

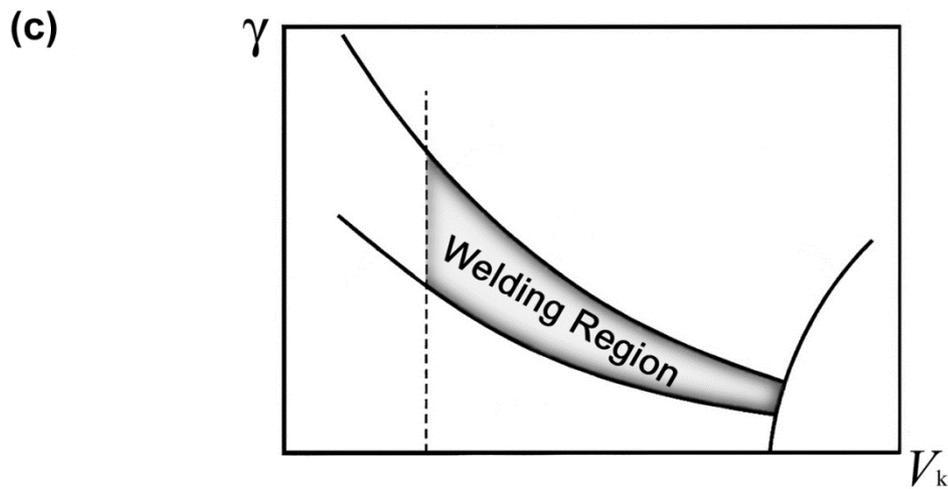
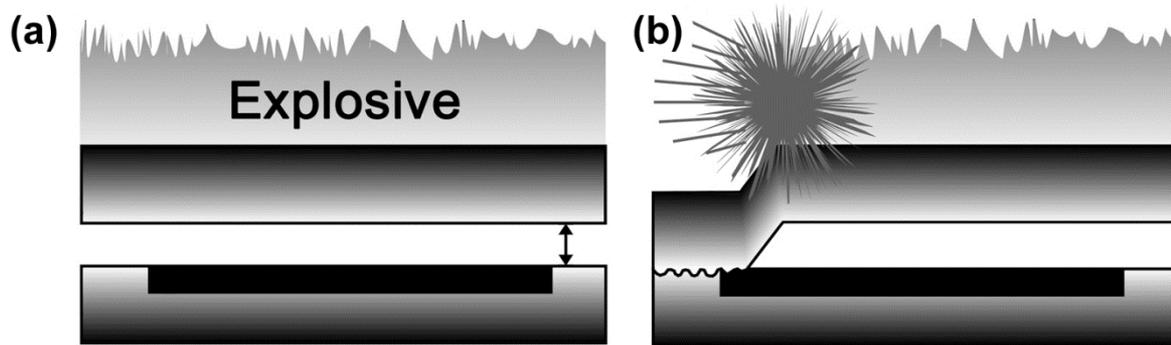
- **ЗОНЫ РИСКА ПРИ СВАРКЕ  
ВЗРЫВОМ**



**Б.А. ГРИНБЕРГ, В.И. ЛЫСАК,  
С.В. КУЗЬМИН**

- *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,*
- *620990 Екатеринбург,*
- *ул. С. Ковалевской, 18,*
- *[bella@imp.uran.ru](mailto:bella@imp.uran.ru)*
- *Волгоградский государственный технический университет,*
- *400005 Волгоград, пр. Ленина, 28*
- *[weld@vstu.ru](mailto:weld@vstu.ru)*

