 2MgF₂ + 2C	2280	4610
Mg/Fe ₂ O ₃ , 31.5/68.5	3.21	3Mg + Fe ₂ O ₃ = 3MgO + 2Fe	1010	3240
Mg/MoO₃, 33.5/66.5	2.99	3Mg + MoO₃ = 3MgO + Mo	1170	3500
Mg/TiO ₂ , 38/62	2.74	2Mg + TiO ₂ = 2MgO + Ti	490	1340
Mg/SiO ₂ , 44.5/55.5	2.15	2Mg + SiO ₂ = 2MgO + Si	670	1440
Al/Ni, 31.5/68.5	5.16	Al + Ni = NiAl	330	1700

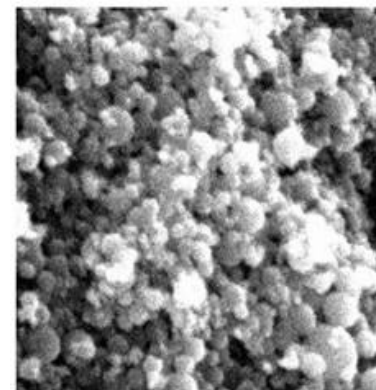
Materials Tested



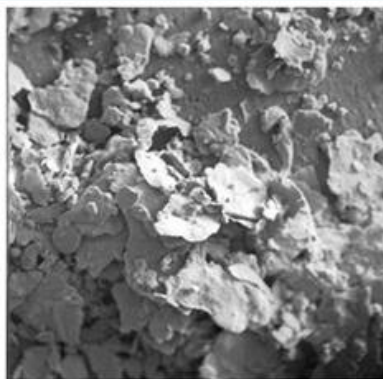
ASD-4 ($\langle d \rangle \sim 7 \mu\text{m}$)



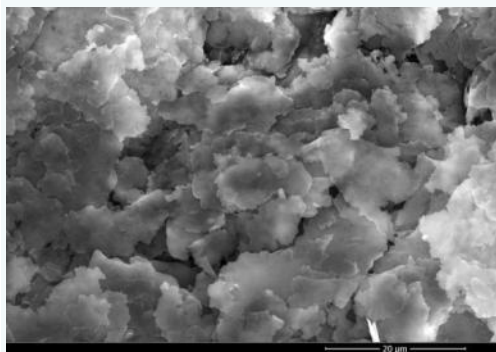
ASD-6 $\langle d \rangle \sim 3,6 \mu\text{m}$



nAl $\langle d \rangle \sim 100 \text{ nm}$



PP-2
 $\langle L \rangle \sim 70 * 1 \mu\text{m}$

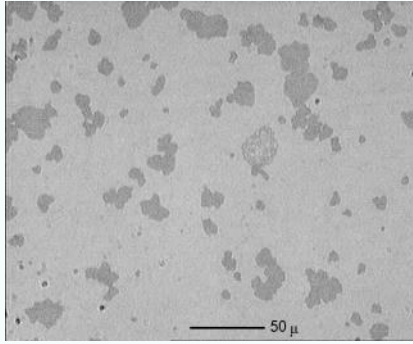
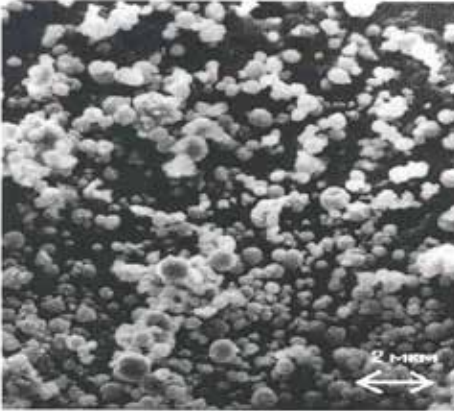
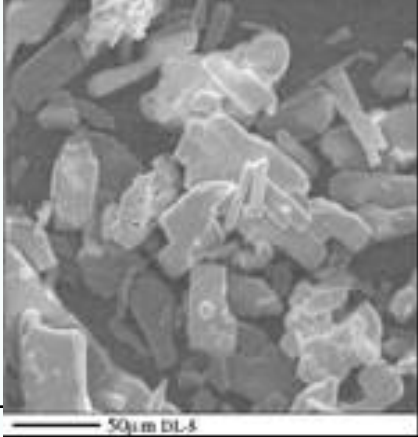
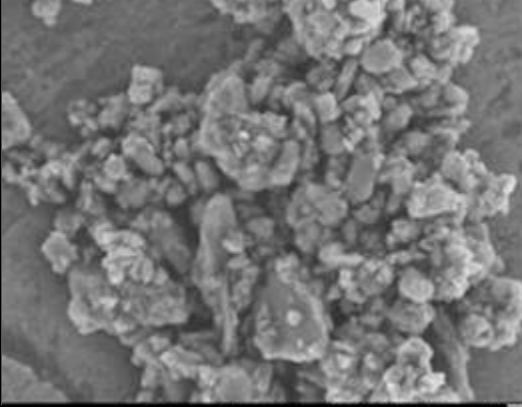


Al - PAP-2
 $\langle L \rangle \sim 30 * 1 \mu\text{m}$



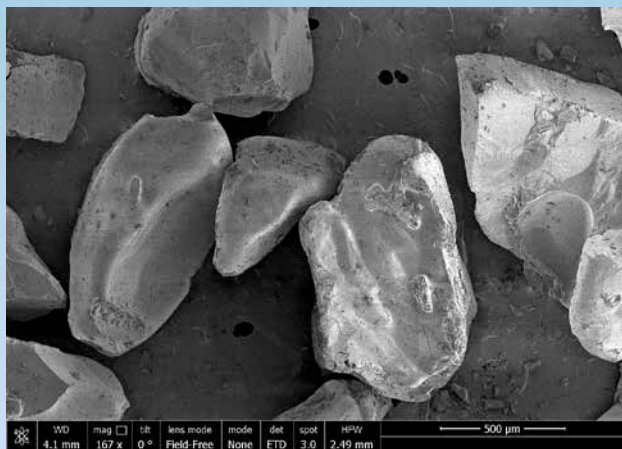
Al(N4), ($S=2.7 \text{ m}^2/\text{g}$)
 $\langle L \rangle \sim 0.5 * 21,3 \mu\text{m}$

Materials Tested

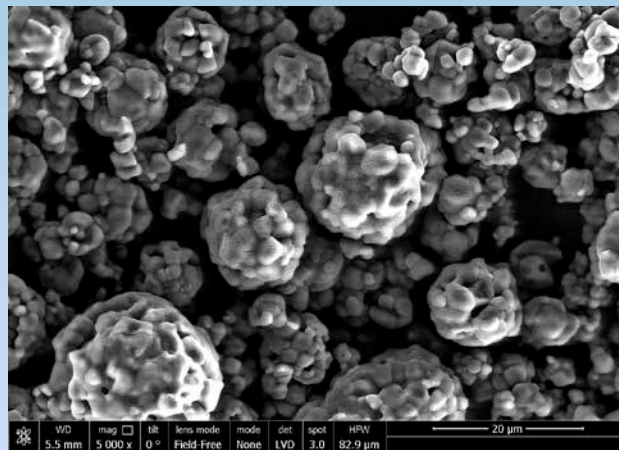
Teflon (F4-PN)	Teflon (FORUM)	MoO ₃	Nano-MoO ₃
			
<p>$\langle d_1 \rangle \sim 10 - 300$ nm (Most of particles) $\langle d_2 \rangle \sim 1.5 - 2.5$ nm</p>	<p>$\langle d \rangle \sim 0.6$ nm</p>	<p>$\langle d \rangle \sim 30$ nm</p>	<p>Preliminary activation - $\langle d \rangle \sim 60$ nm</p>

- Tested charges were prepared from the initial components by mixing in vibromill with consequent pressurizing.
- Mechanochemical activation was also used for mixture manufacturing

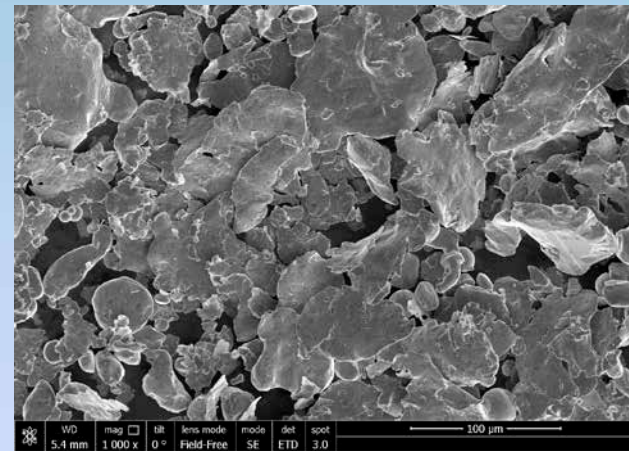
Materials Tested



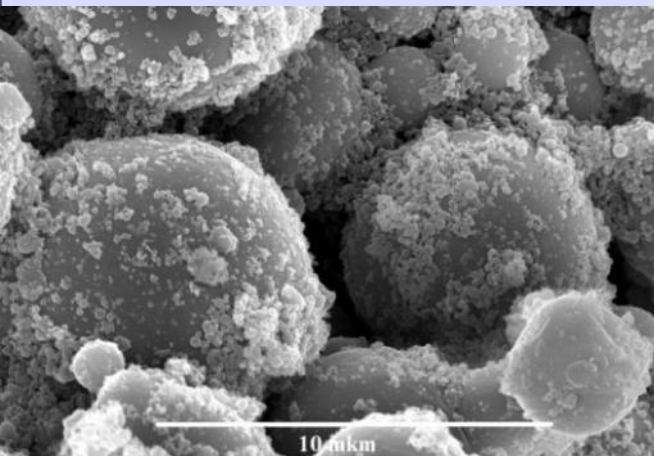
NH_4ClO_4
AP-1 $\langle d \rangle$ 500 ÷ 200 µm



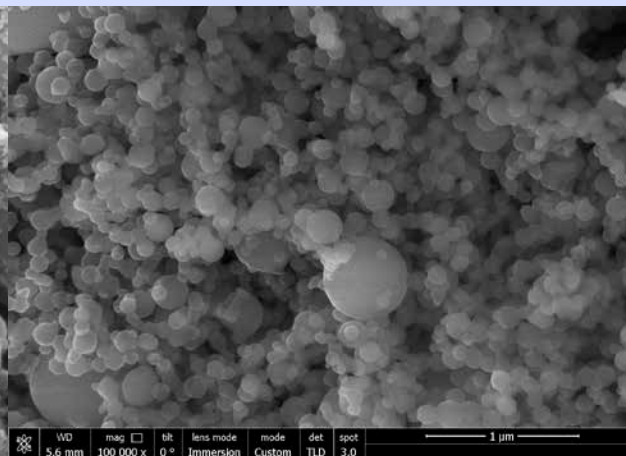
NH_4ClO_4
AP-2 $\langle d \rangle$ ~ 20 µm



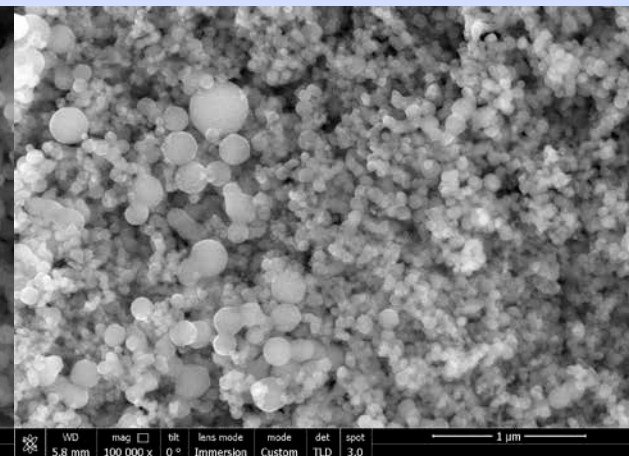
Al – PP-2
 $\langle L \rangle$ ~ 100*1 ÷ 5 µm



Al (8 m²/g) (*GNIICChTEOS*)
 $\langle d \rangle$ ~ 260 nm two fraction
3 ÷ 5 µm and 100 ÷ 300 nm



Alex (*Tomsk*)
 $\langle d \rangle$ ~ 100 ÷ 200 nm

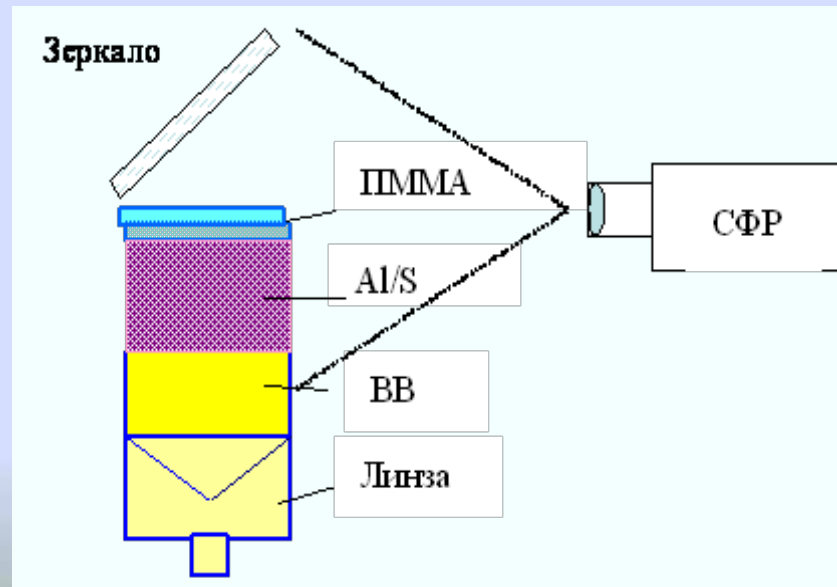
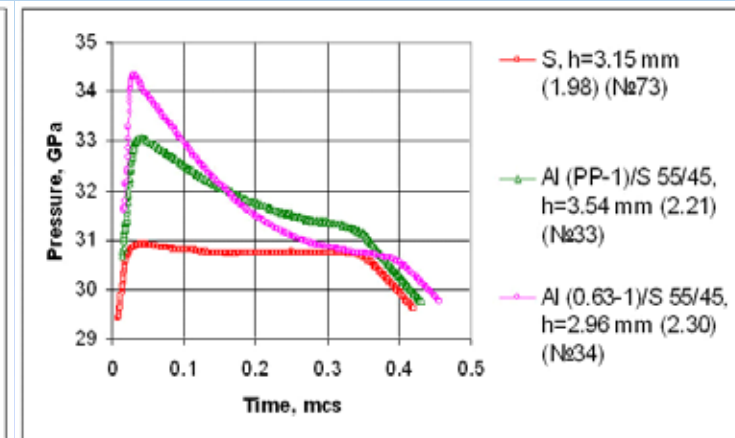
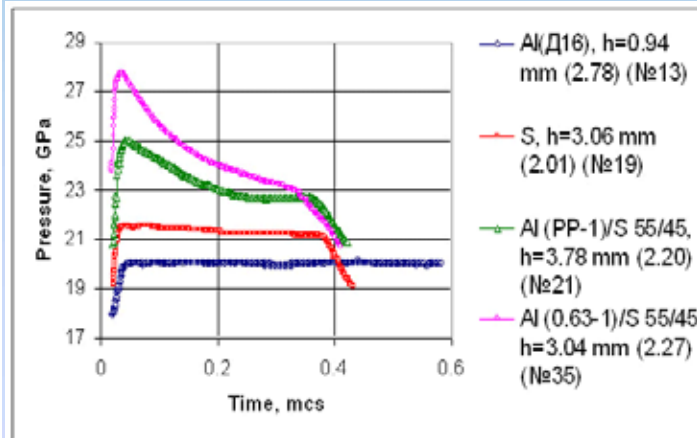
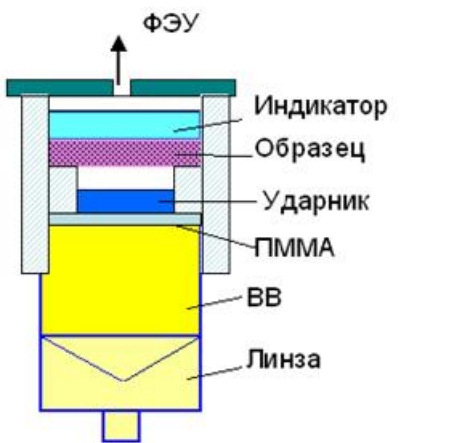


nAl (*INEP*)
 $\langle d \rangle$ ~ 100 nm

Ударно-индуцированная реакция в Al/S

$W = 3.61 \text{ км/с} - \text{CCl}_4$

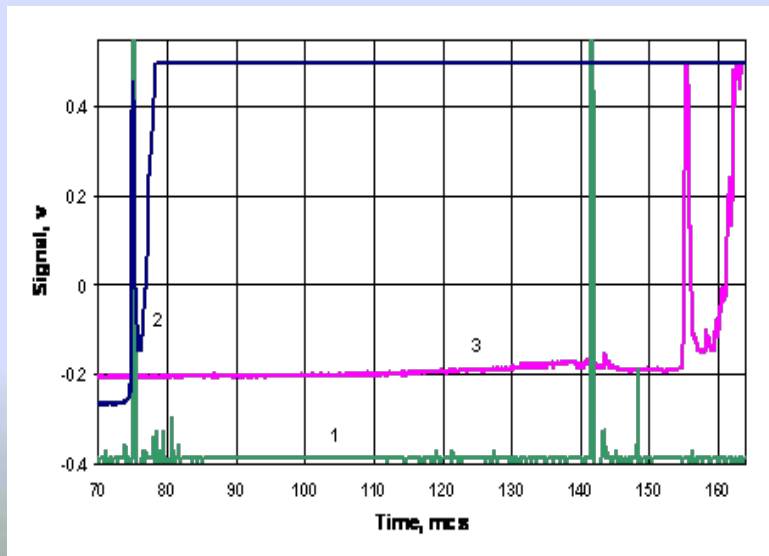
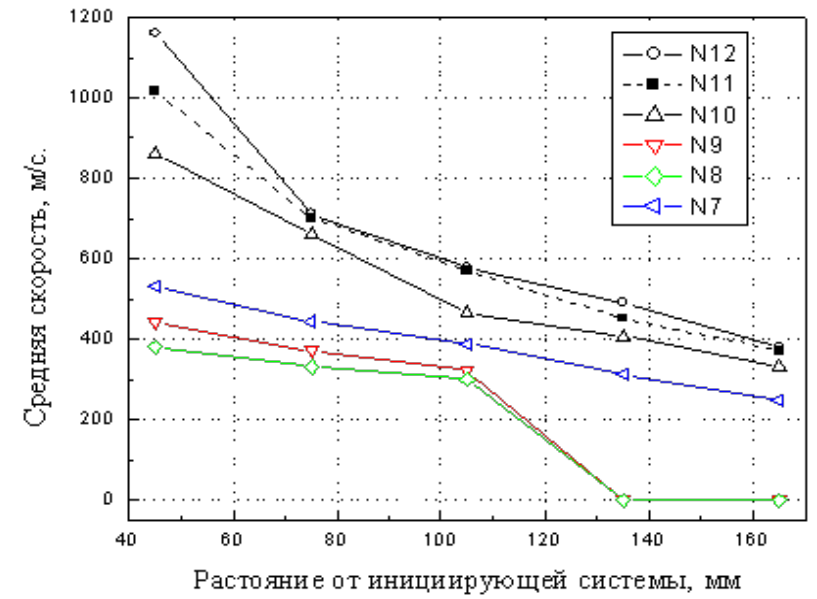
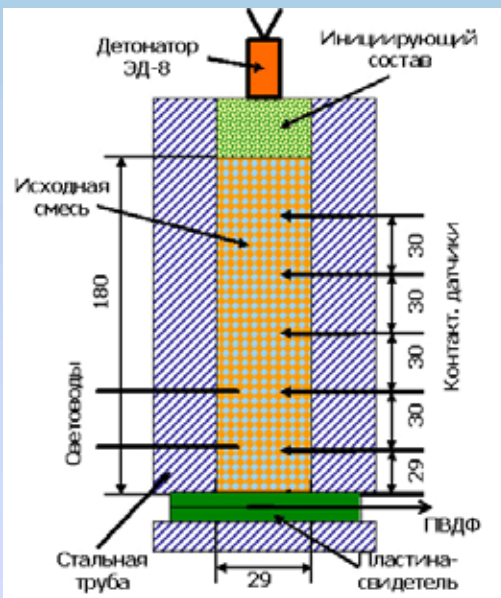
$W = 3.61 \text{ км/с} - \text{CHBr}_3$



В плотных образцах при мощном инициировании реакция быстро затухает

А.Ф. Беляев-
«...Детонацию надо инициировать детонацией...»

Затухающий режим реакции в Al/S



Затухающий режим в малоплотных образцах

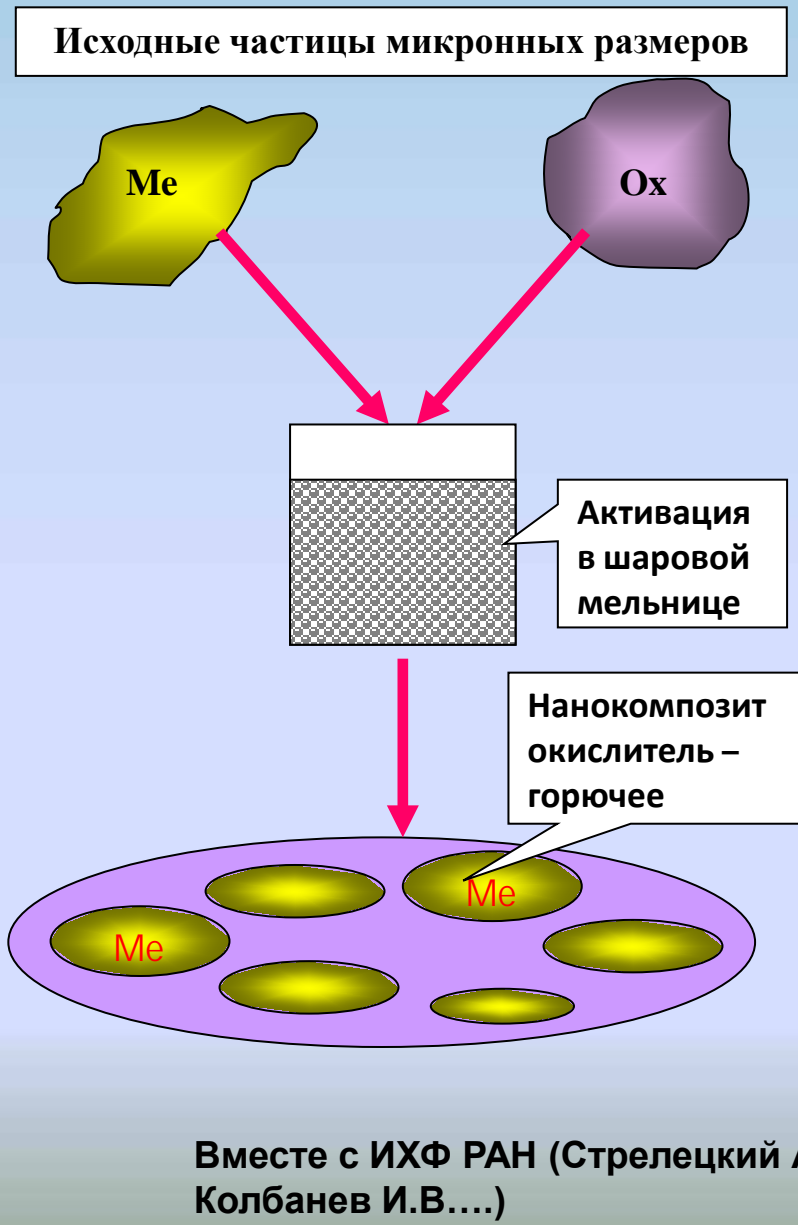
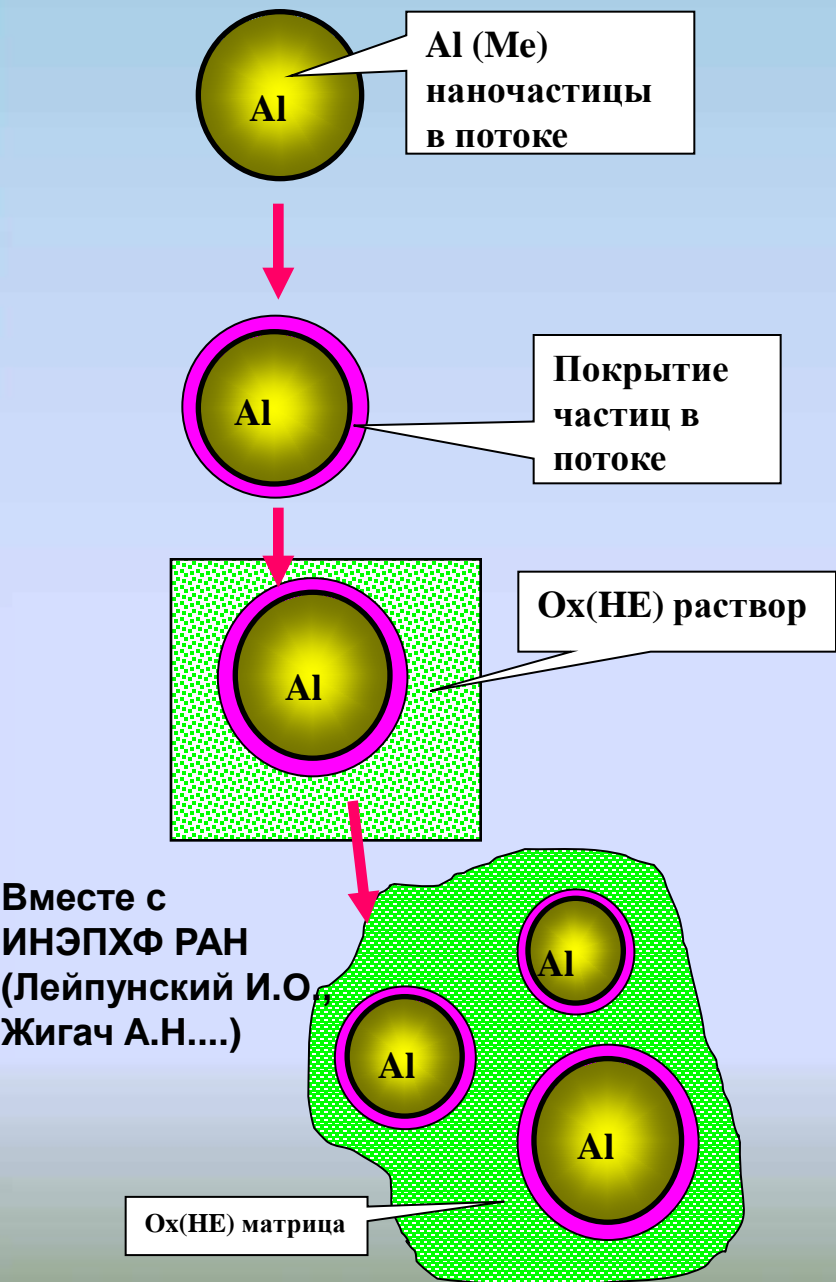


**Очаговый характер распространения
реакции**

По отпечаткам на пластинах-свидетелях

Оx(HE)-Metal наноконпозиты

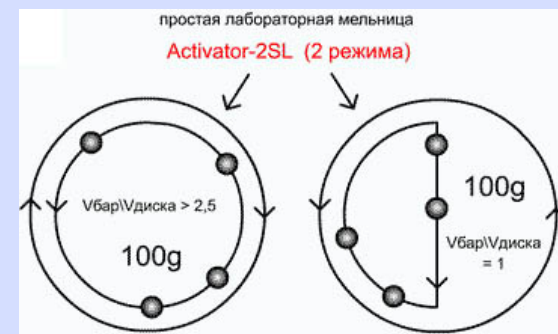
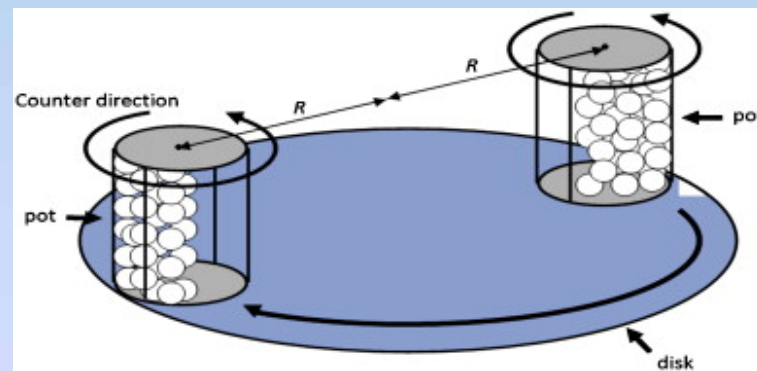
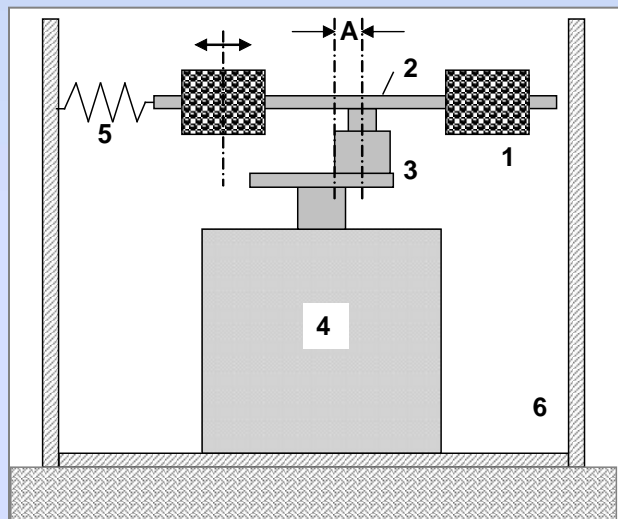
Механоактивированные КОМПОЗИТЫ



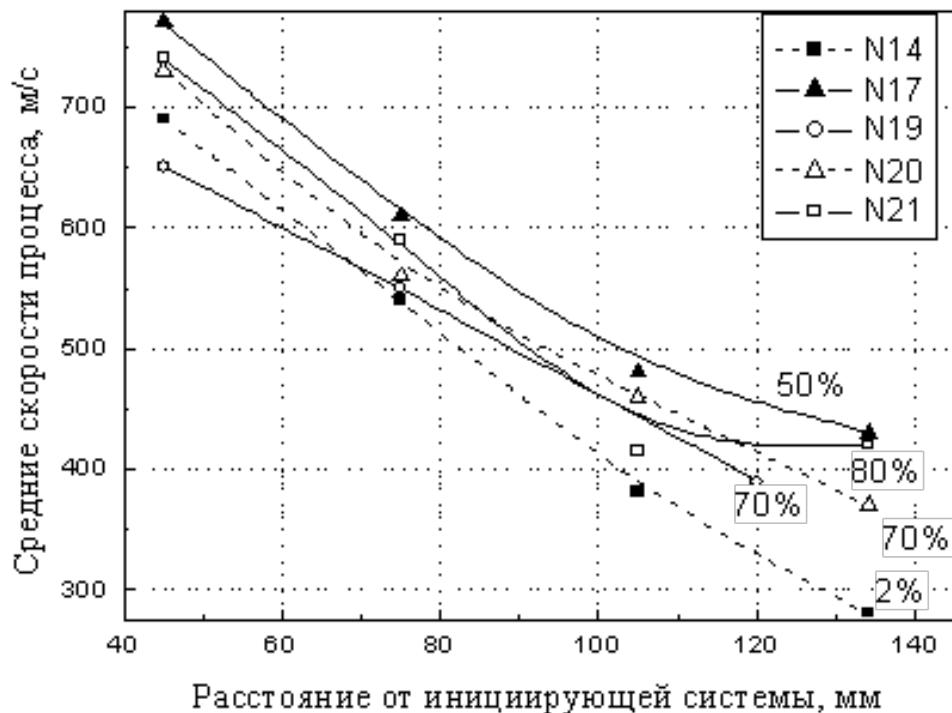
Аппараты для получения механоактивированных энергетических композитов (МАЭК)

планетарная мельница Активатор – 2SL

Вибрационная
мельница
Аронова



Активация Al/S (2001 г)



Использование УДА, добавок и механохимическая активация



№19 Al/S/Fe₂O₃ 41,4/48,6/10
ПАП-2 (27,6%) + УДА (7,4%) + АСД-4 (7%) $\delta = 70\%$



№ 21 Al/S/Fe₂O₃ 42/48/10 (активир. 1)
ПП-2 (26%) + ПА-3 (16%) $\delta = 80\%$

Лимитирующий фактор для скорости твердофазных реакций – эффективная поверхность контакта реагентов.
Механохимическая активация как способ повышения реакционной способности смесей окислитель – горючее

Condition of preparation Al vs Act. Dose

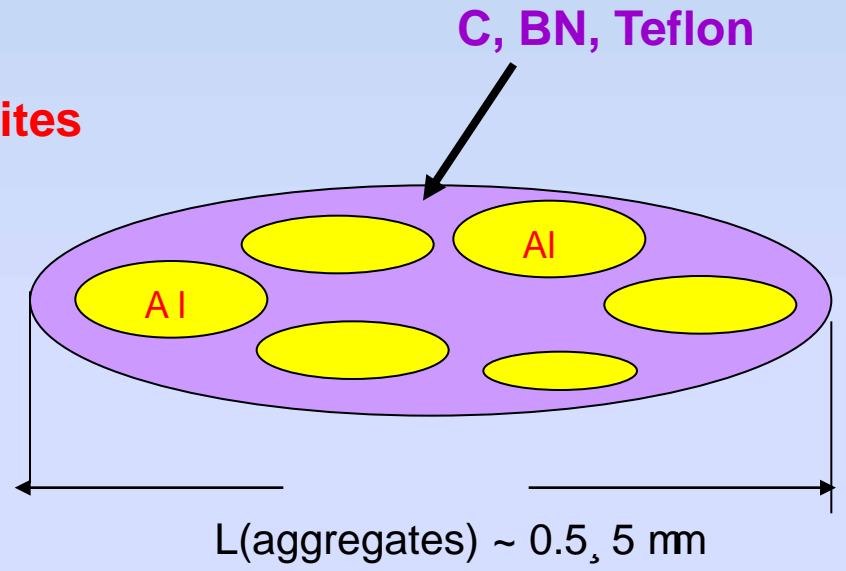
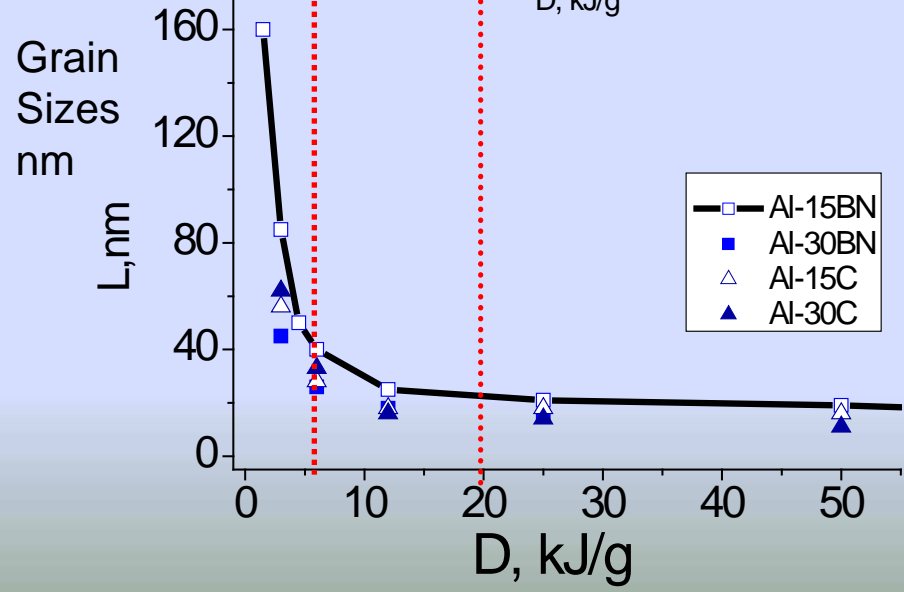
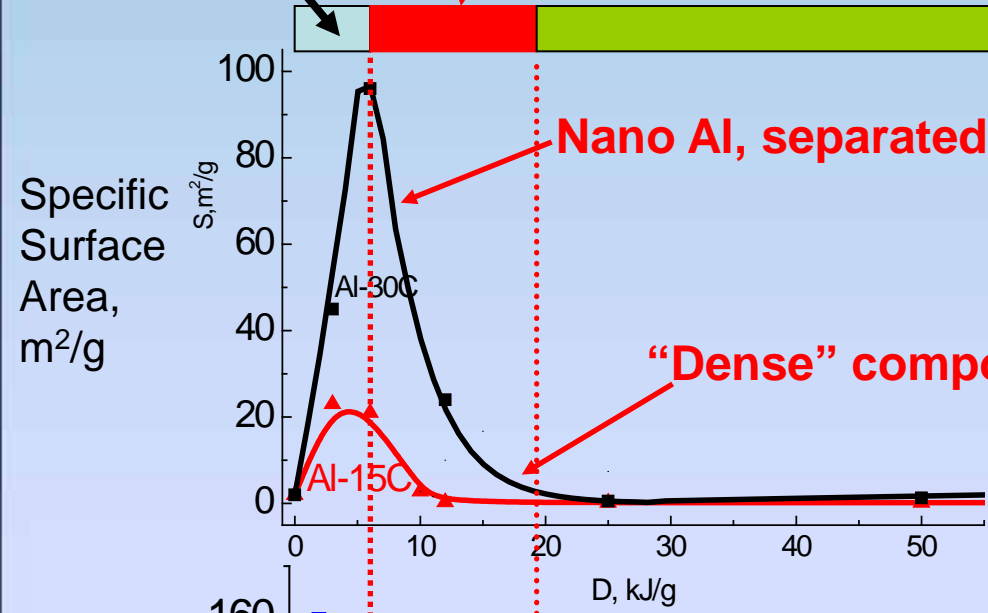
Nanocomposites formation

Destruction of components

Chemical interaction

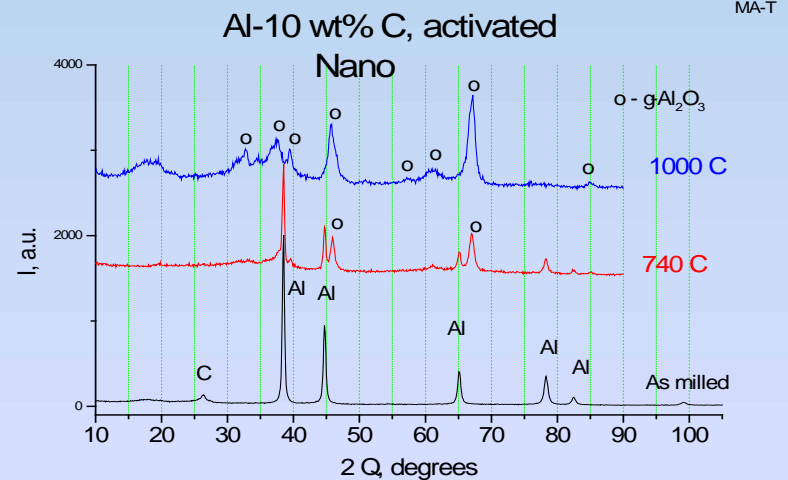
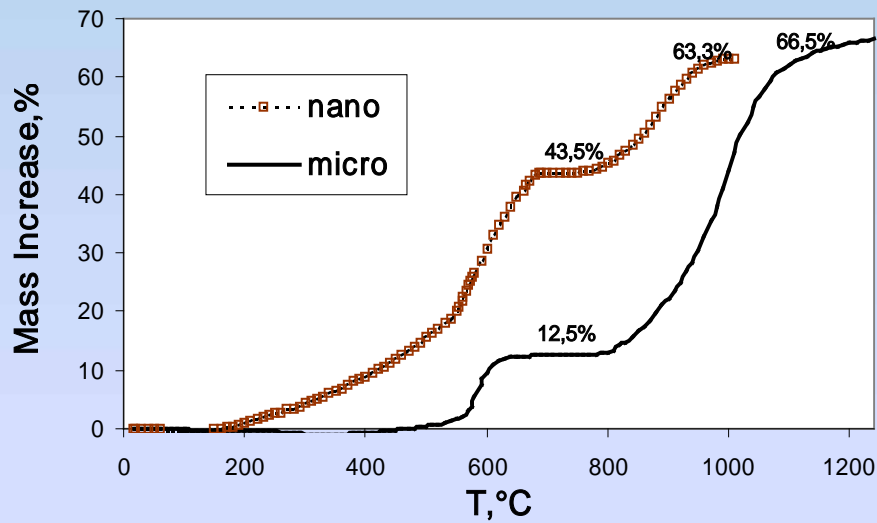
$$D = J \times t \text{ [kJ/g]}$$

(J – energy intensity of activator [W/g])



$$S = 3/(\rho R)$$

$$S \sim 1 \text{ m}^2/\text{g}$$



Quantitative analysis of XRD patterns

Sample	T, °C	Phase content, wt. %				
		C	Al	g-Al ₂ O ₃	a-Al ₂ O ₃	q-Al ₂ O ₃
90% Micron-sized Al/10% C	20	10	90	-	-	-
	740	10	65	20	-	-
	1000	-	9	28	52	11
Nano-sized activated Al	20	10	90	-	-	-
	740	-	24	76	-	-
	1000	-	-	100	-	-

Mechanochemically Activated Energetic Composites

Al/C, Al/BN, Al/B,
etc.

Me/MoO₃, Me/Teflon,
etc.

Cermets

**Materials for
combustion**



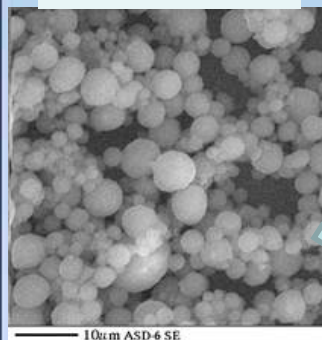
**Materials for
H₂ generation**



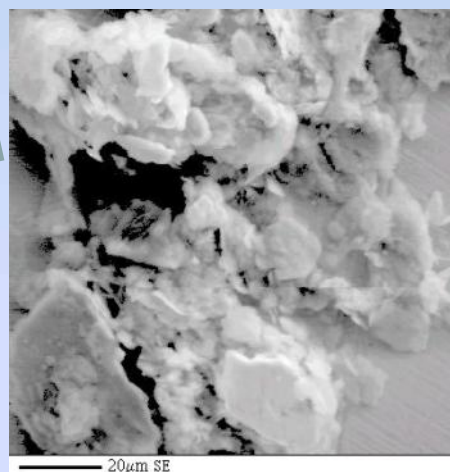
**New energetic
materials
(MAEC)**

Механоактивированные энергетические композиты (МАЭК) Me/Фторопласт

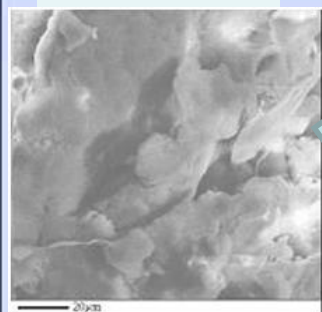
Al –ASD-6



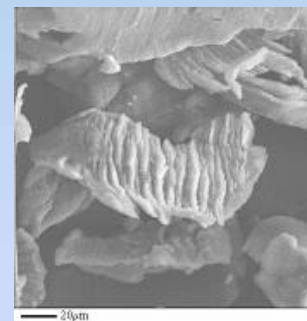
MAEC Al/Teflon



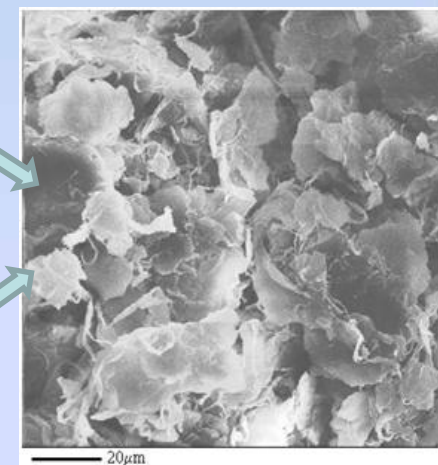
Teflon F4



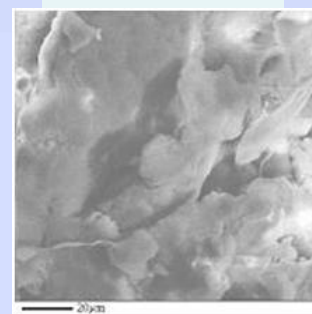
Mg –MPF-4



MAEC Mg/Teflon



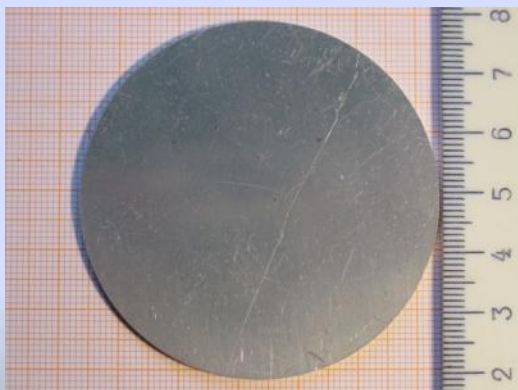
Teflon F4



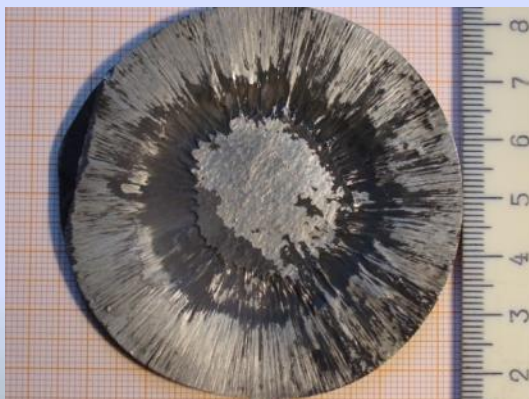
(МАЭК) Me/Фторопласт – слоистые композиты из фторопластовой матрицы с включениями металлических фрагментов

Детонация – сверхзвуковой процесс с постоянной скоростью
(скорость звука $C < 100$ м/с, $D = 800-1300$ м/с)

До опыта и после



Пластина
Dia = 60 мм



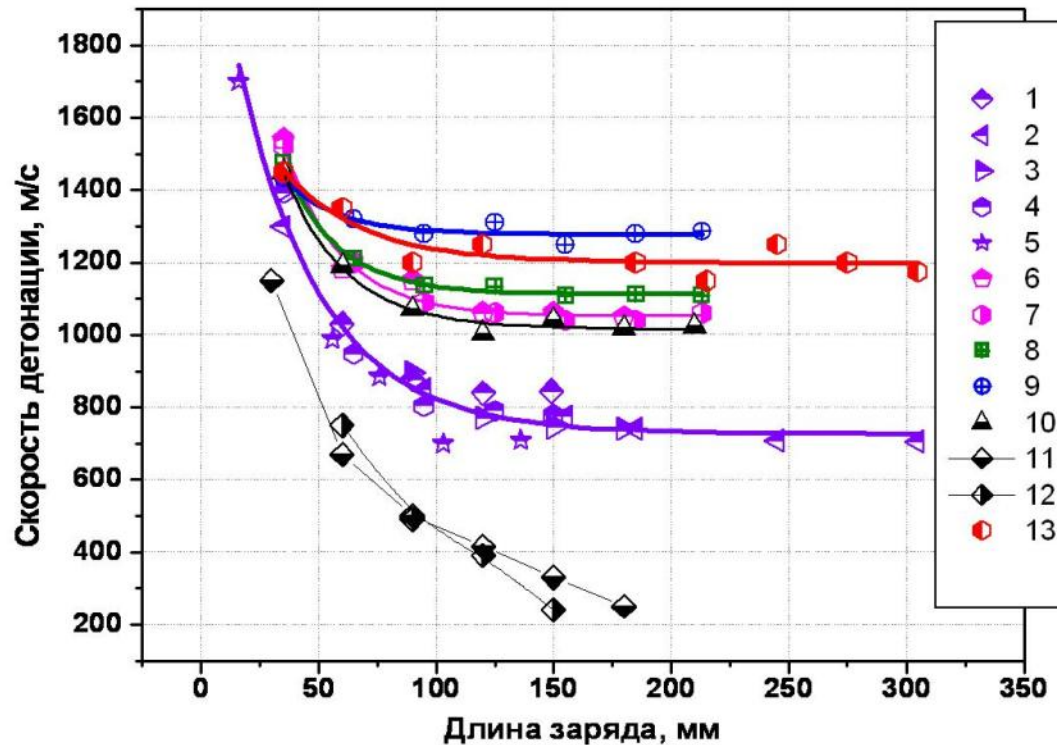
Пластина
Dia = 68 мм



Не зависит от газа в
порах, опыт с гелием

ДЕТОНАЦИЯ В МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА

Al/Фторопласт

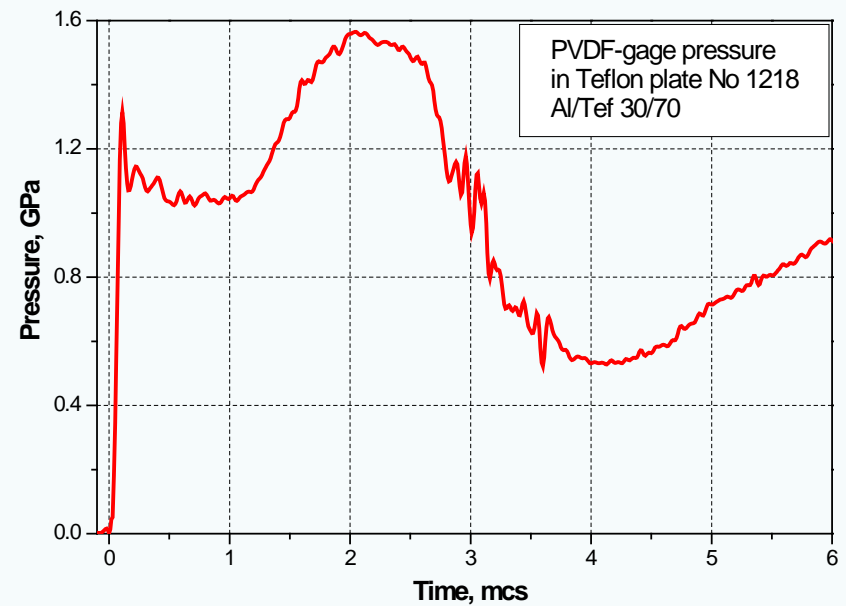
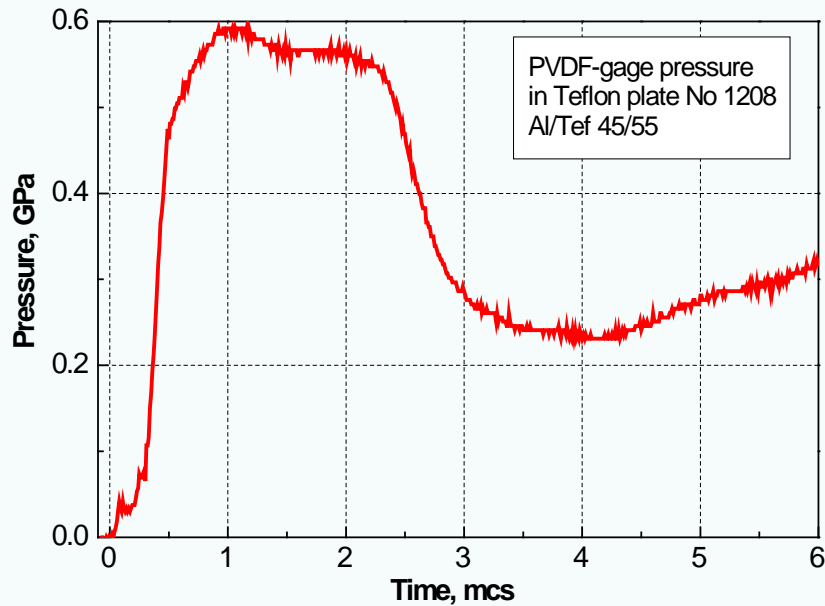


Зависимость скорости детонации от длины заряда для МАЭК Al/Tf. (стальная труба с внутренним диаметром 29 мм)

1 - 5 - Al/Tf 45/55 разной плотности (1 - 0,40 г/см³, 2 - 0,50, 3 - 0,48, 4 - 0,44, 5 - 0,49 в атмосфере гелия); 6, 7 - Al/Tf 35/65 (6 - 0,5 г/см³, 7 - 0,47); 8 - Al/Tf 30/70 (0,55); 9 - Al/Tf 25/75 (0,54); 10 - Al/Tf (Форум) 30/70 (0,80); 13 - Al/Tf 27/73 (0,59); сплошные линии - экспоненциальная экстраполяция данных; 11- Al/S/Fe₂O₃ 55/33/12 (0,81); 12 - Al/MoO₃ 45/55 (1,14).

45/55

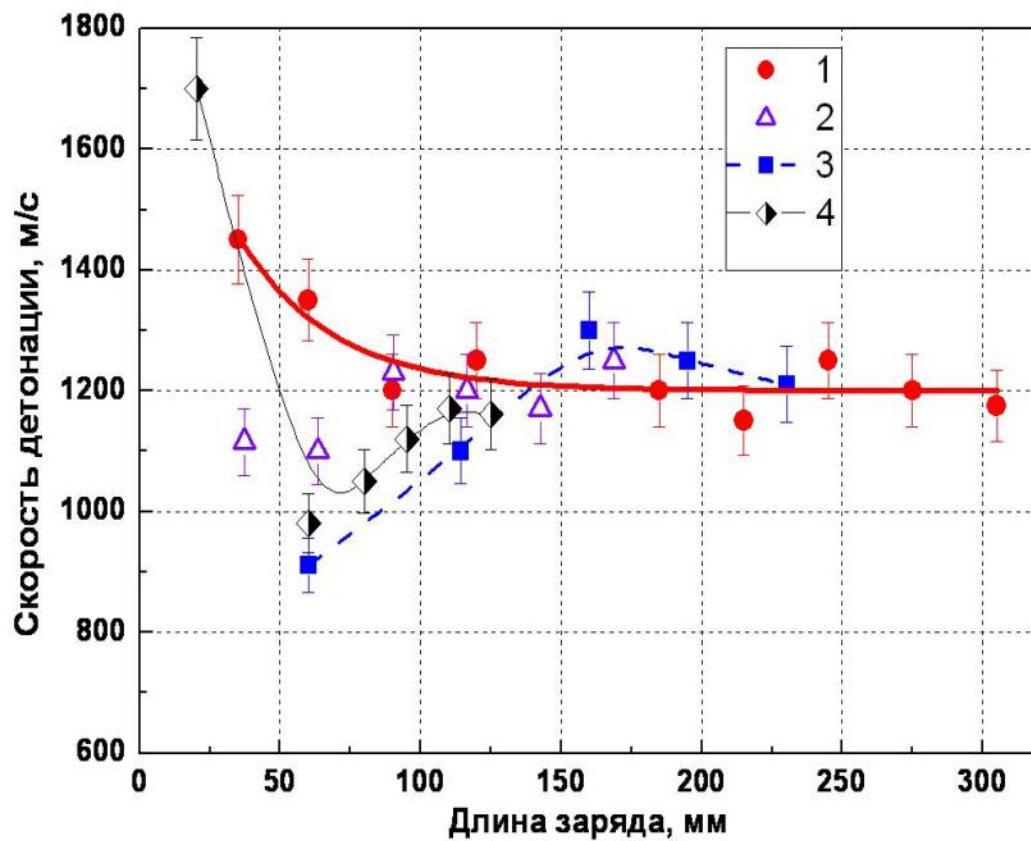
30/70



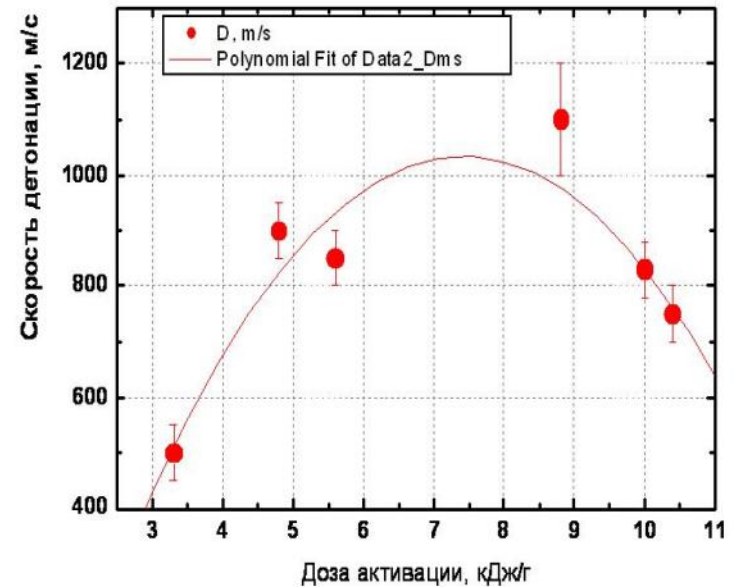
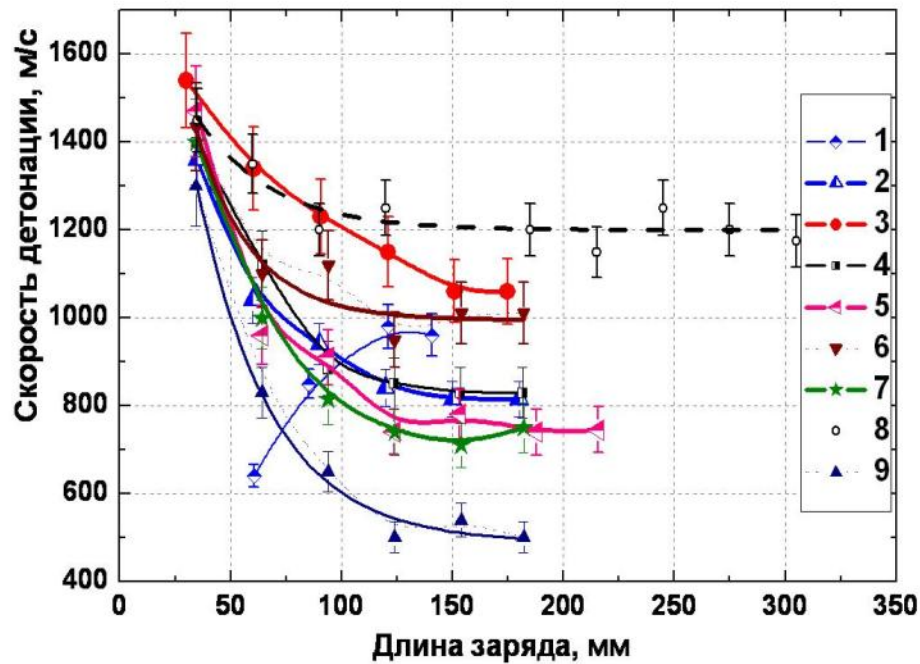
Сверхзвуковой поток продуктов детонации приводит к образованию ударных волн в пластинах-свидетелях с амплитудой 0,5 – 2,0 ГПа.

(Записи давления в пластинах-свидетелях из сплошного фторопласта. ПВДФ-датчик помещался между двух пластин при толщине первой – 2 мм)

Струйный механизм – при изменении диаметра от 10 до 35 мм
нет зависимости от диаметра и материала труб
(Al/Фторопласт 27/73 , $D = 1200$ м/с)



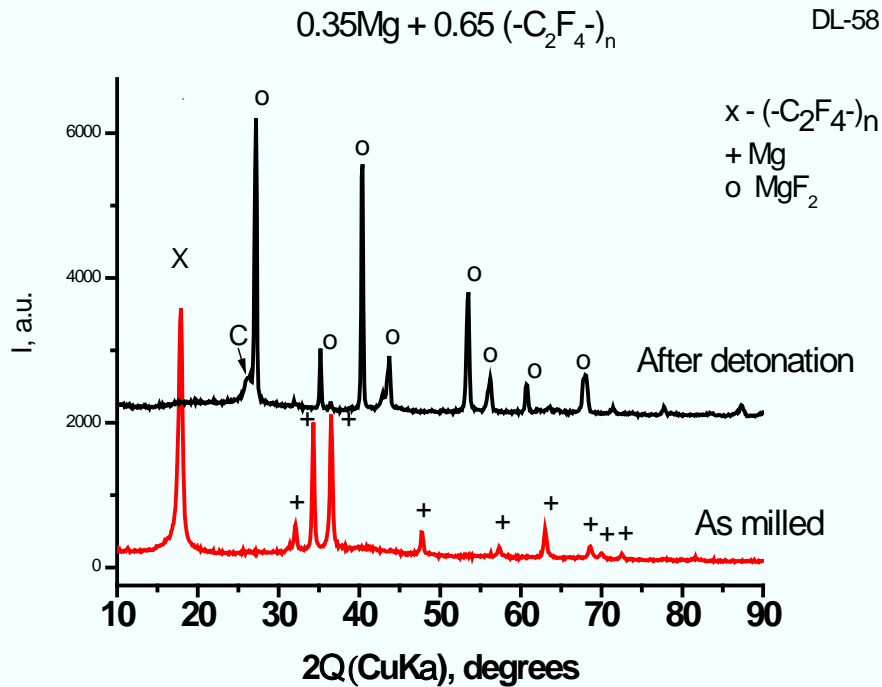
Детонация в МАЭК Mg/Фторопласт



- 1 - 35/65; Mg -МПФ-4, DL-41, Da = 4.8 кДж/г, D = 960 м/с;
- 2 - 35/65; Mg -МПФ-4, DL-42, Da = 5.6 кДж/г, D = 810 м/с;
- 3 - 35/65; Mg -МПФ-3, DL-58, Da = 8.8 кДж/г, D = 1100 м/с;
- 4 - 35/65; Mg -МПФ-3, DL-62, Da = 10.43 кДж/г, D = 830 м/с;
- 5 - 45/55; Mg -МПФ-3, DL-65, Da = 8.3 кДж/г, D = 750 м/с;
- 6 - 25/75; Mg -МПФ-3, DL-66, Da = 8.3 кДж/г, D = 1000 м/с;
- 7 - 35/65; Mg -МПФ-3, DL-67, Da = 10.0 кДж/г, D = 750 м/с;
- 9 - 35/65; Mg -МПФ-3, DL-78, Da = 3.3 кДж/г, D = 500 м/с;
- 8 - Al/Tf 27/73; Da = 6.0 кДж/г, D = 1200 м/с.

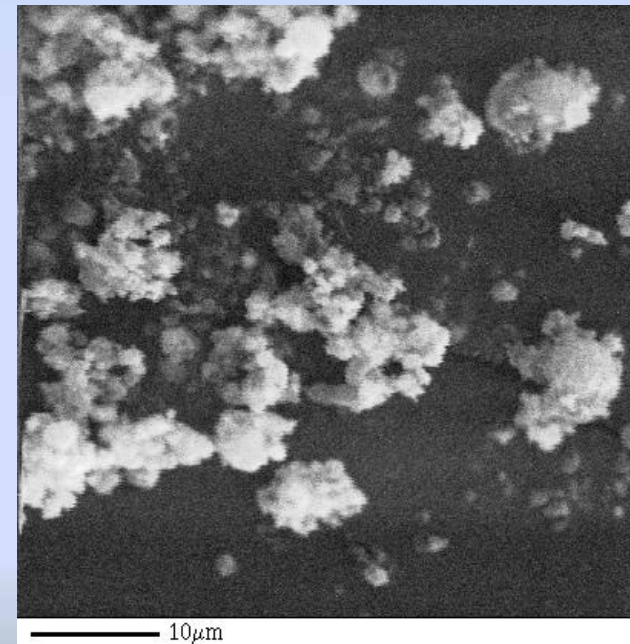
Зависимость скорости детонации от дозы активации для МАЭК Mg/Tf 35/65

X-ray + SEM analysis of Mg/Teflon detonation products



Phase composition of products:
MgF₂, C, traces of Mg and MgO

SEM of product – MgF₂



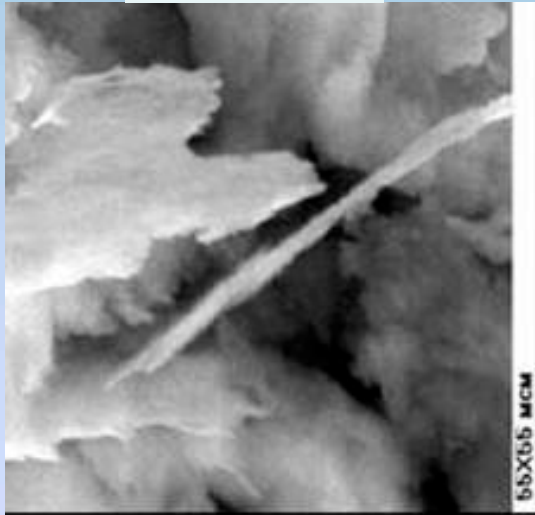
S(BET)=25 m²/g



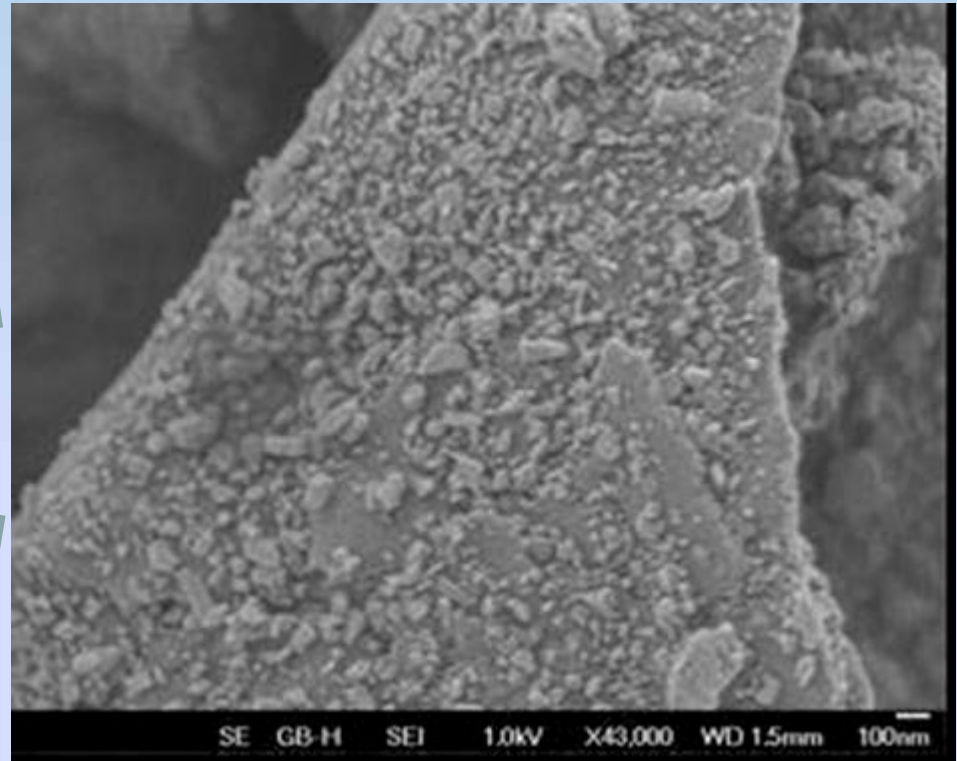
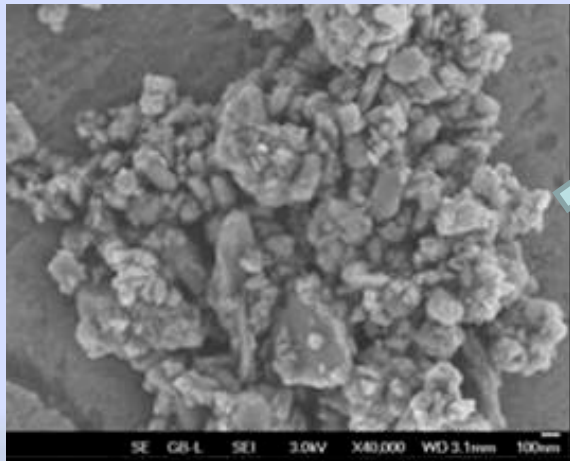
L (MgF₂) ~ 80 nm

MAEC $\text{Al} + \text{CuO}$, $\text{Al} + \text{WO}_3$, $\text{Al} + \text{MoO}_3$, $\text{Al} + \text{Bi}_2\text{O}_3$

Al-PAP-2



Nano MoO_3



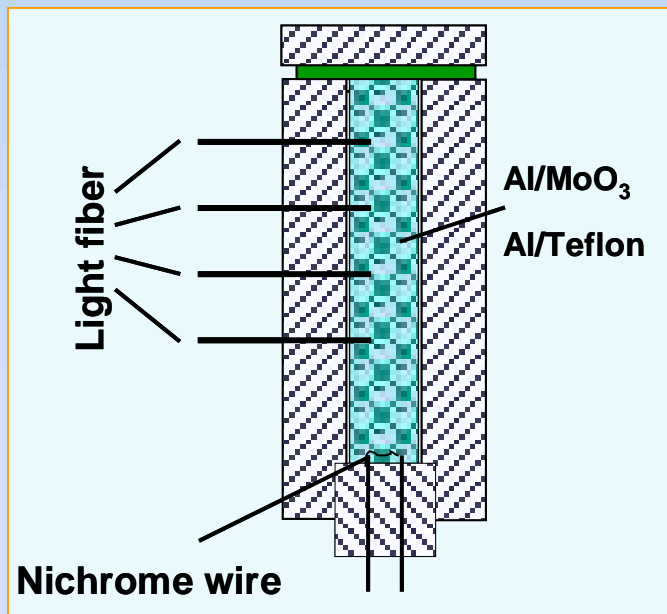
Self-accelerating combustion regime with transition to explosion obtained for low-dense mixtures Al/MoO_3
For usual mixtures burning rate $u < 1 \text{ m/s}$
Mechanoactivated mixtures $u > 400 \text{ m/s}$

Combustion of Al/MoO₃ and Al/Teflon with Transition to Explosion

Mechanochemical activation greatly raise the chemical activity of the mixtures. Self-accelerating combustion regime with transition to explosion was obtained for mixtures Al/MoO₃

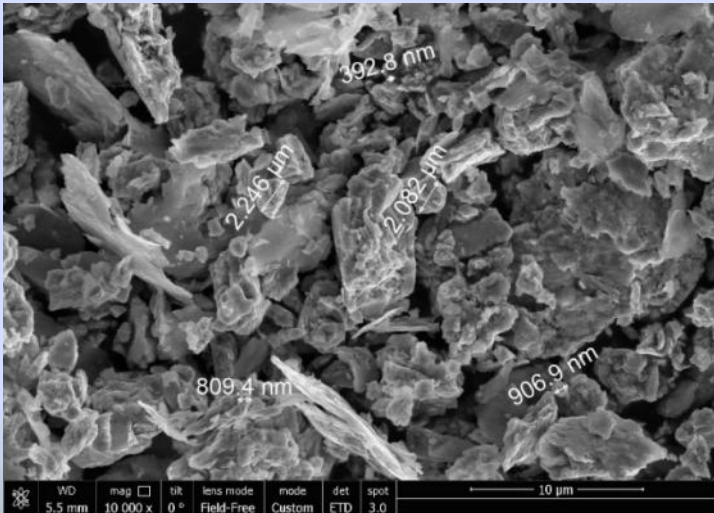
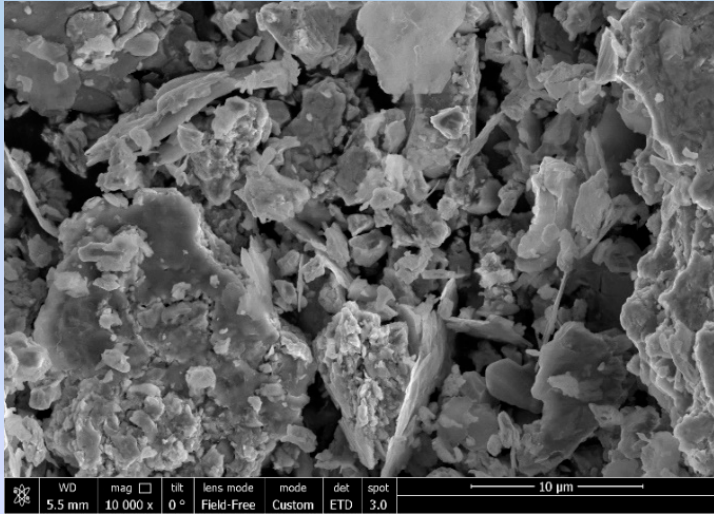
Usual mix $u < 1 \text{ m/s}$ \longrightarrow Mechanochemical activation $\longrightarrow u = 120 \div 400 \text{ m/s}$

Burning Rate in Low-dense samples



Particles type	Activation doze, kJ/g	Charge density, g/cc	d, mm	u_1 , m/s
Al/MoO₃ 45/55				
PP-2	0	1.15	8.5	0.19
№1	0.72	1.16	8.5	415
Al/CuO 19/81				
PP-2	2.2	1.59	7	670
PP-2	1.77	1.60	6	460
Mg/ MoO₃ 34/66				
MPF-3	2.9	1.04	8	285
Si/ KClO₄ 30/70				
nano-Si	Planetary mill 30 min	0.56	6	640
Si/ KClO₄ 40/60				
nano-Si	Planetary mill 50 min	0.73	6	180

МАЗК Al/CuO



Состав смеси:

Al+CuO (19/81 по массе)

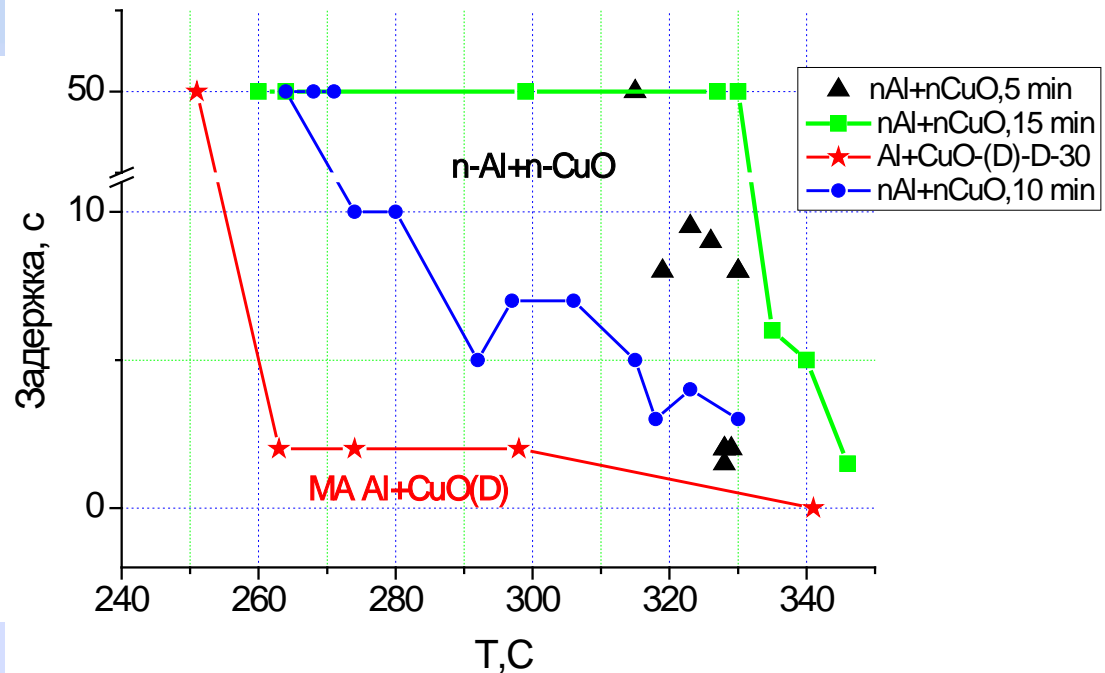
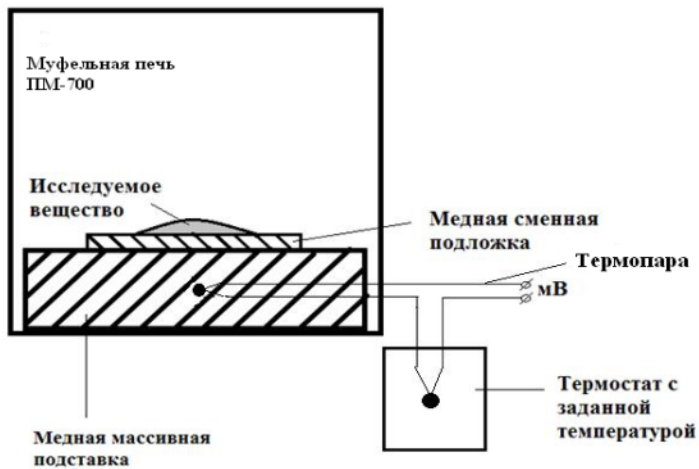
на основе алюминиевой пудры ПП-2л

Механоактивация:

- от 2 до 20 минут;
- Оптимальное время 8 мин (вибр.мелн.);
4 мин (планетарн.мельн.)
- Механоактивация приводит к **снижению температуры вспышки** смеси и образованию **кластеров** из исходных компонентов
- Контактная поверхность компонентов в кластерах носит характер **локальных очагов**

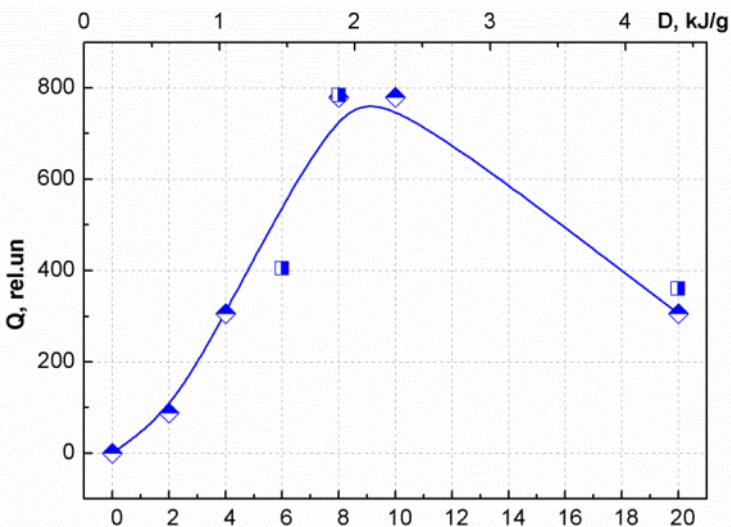
МАЭК Al/CuO

Температура воспламенения горячей поверхностью
для активированных составов – 260-350 С

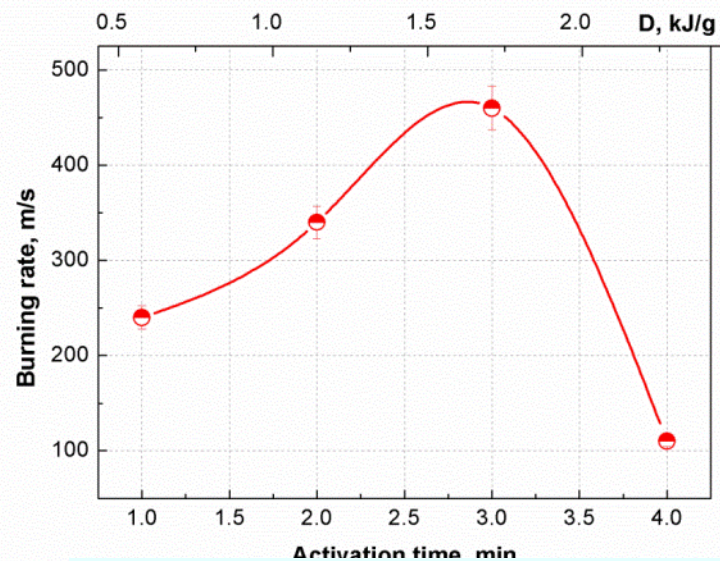


Минимальное время задержки МАЭК на основе пудры ПП-2
и микронного CuO время активации (вибр.мелн.) – 8 мин

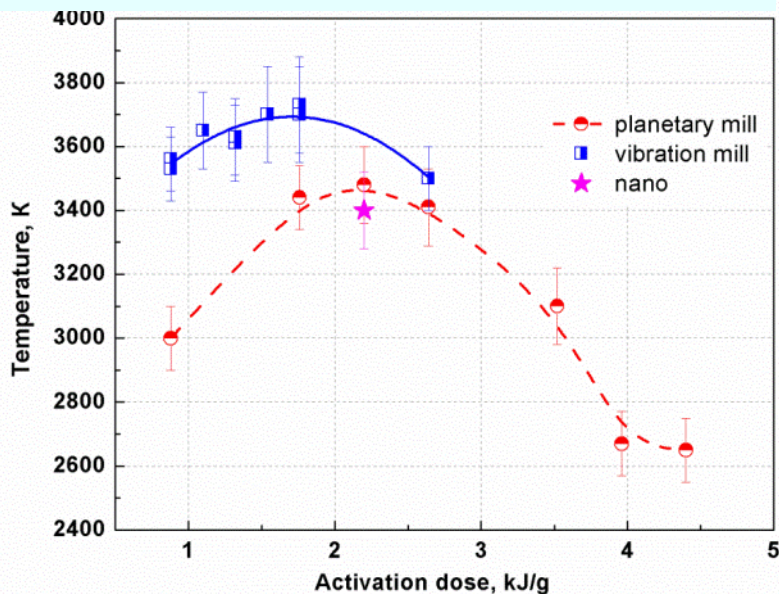
МАЭК Al/CuO 19/81



Относительный тепловой эффект Al/CuO(vibration mill) at 550-700 ° C от Времени активации (дозы)



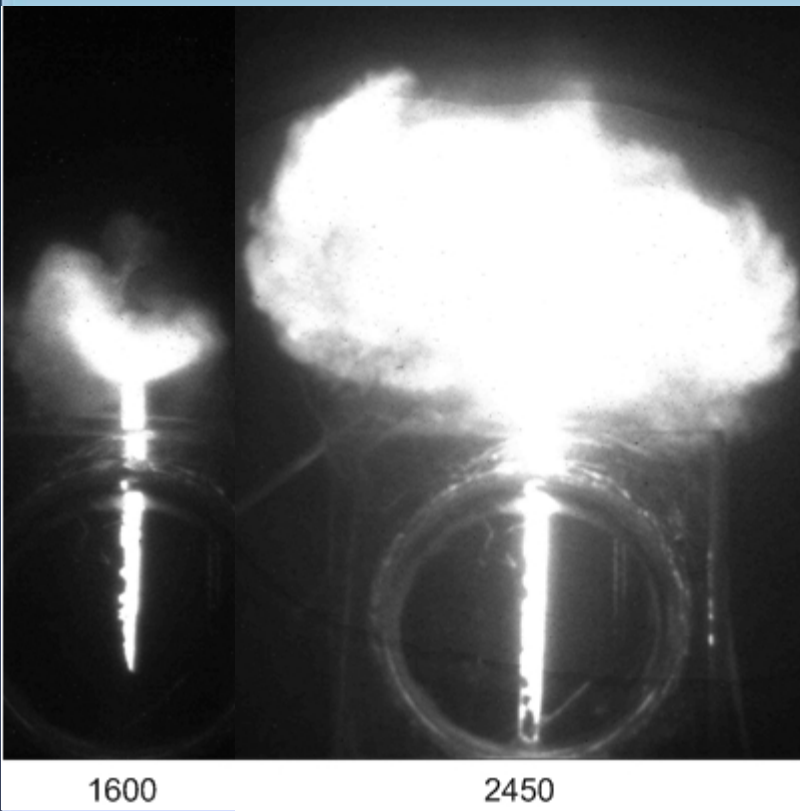
Скорость горения Al/CuO (planetary mill) от Времени активации (дозы) (пластиковая трубка 6 мм)



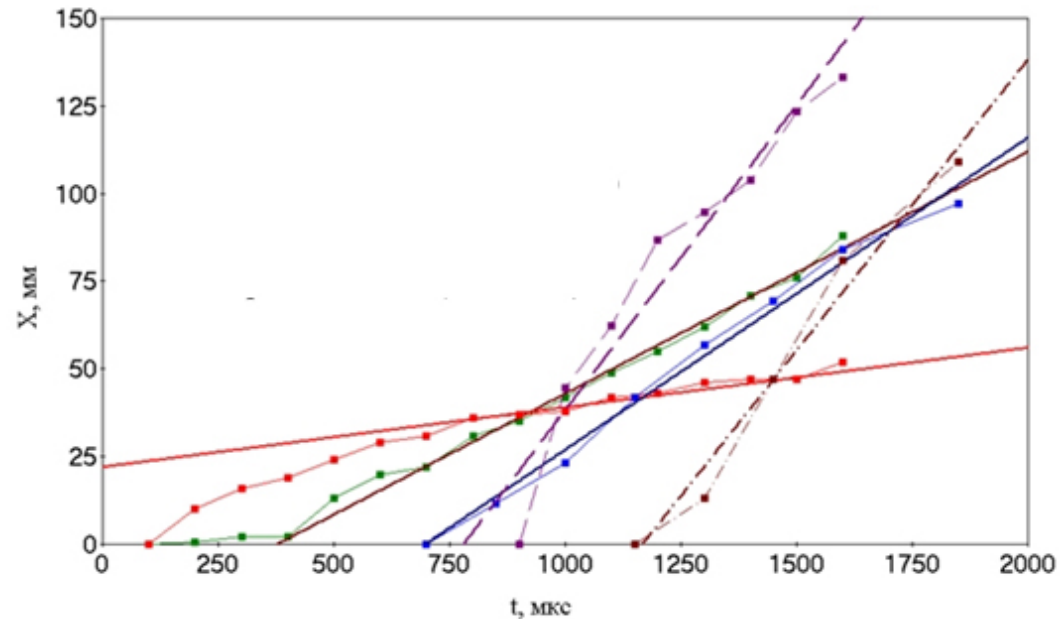
Яркостная температура Al/CuO от Дозы активации

Al/CuO оптимальные условия
 Время активации (Доза)
 Вибрационная мельница = 8-10 мин (1.8 кДж/г)
 Планетарная мельница = 3-4 мин (1.8 кДж/г)

Горение Al/CuO



Скорости горения низкоплотных составов Al/CuO в трубках разного диаметра от 20 до 800 м/с в зависимости от времени активации и размера исходных частиц



Ударно-волновое инициирование реакции в термитных смесях

динамика свечения светящегося облака продуктов реакции в запреградном пространстве при ударно-волновом нагружении механоактивированных термитных смесей $\text{Hf} + (-\text{C}_2\text{F}_4-)$; $\text{Al} + \text{CuO}$; $\text{Al} + \text{WO}_3$; $\text{Al} + \text{MoO}_3$ и $\text{Al} + \text{Bi}_2\text{O}_3$

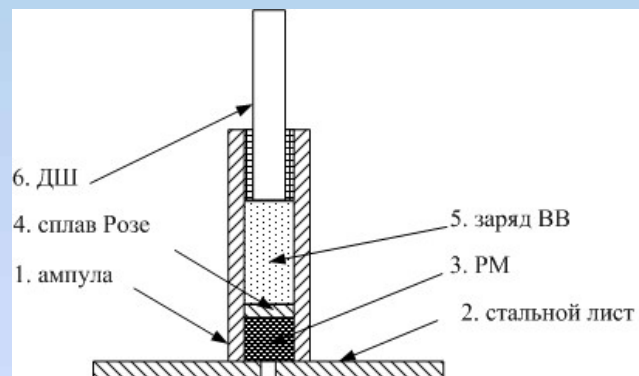


Рис. 1 Экспериментальная сборка для исследования реакции ПМ в запреградном пространстве при ударно-волновом инициировании

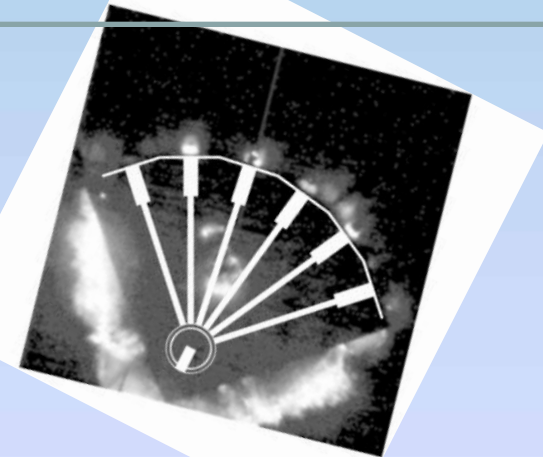
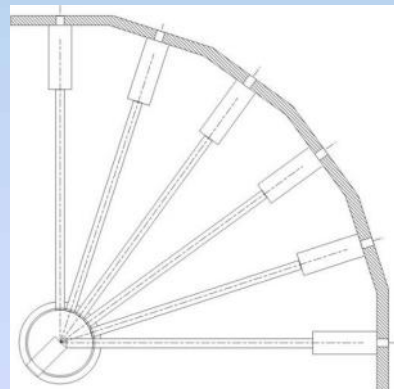


Рис. 2 Схема сборки и кадры фотосъемки области свечения продуктов химического превращения ПМ

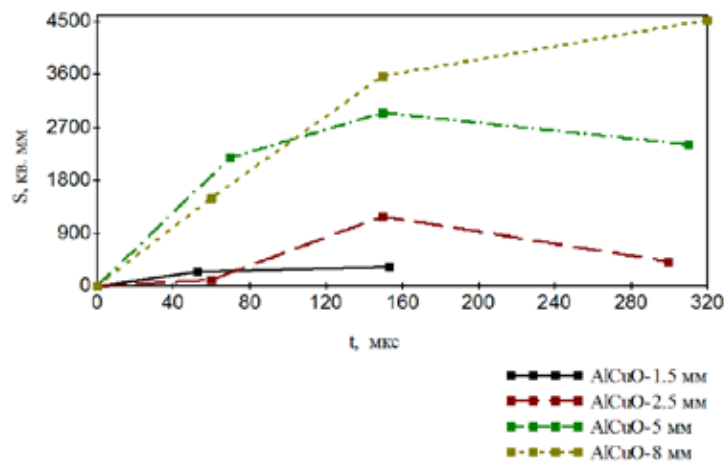


Рис. 3 Изменение площади сечения светящегося облака продуктов $\text{Al} + \text{CuO}$ за преградой с диаметрами отверстий 1,5; 2,5; 5; и 8 мм

По совокупности полученных данных наиболее интенсивно ударно-индуцированная реакция протекает в механоактивированных смесях $\text{Al} + \text{CuO}$ и $\text{Al} + \text{MoO}_3$.

Наибольший световой эффект – $(\text{Al} + \text{CuO}) + (\text{Hf} + \text{фторопласт})$.

Ударно-волновое инициирование Al/CuO

- При УВ инициировании формируется поток продуктов с начальной скоростью > 800 м/с.
- Измерения проводимости и анализ продуктов показали присутствие в потоке разреженной плазмы продуктов реакции с большим количеством наночастиц
- Температура в облаке продуктов > 3600 К
- Удельное сопротивление $\approx 10^7$ Ом*мм²/м

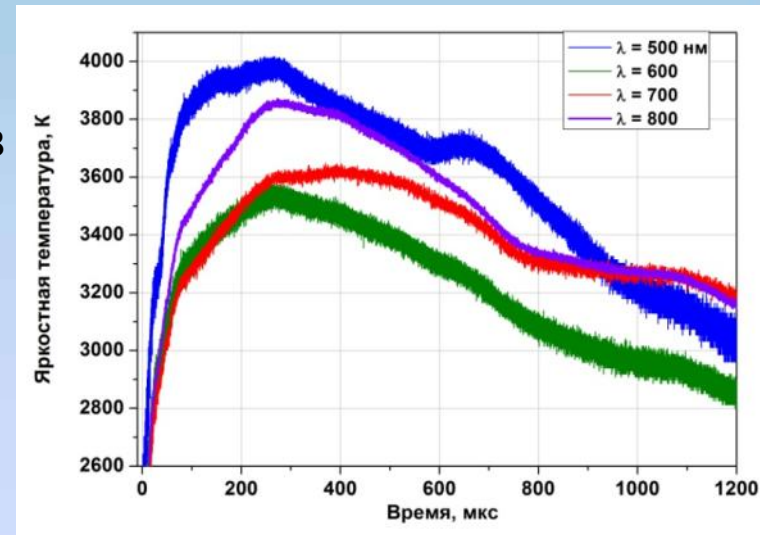
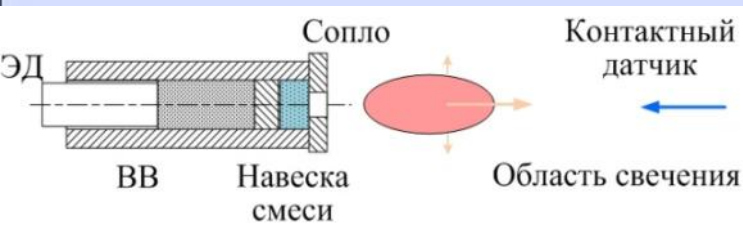
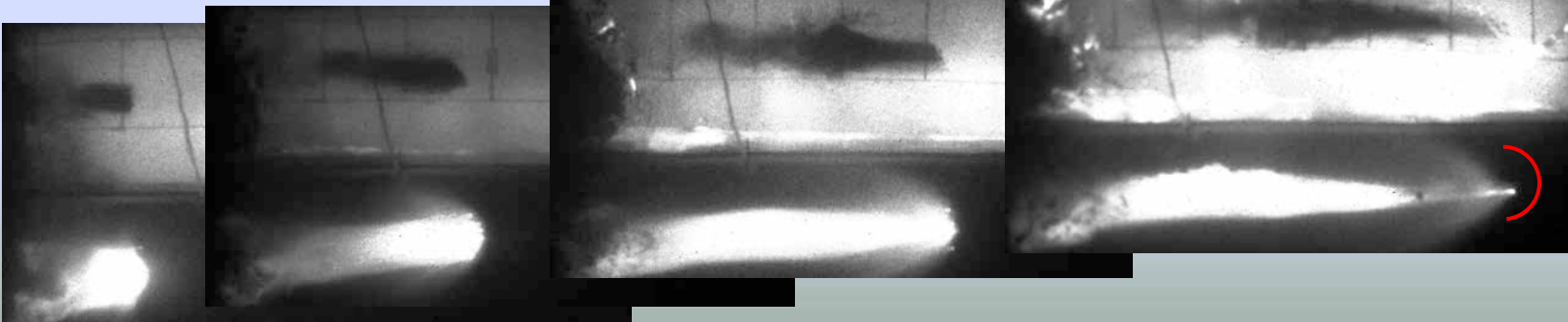


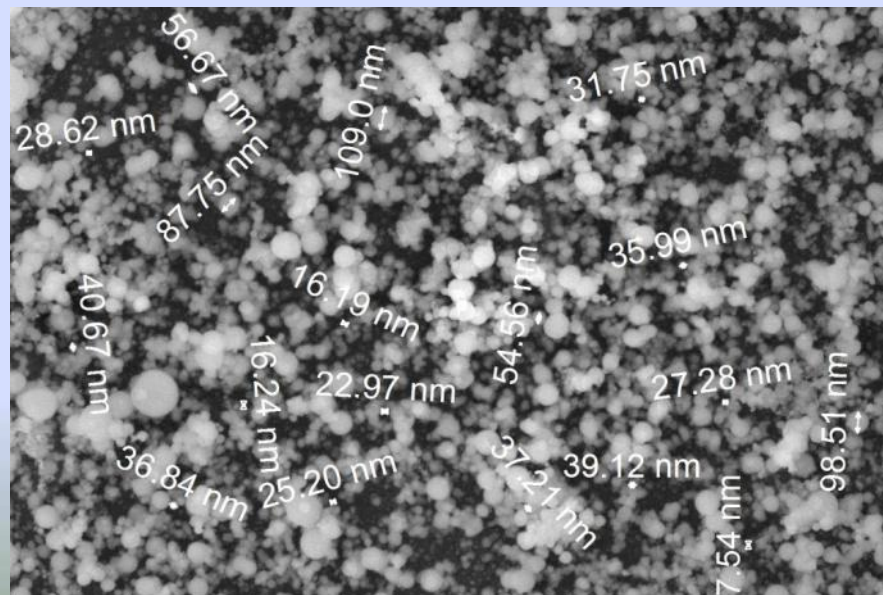
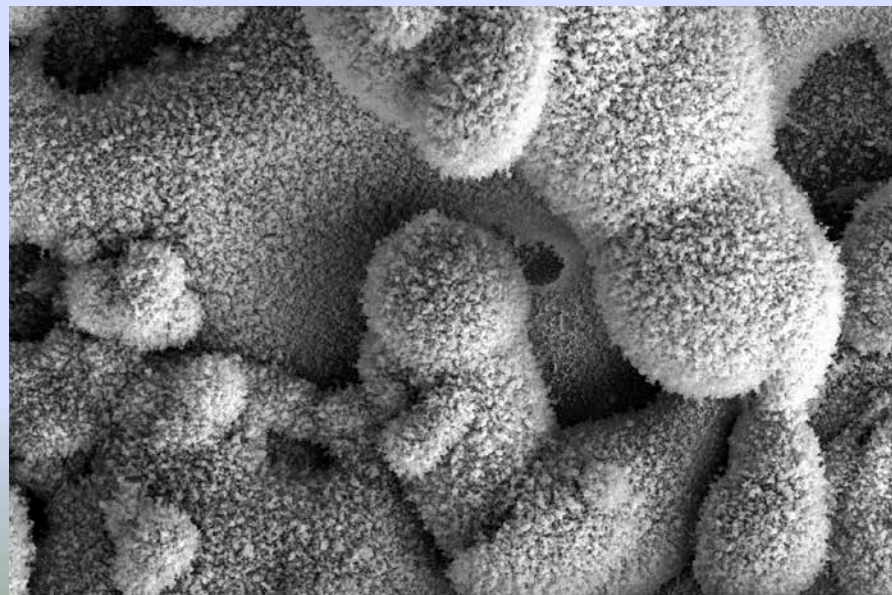
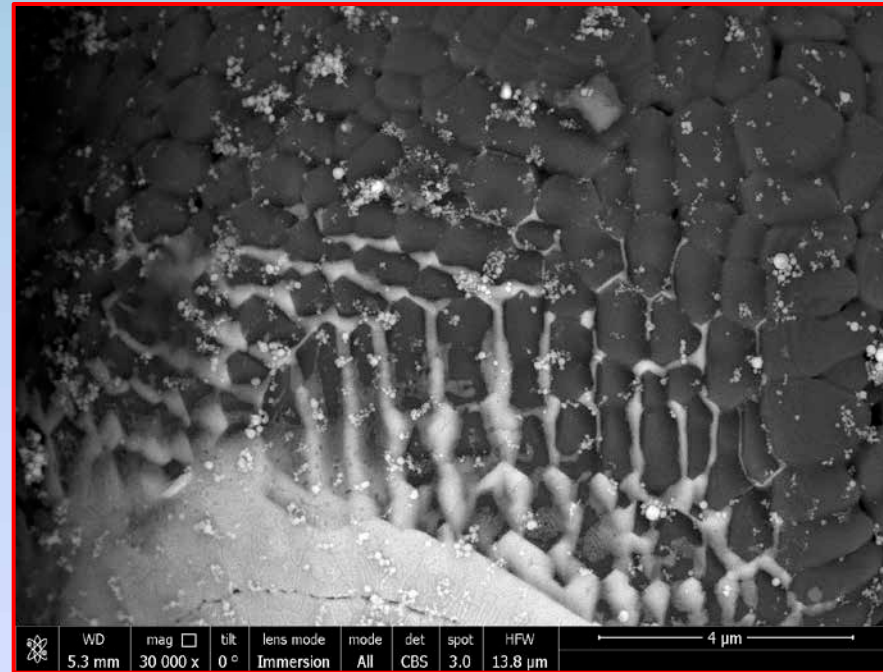
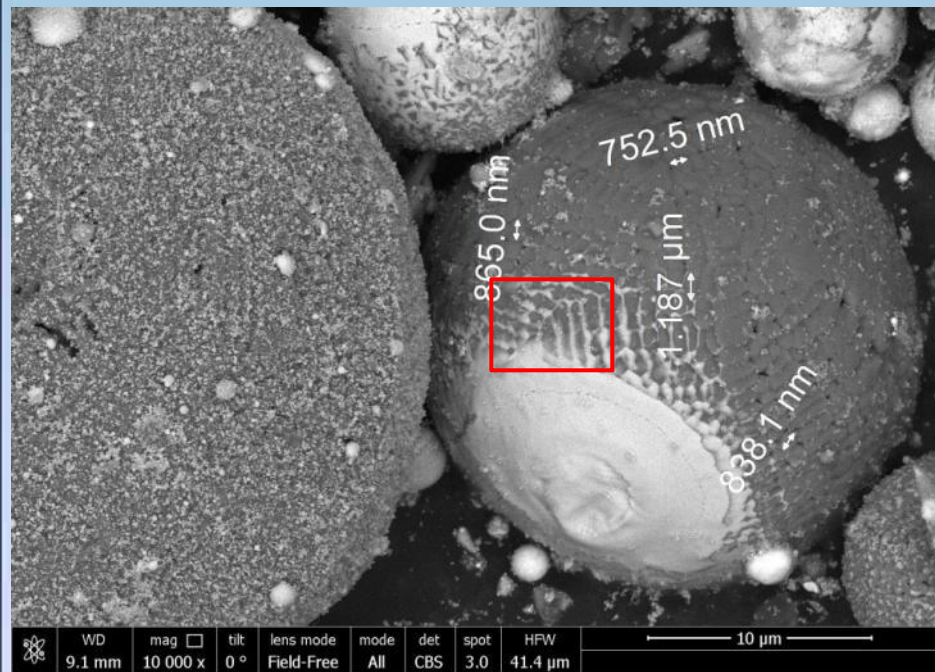
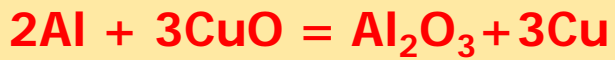
Схема сборки и кадры фотосъемки потока инертных частиц и области свечения продуктов реакции Al+CuO при УВ инициировании (между кадрами 350 мкс)



Вокруг струи продуктов - присоединенная волна излучающей плазмы

Инертная смесь
LiF/CuO
Al/CuO



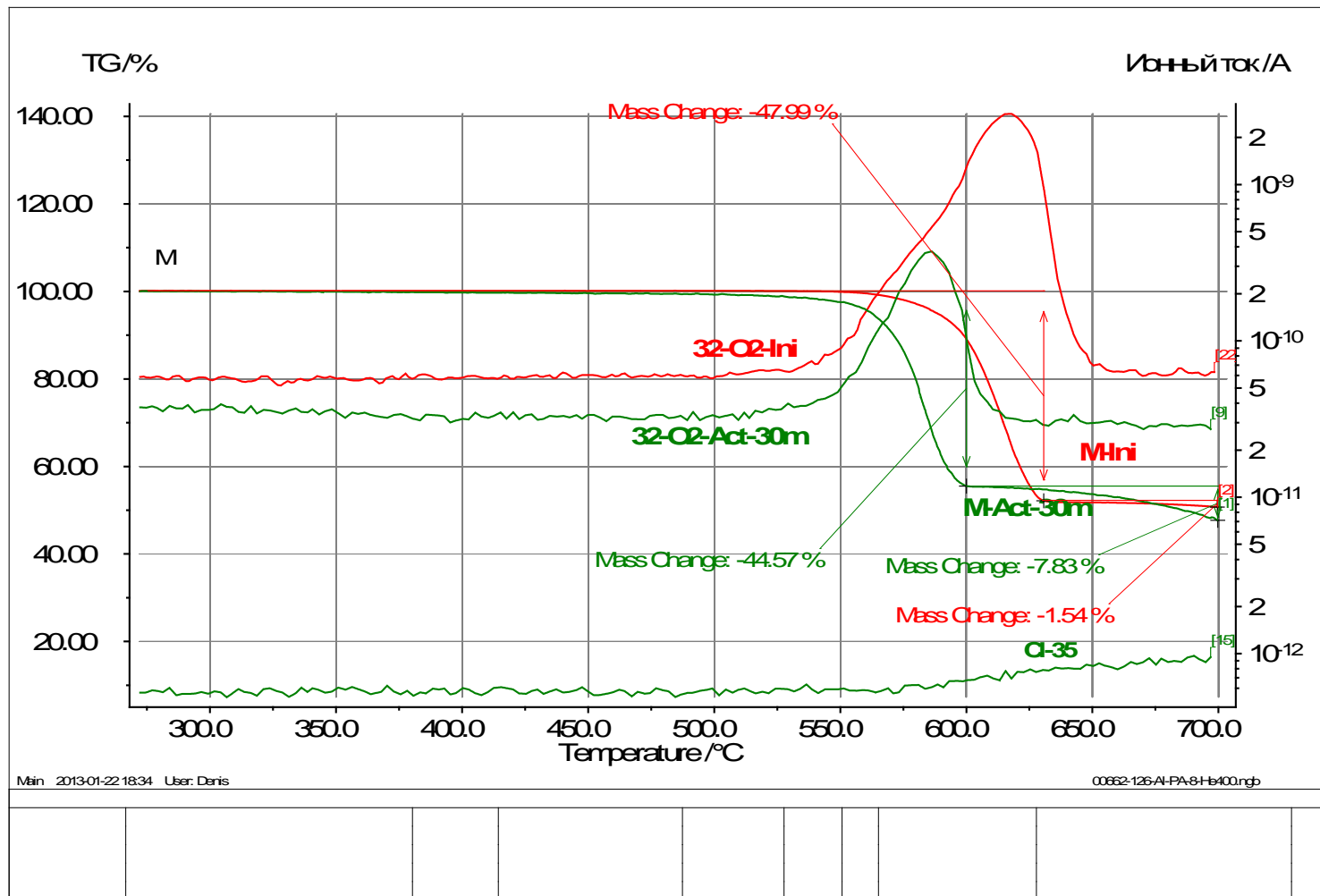


МАЭК на основе перхлоратов KClO_4 и NH_4ClO_4

Thermal effect of reactions Si, Al + PP, AP

Composition, Stoichiometric ratio	r_{\max} , g/cc	Reaction	Q, kcal/kg	$Q_{\text{ж}} \times 10^{-3}$, kcal/m ³
Si/KClO_4 28.8/71.2	2.46	$2\text{Si} + \text{KClO}_4 = 2\text{SiO}_2 + \text{KCl}$	2240	5515
Si/NH_4ClO_4 35/65	2.07	$9\text{Si} + 4\text{NH}_4\text{ClO}_4 = \text{SiCl}_4(\text{g}) + 8\text{SiO}_2(\text{s}) + 2\text{N}_2 + 8\text{H}_2$	2230	4612
Al/KClO_4 34.2/65.8	2.58	$8\text{Al} + 3\text{KClO}_4 = 4\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{KCl}(\text{s})$	2544	6560
Al/NH_4ClO_4 27.7/72.3	2.11	$10\text{Al} + 6\text{NH}_4\text{ClO}_4 = 5\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} + 9\text{H}_2\text{O} + 3\text{N}_2$	2385	5032

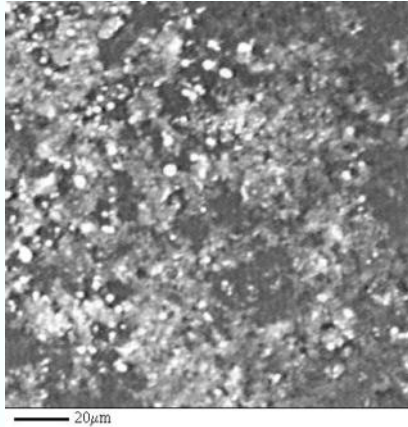
Анализ - активированный KClO_4



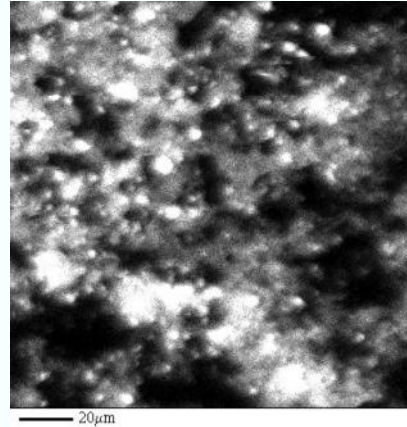
Активация >> снижение температуры начала разложения

Distribution of elements MAEC nSi + NH₄ClO₄

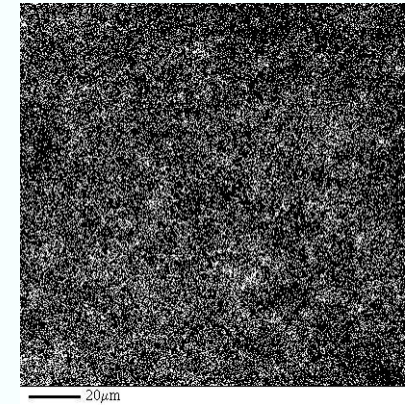
nSi/NH₄ClO₄ The average size of particles $\langle d \rangle = 60 - 100$ nm (BET)
The analysis of distribution of elements in composite shows homogeneous distribution of components at submicron level (BSE)



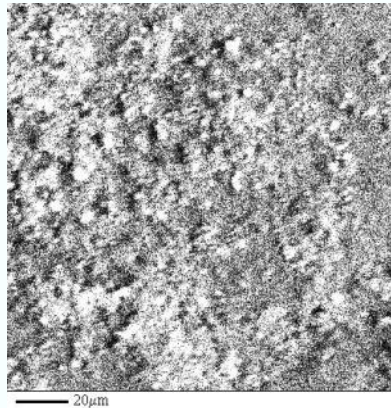
SEM



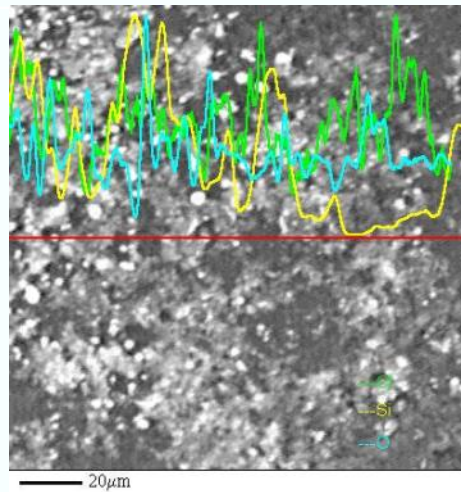
Si



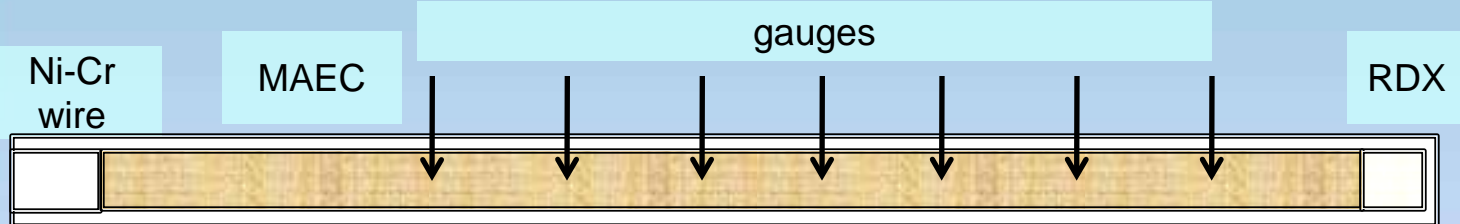
Cl



O



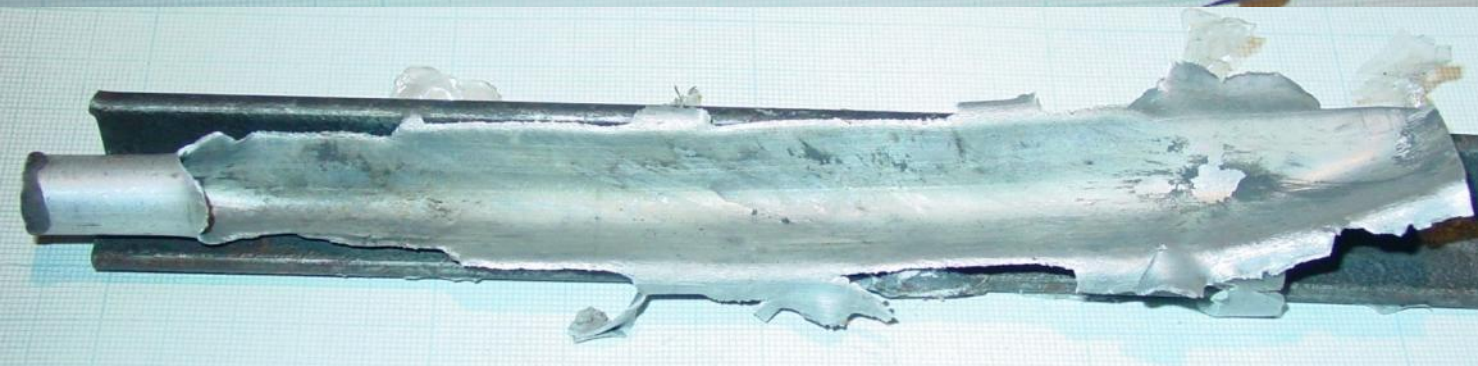
MAЭК nano-Si+ KNO_3 , + KClO_4 , + NH_4ClO_4



nano-Si + KNO_3
Deflagration
U= 300-400 m/s

nano-Si + KClO_4
DDT L= 7 cm
D= 1200-3000 m/s

nano-Si + NH_4ClO_4
DDT L= 2 cm
D= 1900 m/s



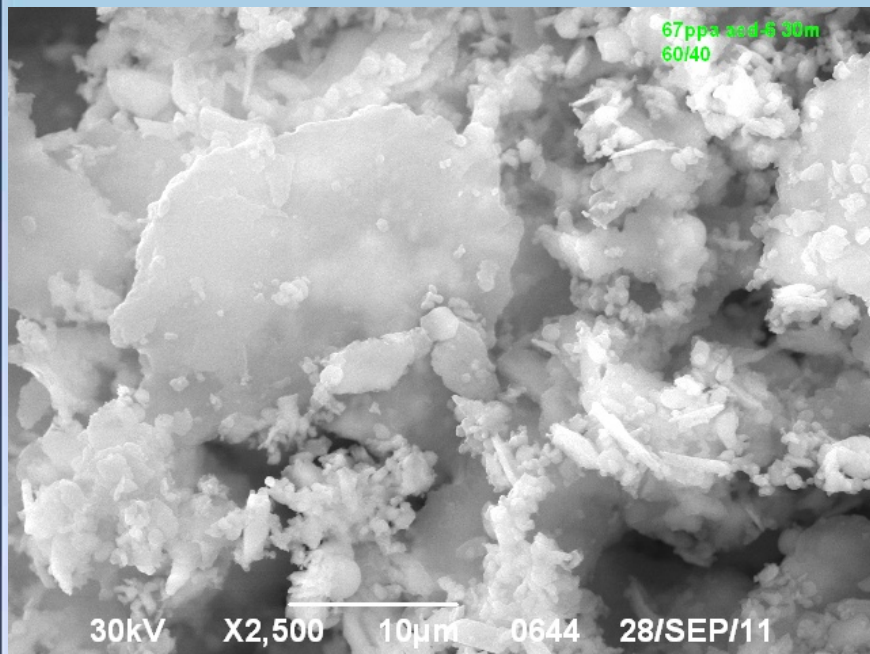
nano-Si + NH_4ClO_4
DDT L= 1 cm
D= 1500 - 2000 m/s

МАЭК nano-Si + NH₄ClO₄

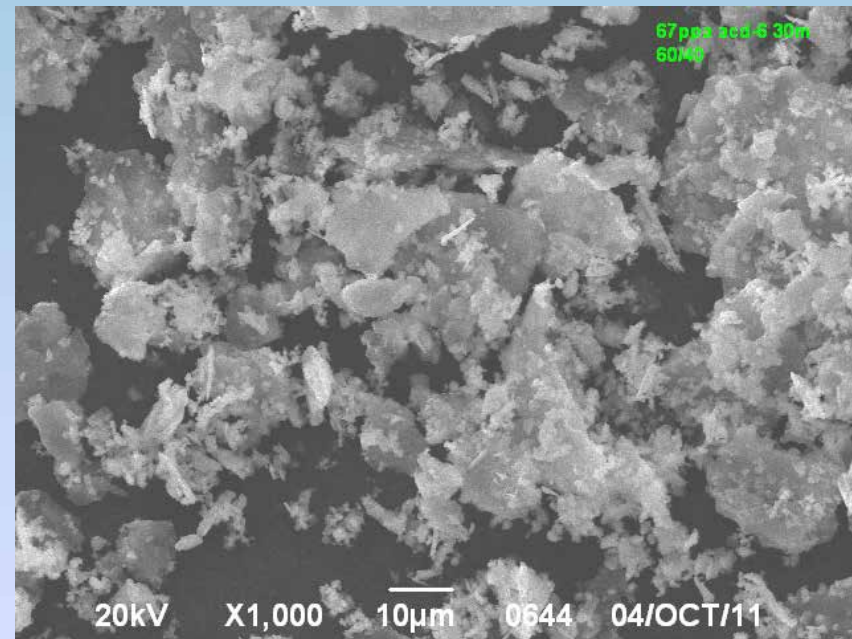


DDT
in duralumin tubes
10 mm,
nSi/NH₄ClO₄
29/71
with different
activation times
10 min (1421)
20 min (1420)
30 min (1422)
40 min (1419)

Retonation



Al(АСД-6)/ПХК 40/60



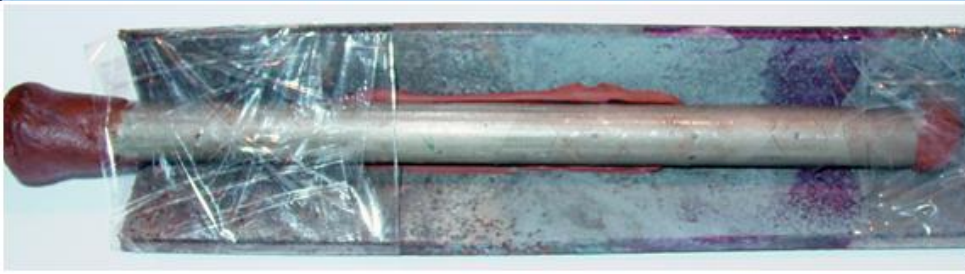
Al(ПП-2)/ПХК 40/60

При одинаковом времени активации происходит достаточно быстрый размол частиц ПХК до субмикронных размеров, однако Al измельчается по-разному.

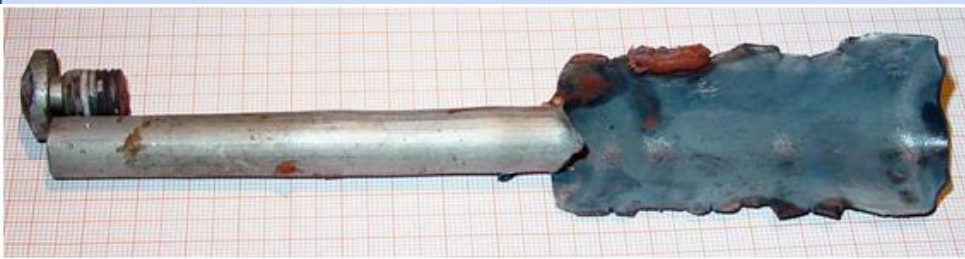
В случае АСД-6 частицы деформируются с образованием достаточно крупных «таблеток» с размерами несколько мкм, находящихся отдельно от ПХК,

а в случае пудры образуются более однородные субмикронные композиты в виде фрагментов чешуек Al, покрытых окислителем.

DDT Al/KClO₄ 40/60 $\varepsilon = 80-82\%$



steel tubes before and after experiences



Al - ASD-6

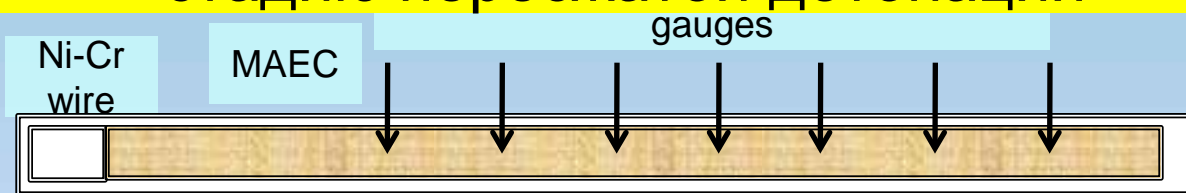
$L_{DDT} = 8$ cm, $D = 1150$ m/s



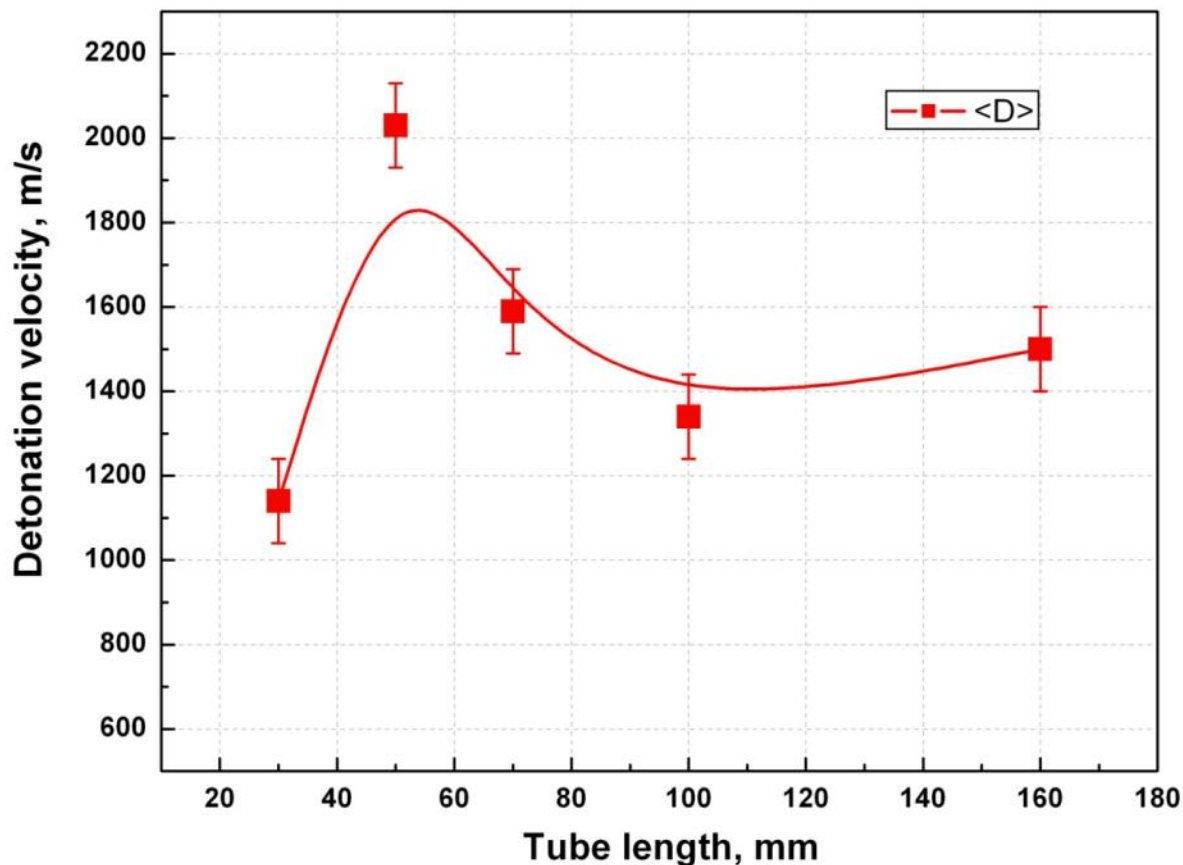
Al - PP-2

$L_{DDT} = 5.5$ cm, $D = 1320$ m/s

МАЭК Al + KClO₄ переход горения в детонацию (DDT) через стадию пересжатой детонации

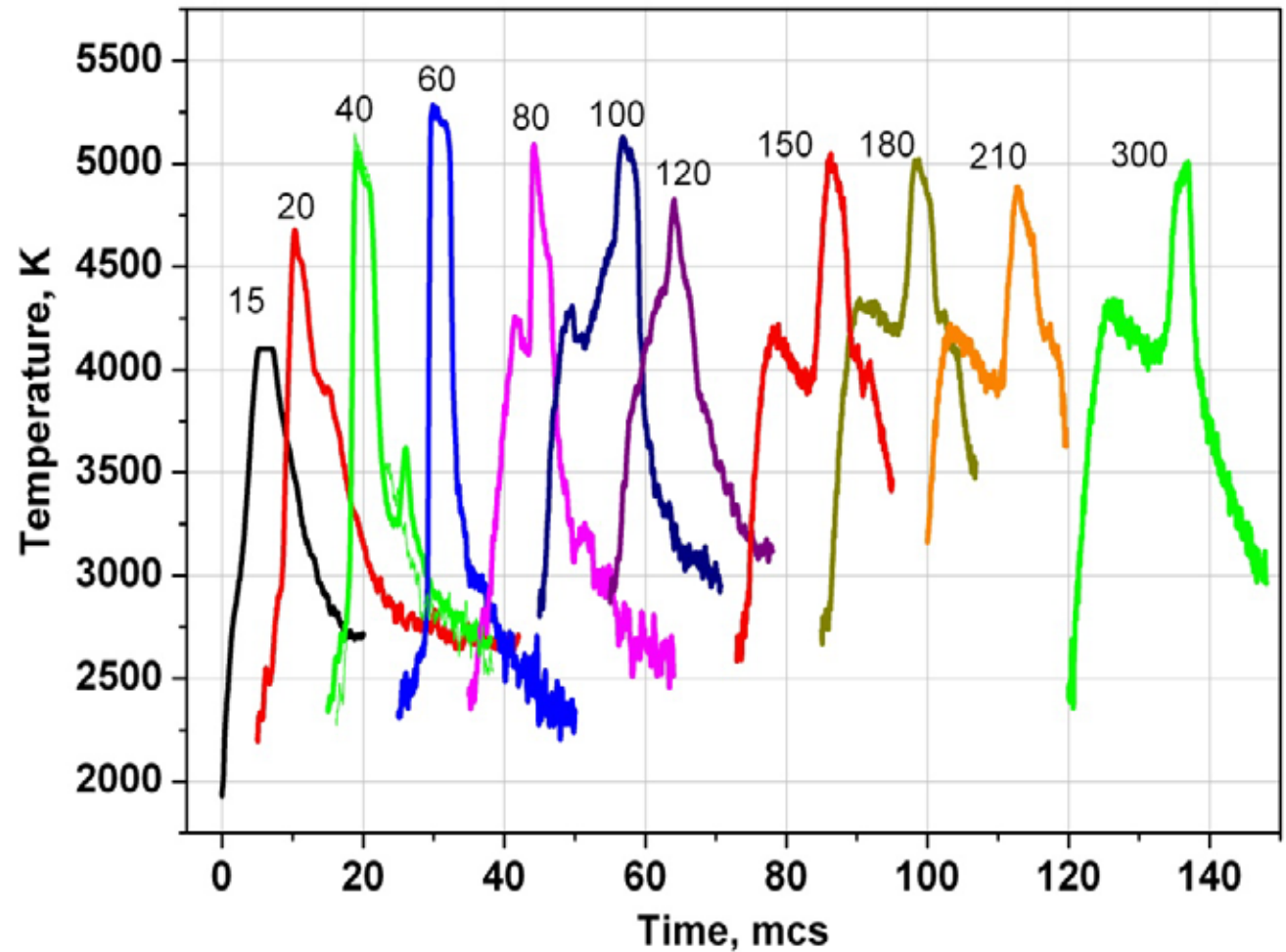
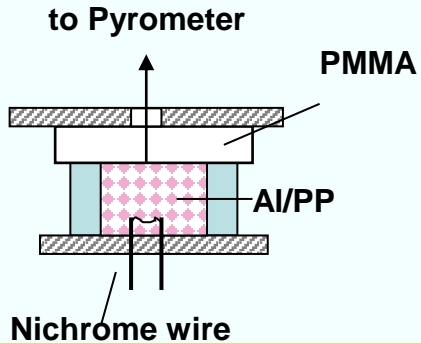


Скорость детонации от длины трубы для низкоплотных зарядов ($d=10$ мм, плотность = 0.3 TMD)



Brightness Temperature of Al/KClO₄ products

Window PMMA (8mm)



$\varnothing = 18 \text{ mm}$

charge length

= 15, 20, 40, 60, 80,
100, 120 – 300 mm

density

= 0.42-0.44 g/cc

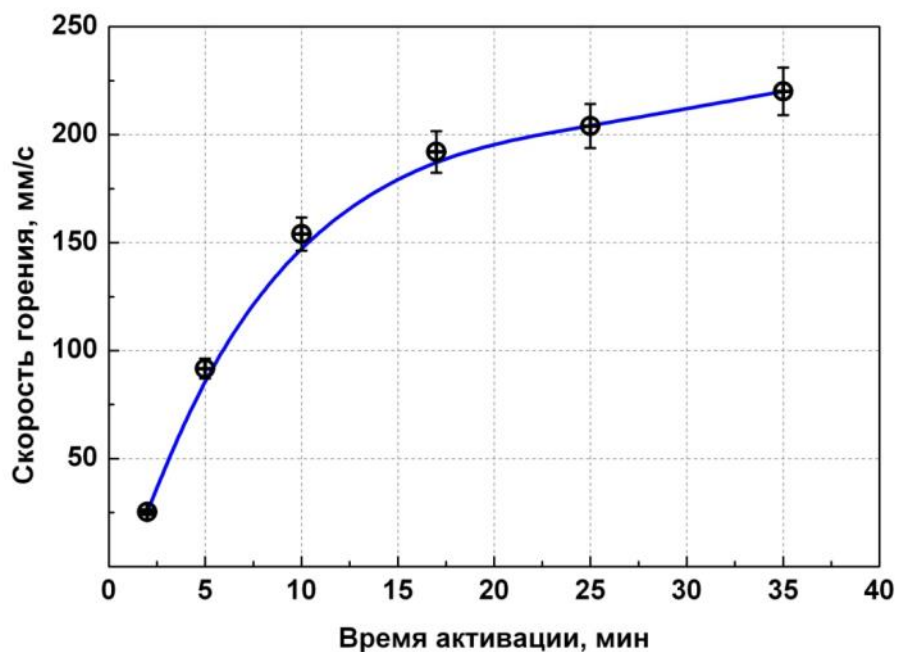
porosity = 82-84%

Скорость горения в прессованных зарядах МАЭК Al/KClO_4

заряды из таблеток высотой 12 мм, диаметр 9 мм, плотность 0,85-0,90
в атмосфере азота

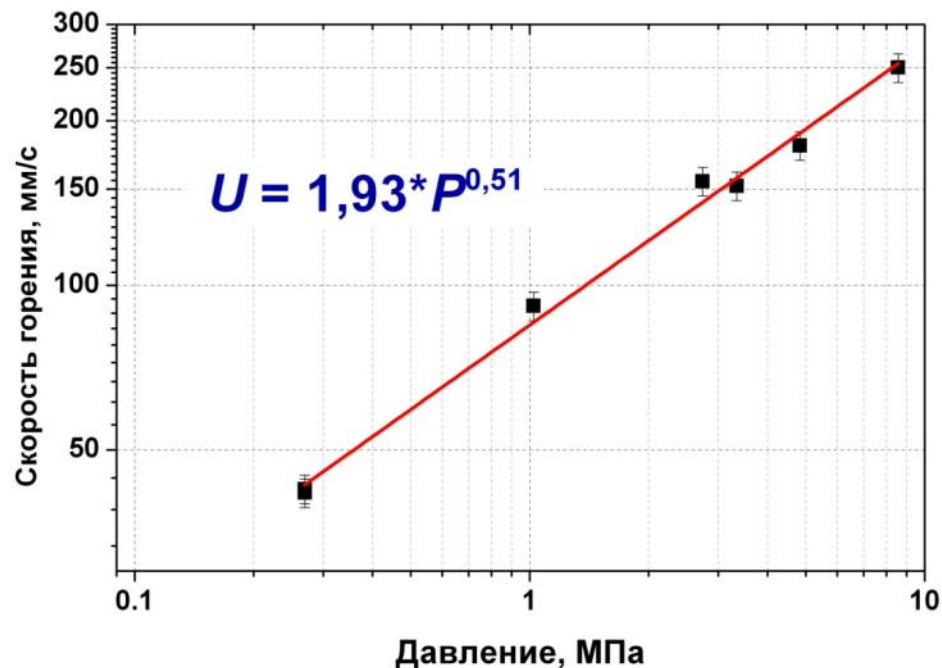
Скорость горения от времени активации

$P_0 = 3 \text{ МПа}$



Скорость горения от давления

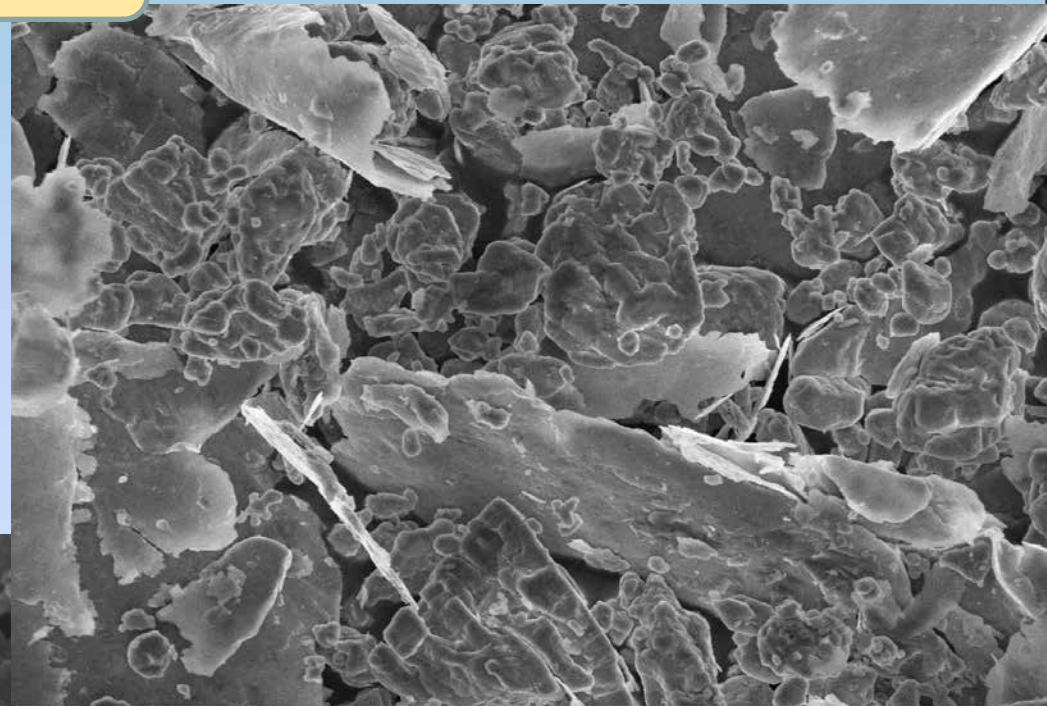
$t_{\text{акт}} = 10 \text{ мин}$



Механоактивированные композиты Al+ПХА

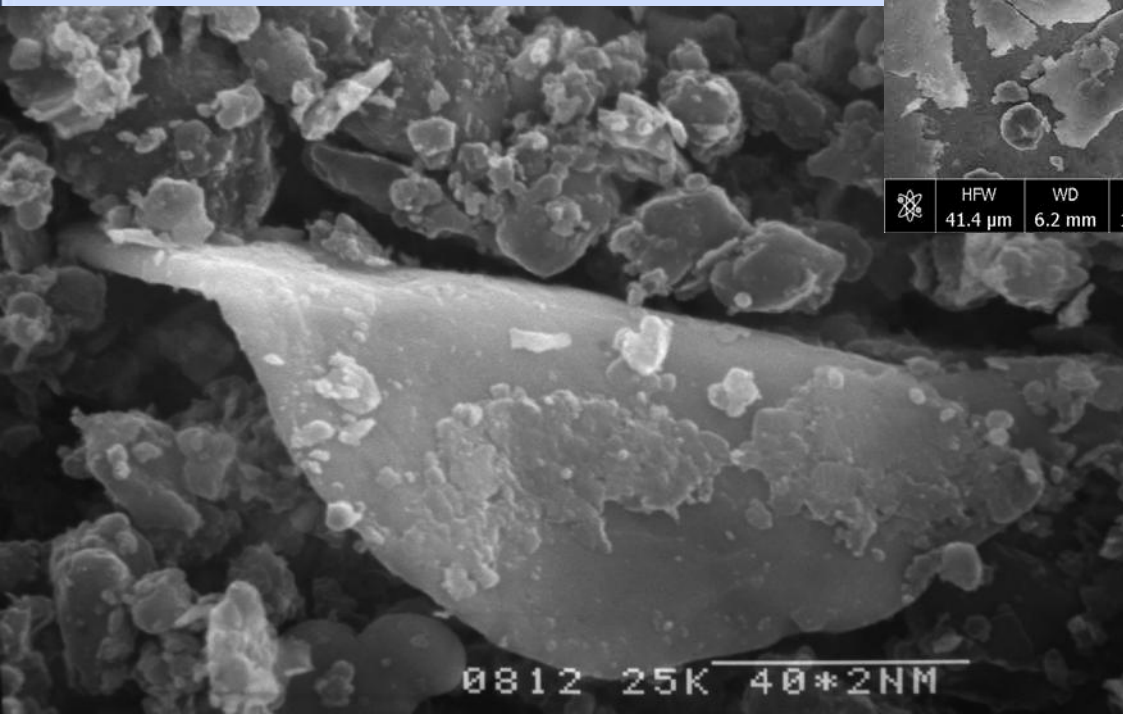
МАЕС Al(PP-2)+AP

МАЕС Al(8)+AP



	HFW	WD	mag	tilt	lens mode
41.4 μ m	6.2 mm	10 000 x	0 $^{\circ}$	Immersion	

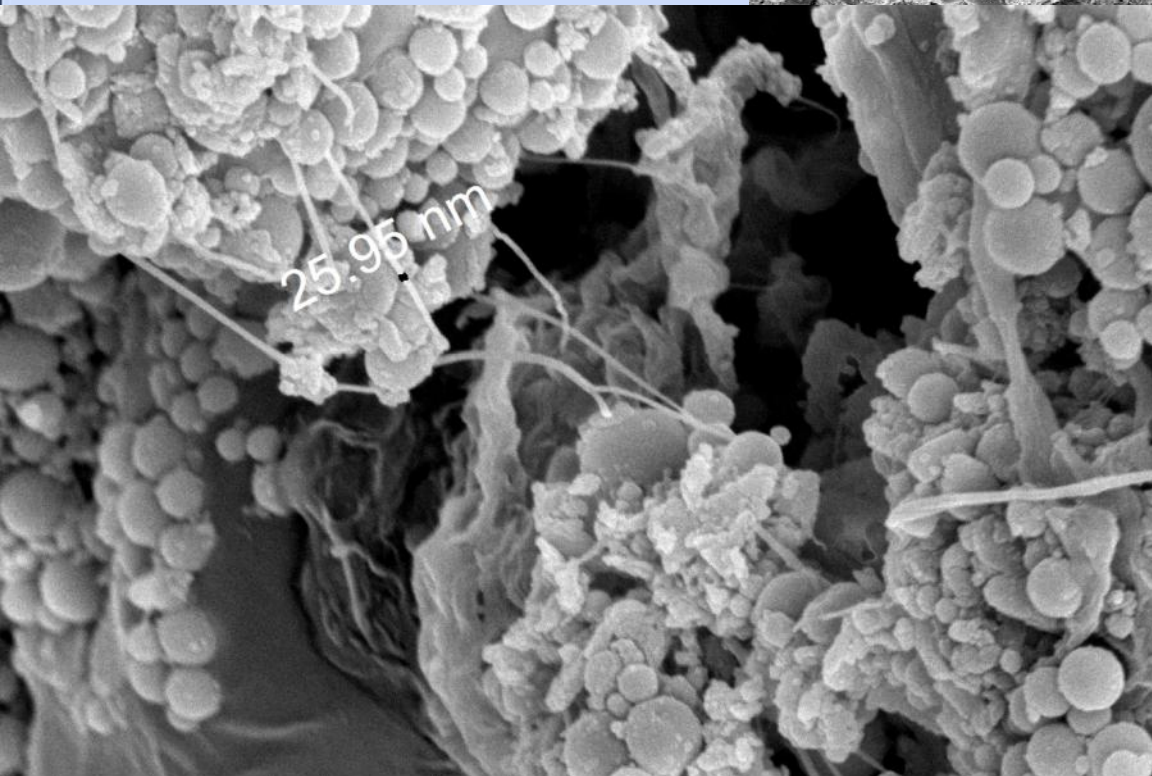
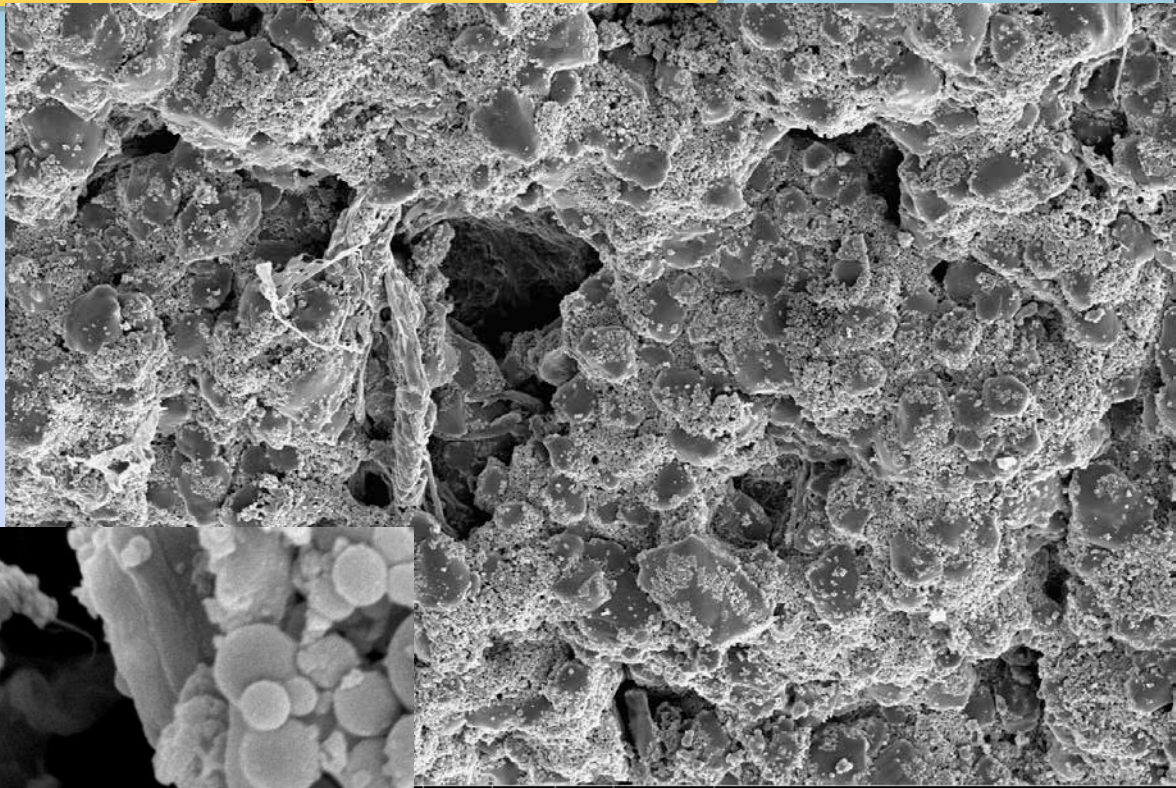
20 μ m



0812 25K 40*2NM

4 μ M

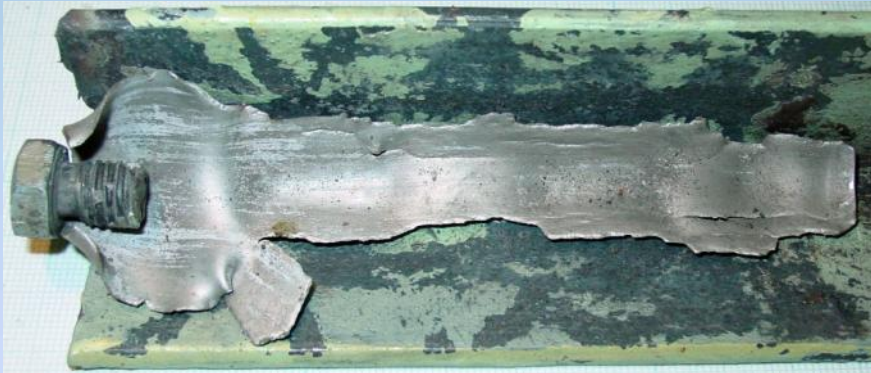
МАЭК nAl(100)+AP+F42



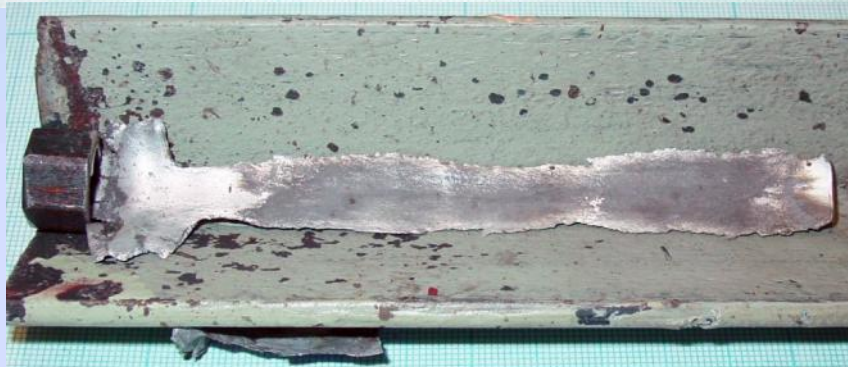
mode	det	spot	HPW	20 μm
SE	ETD	3.0	82.9 μm	

WD	mag	tilt	lens mode	mode	det	spot	HPW	1 μm
6.2 mm	100 000 x	0 °	Immersion	SE	TLD	3.0	4.14 μm	

DDT Al/ПХА 20/80 Al(8) $\epsilon = 80-82\%$



1560 $t_a = 35$ мин, $D = 2380$ м/с
стальная трубка



1561 $t_a = 20$ мин, $D = 2310$ м/с
дюралюминиевая трубка



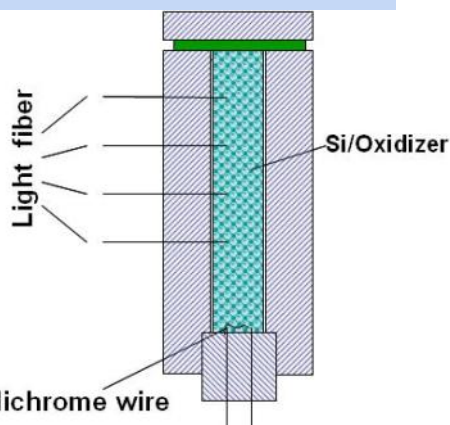
1569 $t_a = 40$ мин, $D = 2300$ м/с
дюралюминиевая трубка

DDT Al/ПХА 20/80 Al(PP-2) $\epsilon = 80-82\%$

Al/NH₄ClO₄

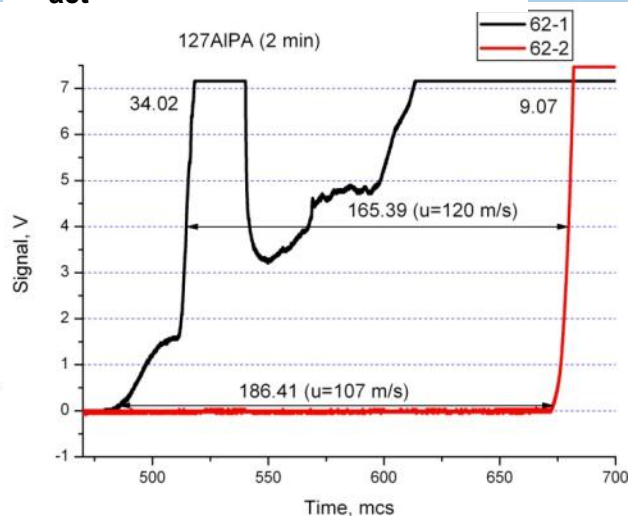
Al(8)

ВИД СИГНАЛОВ

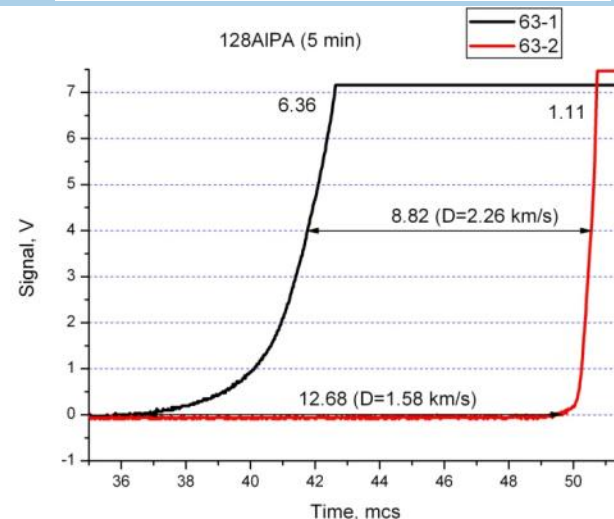


трубка
Ø 10 мм

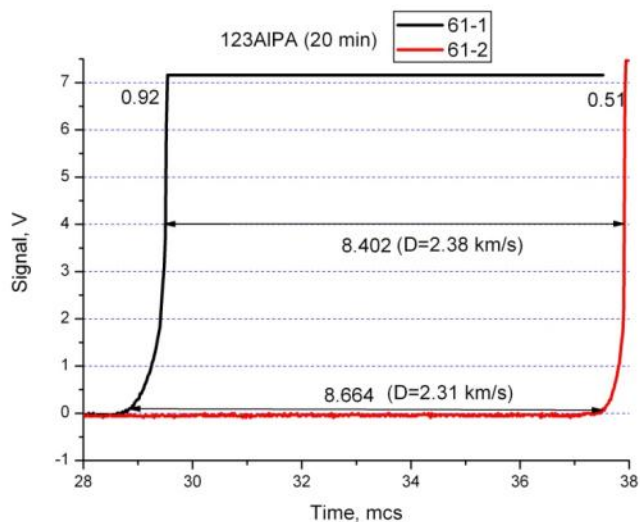
$t_{act} = 2 \text{ min}$ $u=110 \text{ m/s}$



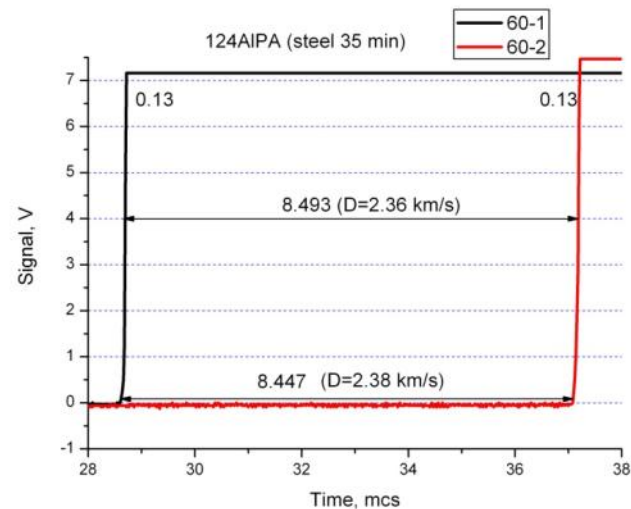
$t_{act} = 5 \text{ min}$ $D=1600 \text{ m/s}$



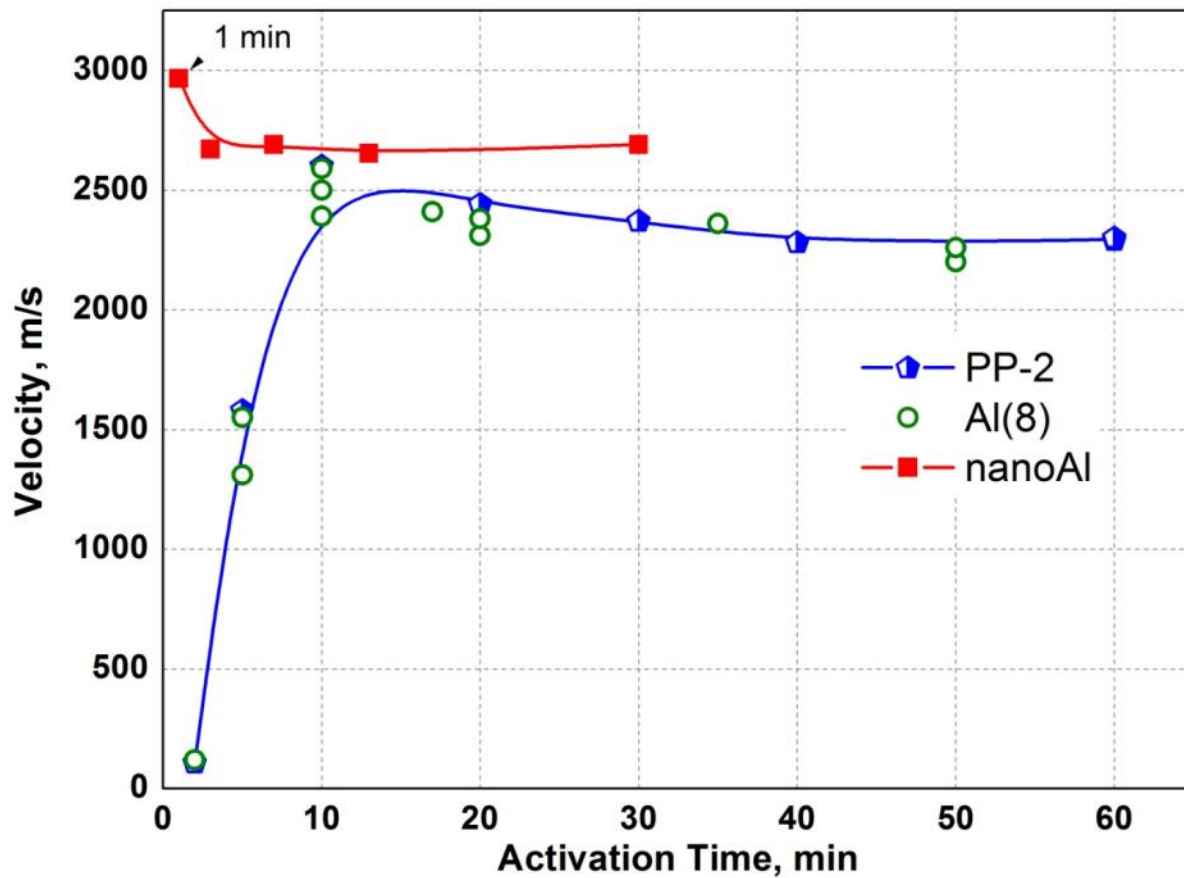
$t_{act} = 20 \text{ min}$ $D=2310 \text{ m/s}$



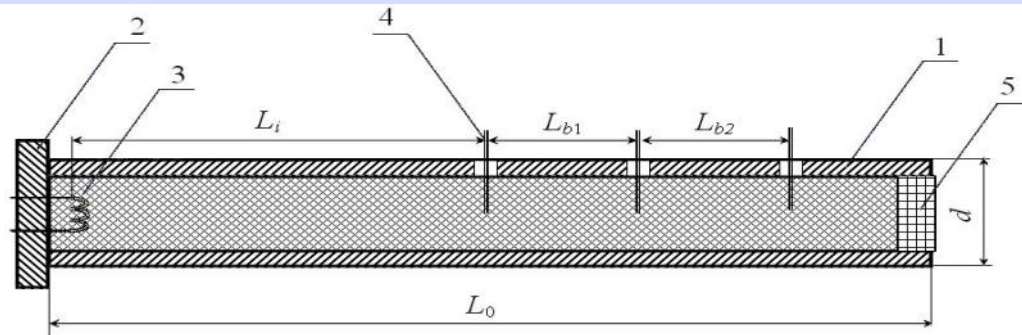
$t_{act} = 35 \text{ min}$ $D=2380 \text{ m/s}$



DDT Al/AP 20/80 $\epsilon = 80-82\%$

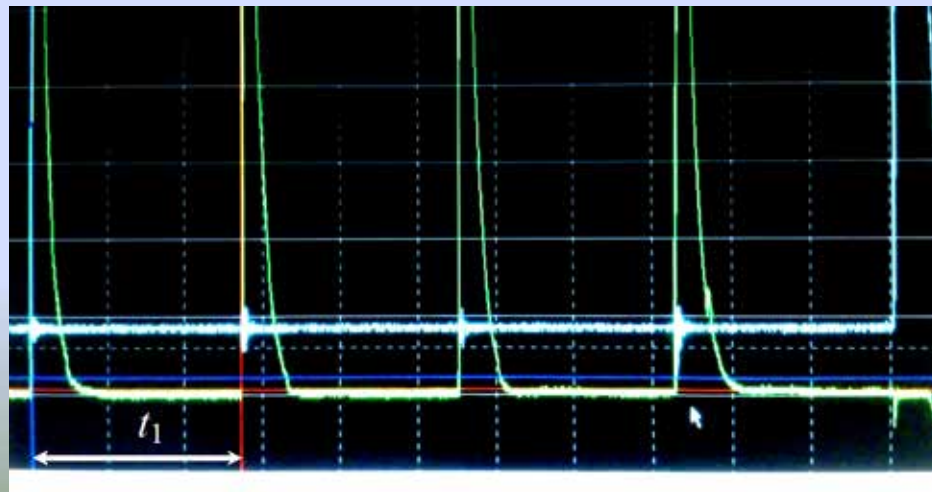


Aluminum tube
 \varnothing 10 mm
 length 120 mm



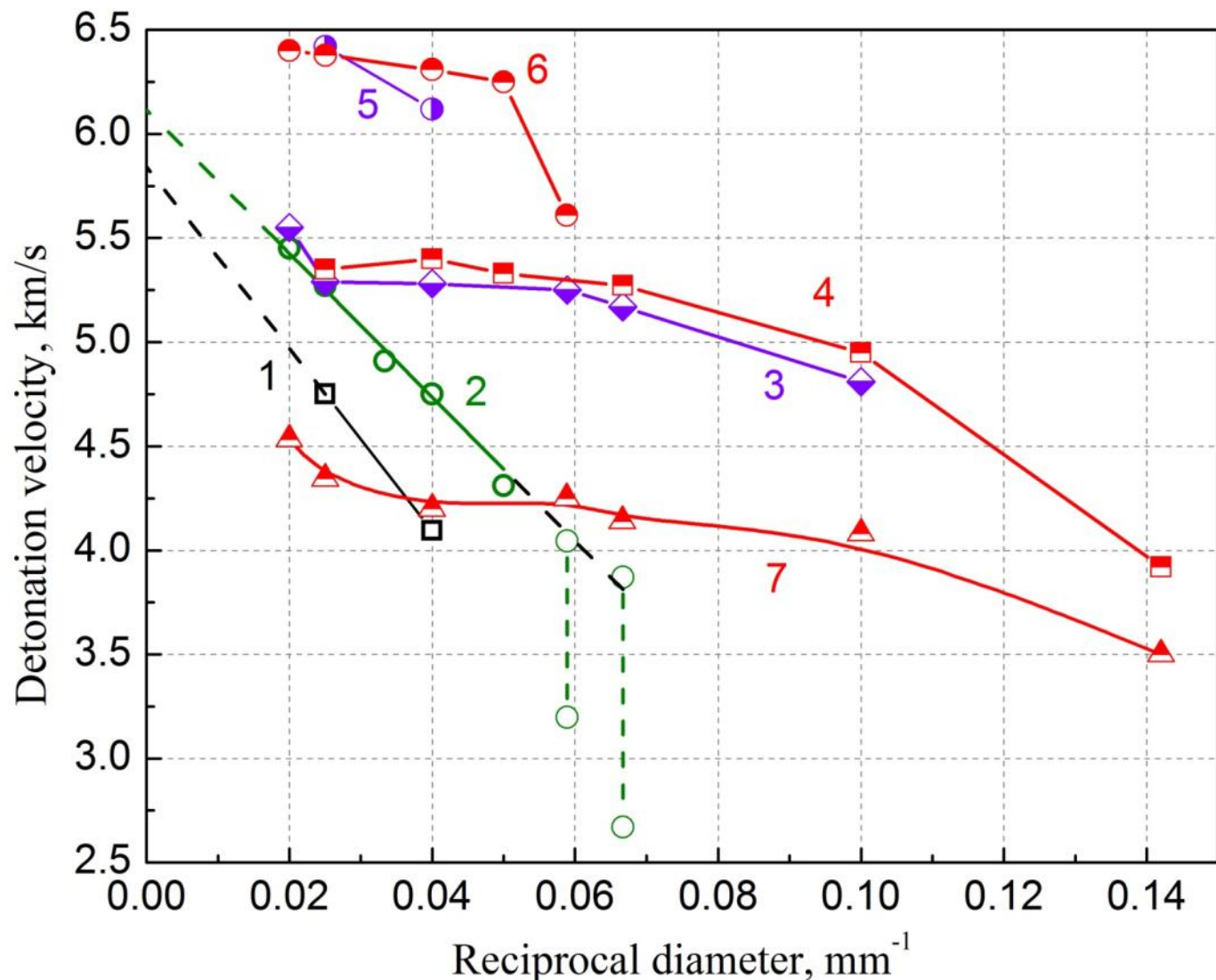
Детонация прессованных зарядов Al/ПХА

$d = 15 \div 50 \text{ мм}$ $L = 3 \div 6 d$



Зависимость скорости детонации от диаметра заряда (1/d)

Al/ПХА (20/80), нано и микро Al
(плотность 0.6, 0.75 и 0.9 TMD)



0.75 TMD (1-4)

1 – non-activated

$t_{act} = 10$ min (2-7)

2 - Al – PP-2

3 – Al - Alex

4 - Al - nAl

0.9 TMD (5-6)

5 - Al - Alex

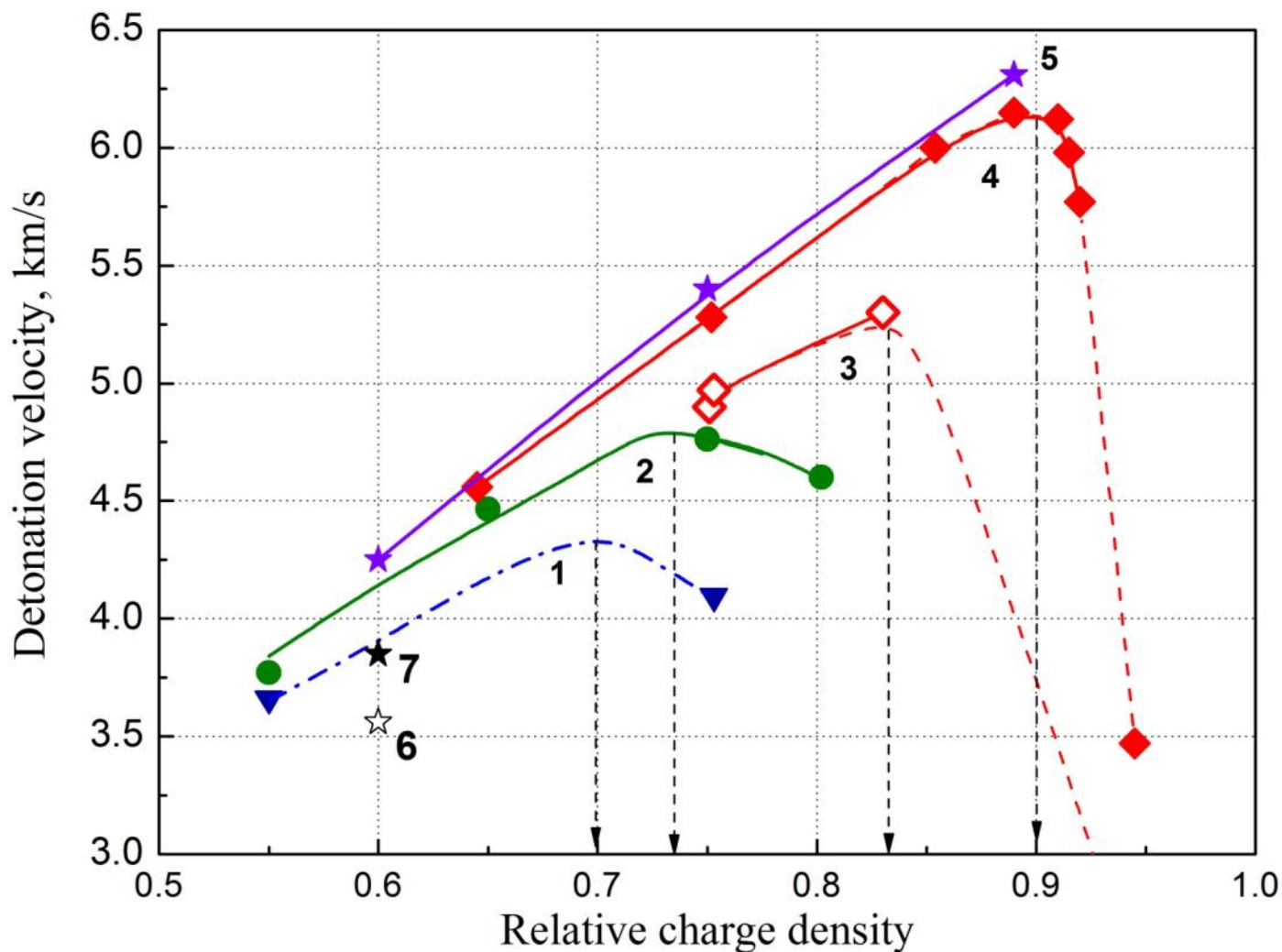
6 - Al - nAl

0.6 TMD (7)

7 - Al – nAl

Зависимость D от плотности заряда $d = 25$ мм

Al(PP-2), Alex/AP and nAl/AP 20/80 $d = 25$ мм



1 - nonactivated

2 - Al - PP-2
 $t_{act} = 10$ min

3 - Al - Alex
 $t_{act} = 1$

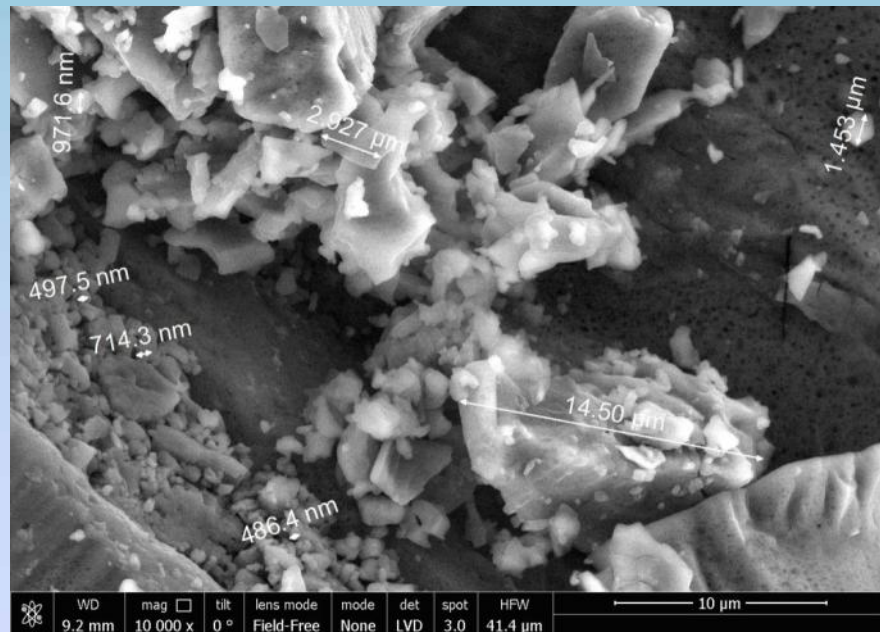
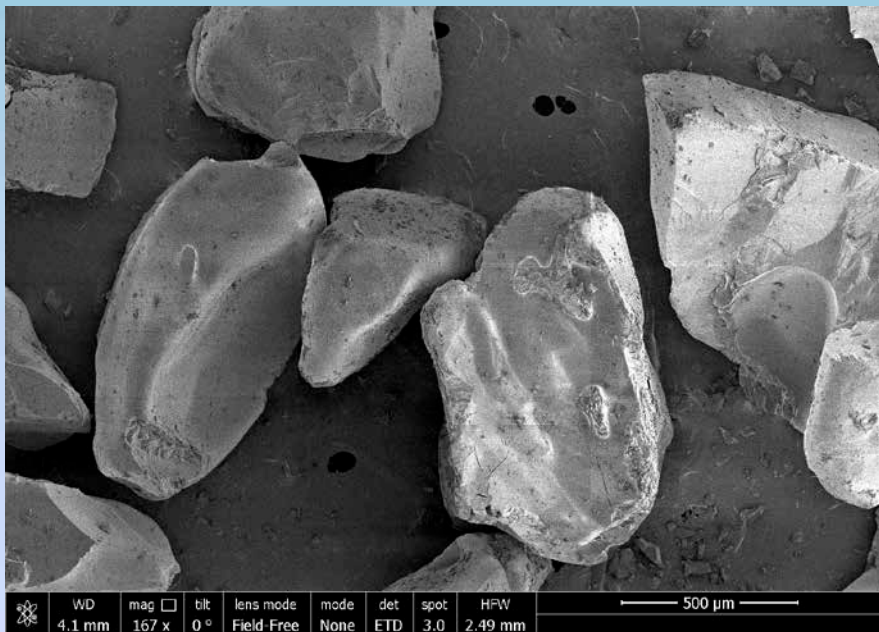
4 - Al - Alex
 $t_{act} = 10$

5 - Al - nAl
 $t_{act} = 10$

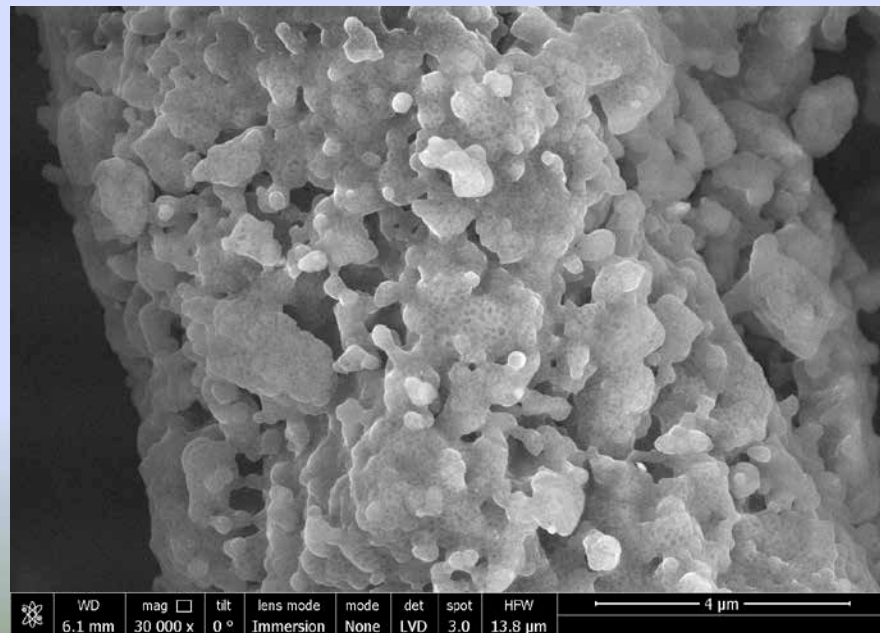
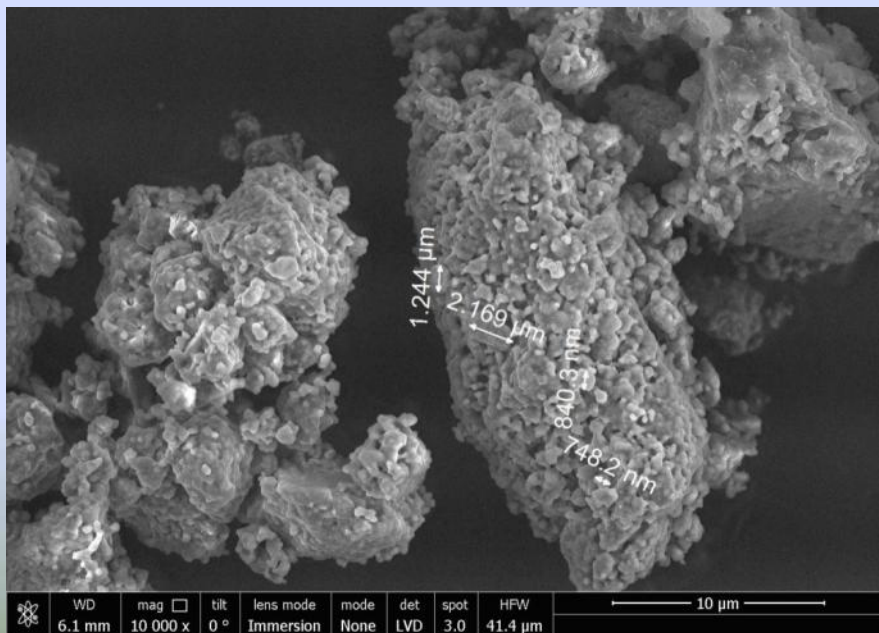
6 - AP(non-act)

7 - AP($t_{act} = 10$)

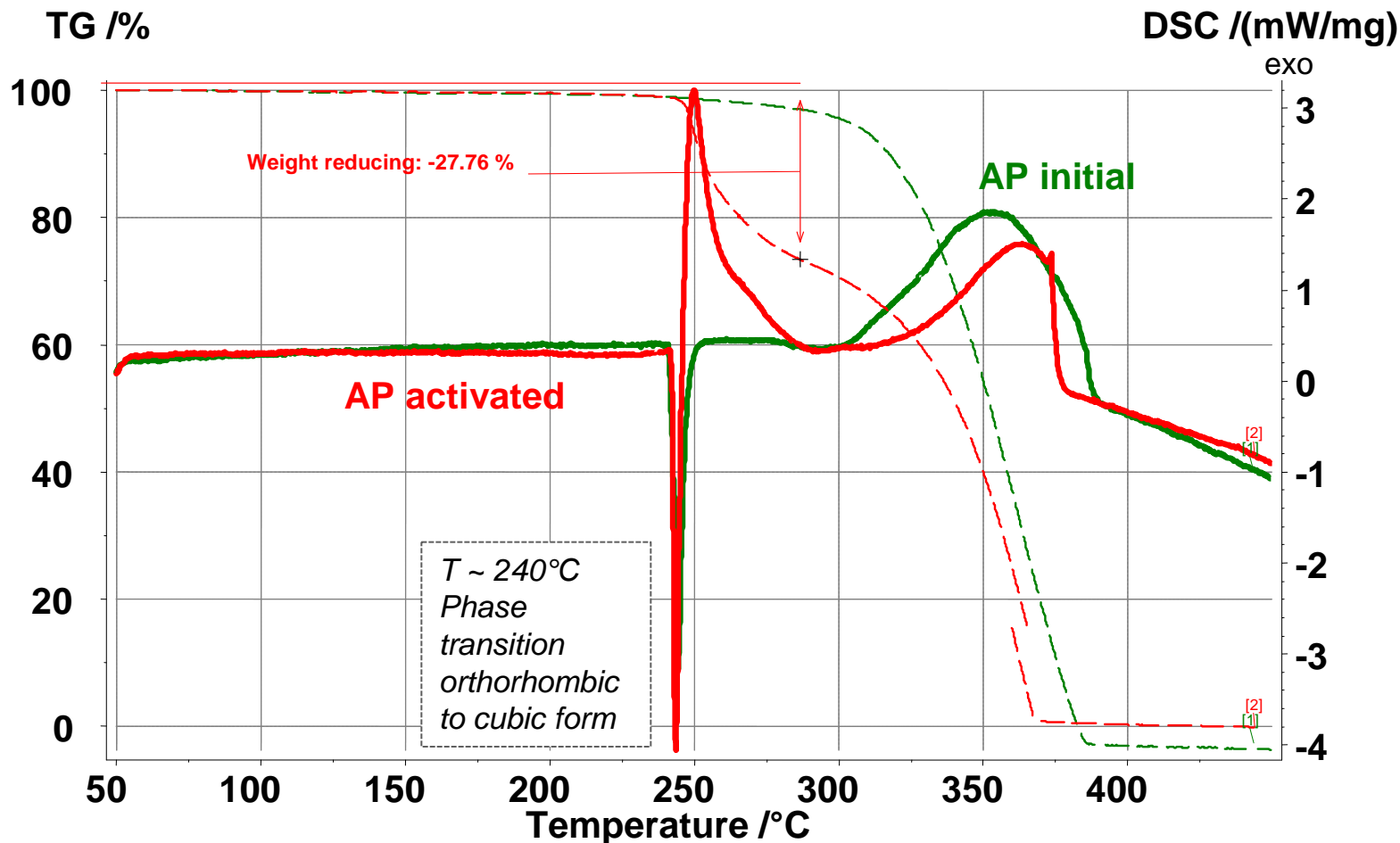
ПХА ХЧ исходный крупные частицы 500-1000 мкм с осколками около 1 мкм



ПХА активированный 7 мин



Thermal decomposition activated AP

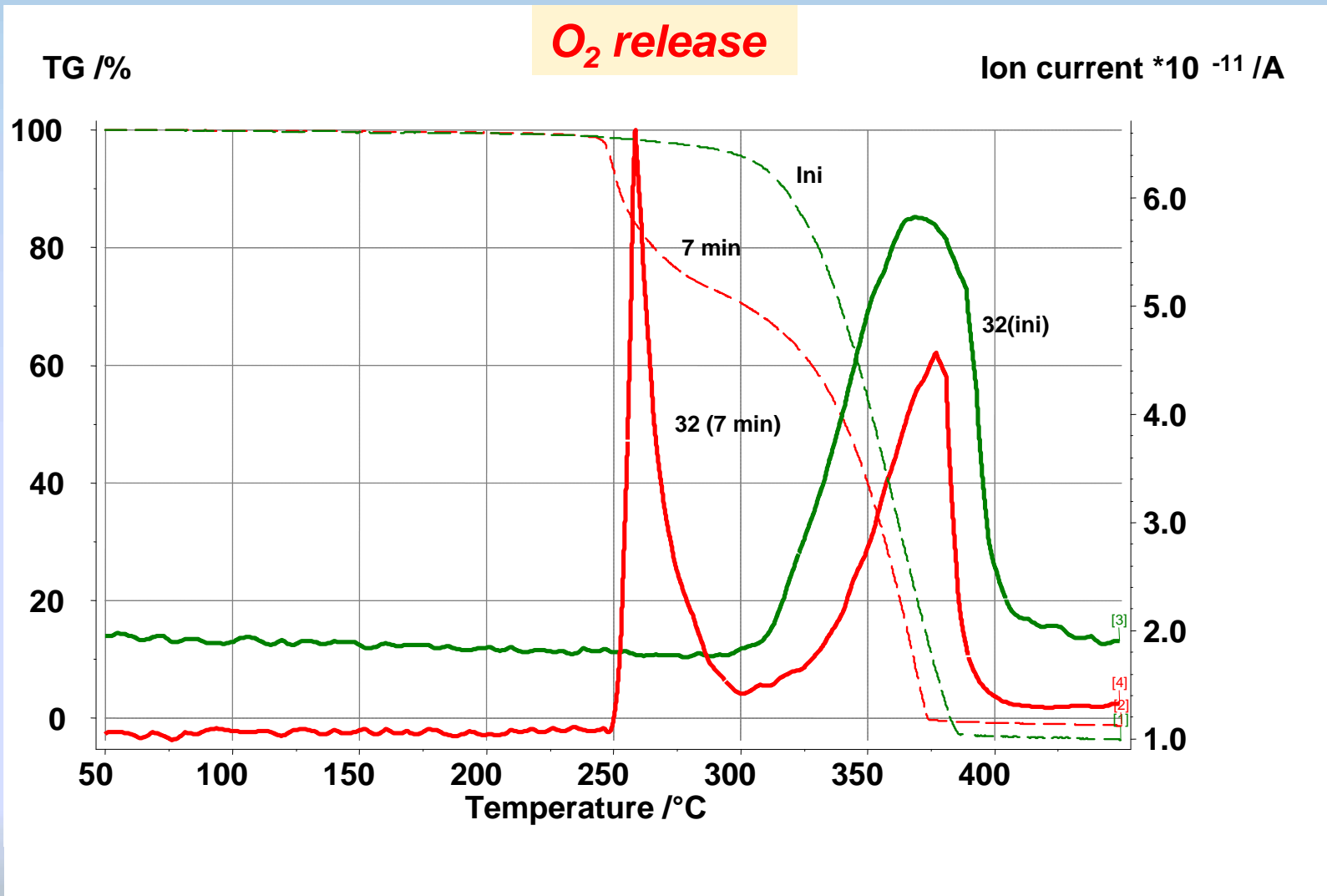


**Green -
Pure AP
200 mcm**

**Red -
Activated AP
 $t_a = 7$ min**

Thermoanalyzer-
NETZSCH STA 449C Jupiter –
Heating rate - 10 K/min

Thermal decomposition activated AP (mass spectrometry)



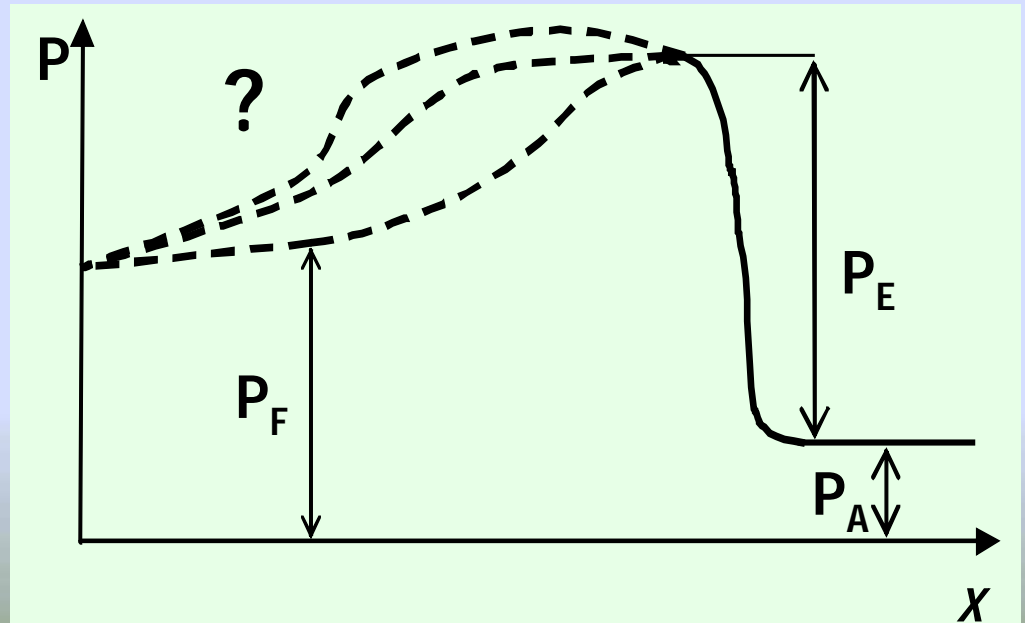
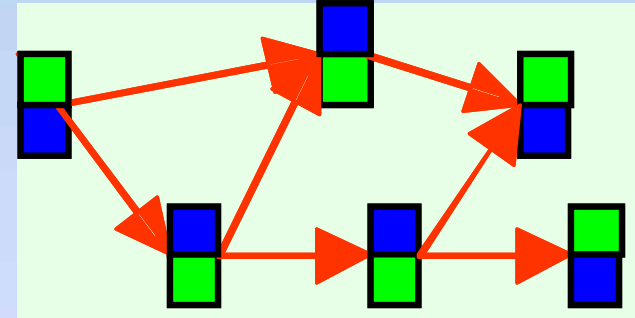
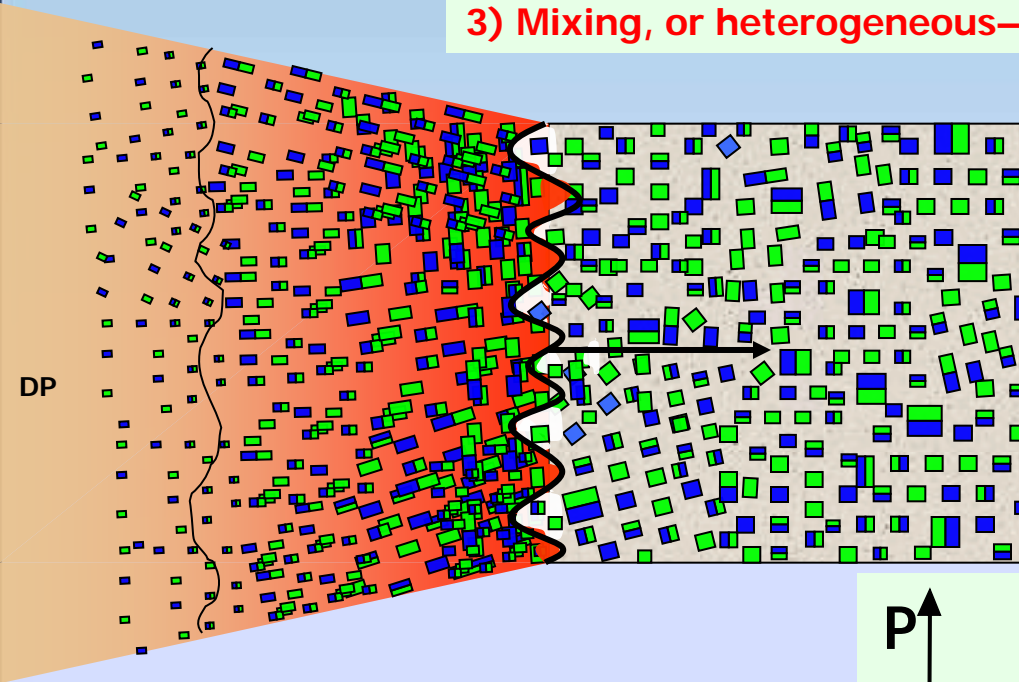
Green - Pure AP
200 mcm

Red - Activated AP
 $t_a = 7$ min

Mechanisms of chemical reactions in front of detonation wave

*Yu. B. Khariton. About detonation ability of explosives.
"Questions of the theory of explosives" 1947*

3) Mixing, or heterogeneous-heterogeneous mechanism



$$D = \min \quad (\text{Chapman}) \quad C = D - u \quad (\text{Jouguet})$$

Заключение

- **Разработаны способы управления процессами горения и детонации в смесях окислитель-горючее с помощью методов предварительной механохимической активации и использования наноразмерных компонентов**
- **Механоактивированные композиты на основе смесей металл – окислитель могут представлять интерес в качестве компонентов составов новых инициирующих, зажигательных и осветительных составов с повышенными требованиями по скоростям энерговыделения, а также для источников энергии для микро-исполнительных устройств**