# Схема сварки; “окно свариваемости”



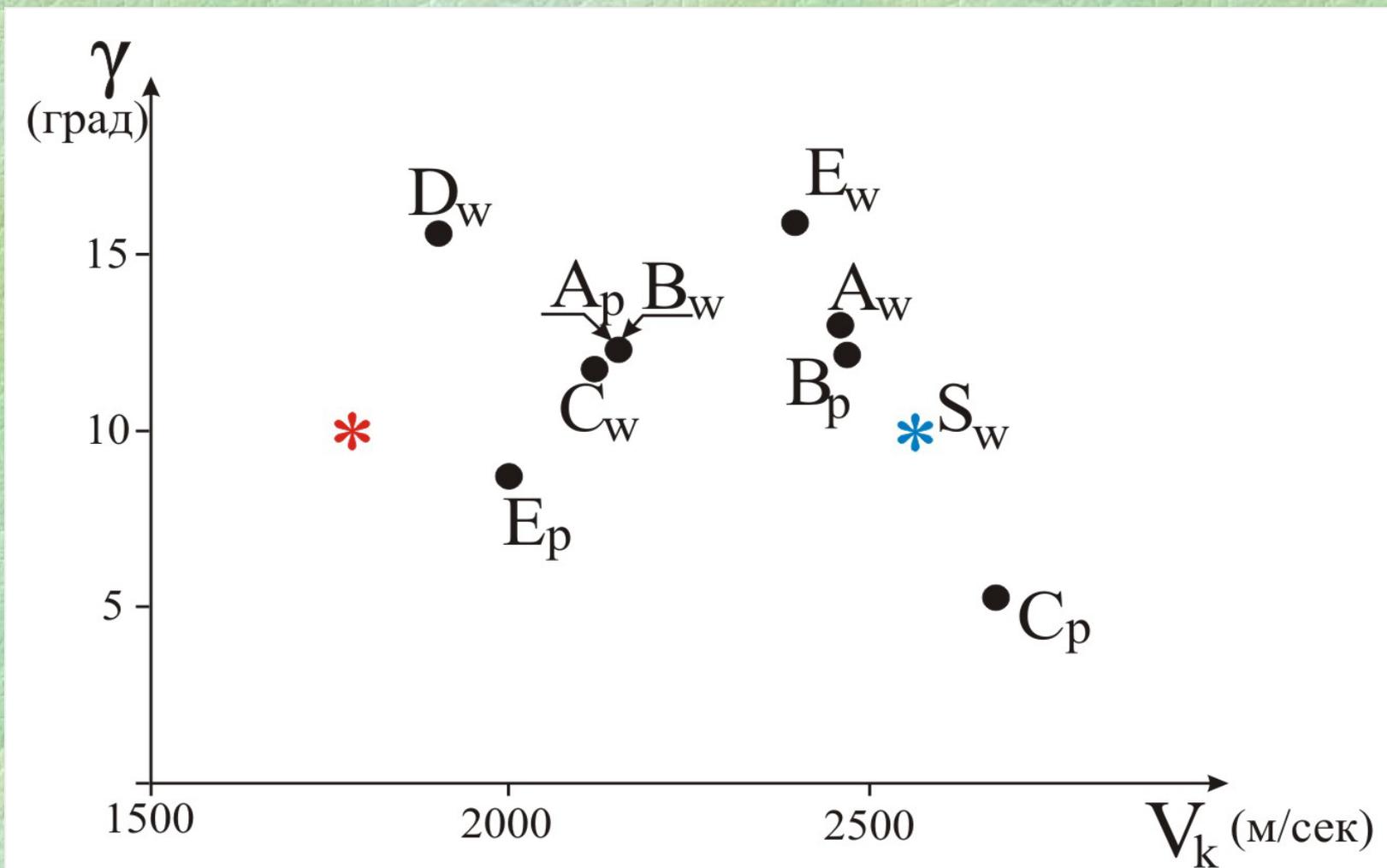
# Сварка взрывом

- *высокоинтенсивное, быстротечное воздействие;*
- *характерные времена:*
- *длительность сварки  $10^{-6}$  с,*
- *скорость деформации  $10^4$ - $10^7$  с<sup>-1</sup>,  
скорость охлаждения  $10^5$  К/с.*

## **Сварку проводили:**

- **ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей",  
*г. Санкт-Петербург,***
- **Волгоградский государственный  
технический университет,  
*г. Волгоград***
- **ОАО Уральский завод химического  
машиностроения  
*г. Екатеринбург***

# Угол соударения – скорость ТОЧКИ КОНТАКТА



# ИССЛЕДОВАНЫ СОЕДИНЕНИЯ:

- *металл-интерметаллид*
- *(Aw) - титан - ВТИ-1, волнообразная граница;*
- *(Ar) - титан - ВТИ-1, плоская граница, вдоль которой произошло расплавление;*
- *(Bw) - титан - ВТИ-4, волнообразная граница;*
- *(Br) - титан - ВТИ-4, почти плоская, частично расплавленная граница;*

# ИССЛЕДОВАНЫ СОЕДИНЕНИЯ:

- *металл-металл*
- *(Ср) – медь-тантал, плоская граница;*
- *(Сw) - медь- тантал, волнообразная граница;*
- *(Dw) – железо-серебро, волнообразная граница;*
- *(Ер) - алюминий-тантал, плоская граница;*
- *(Sw) – сталь-сталь, волнообразная граница*

# Химический реактор

КОМПОЗИТ: тантал, медь, сталь  
(Dynamic Materials Corporation,  
USA)

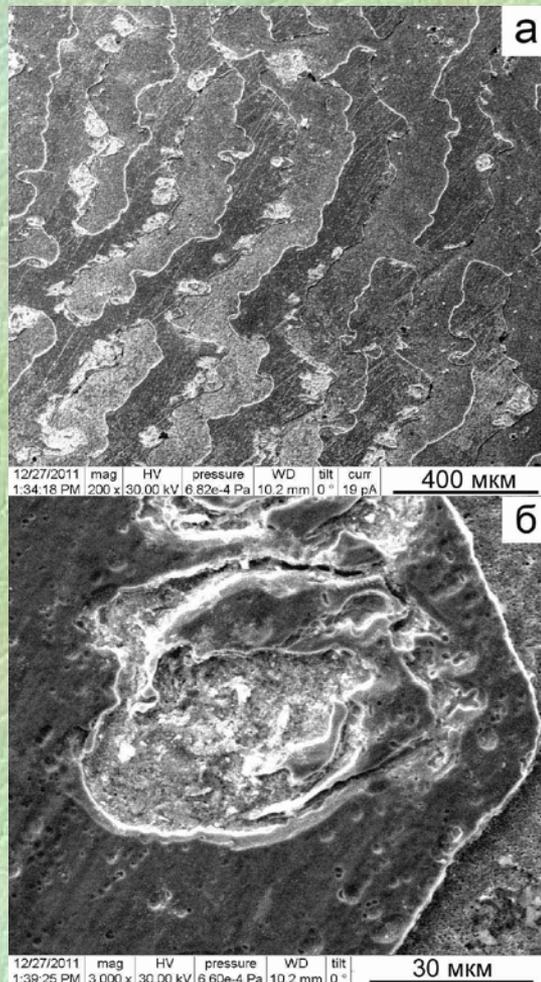


*Frey D., Banker 2003*

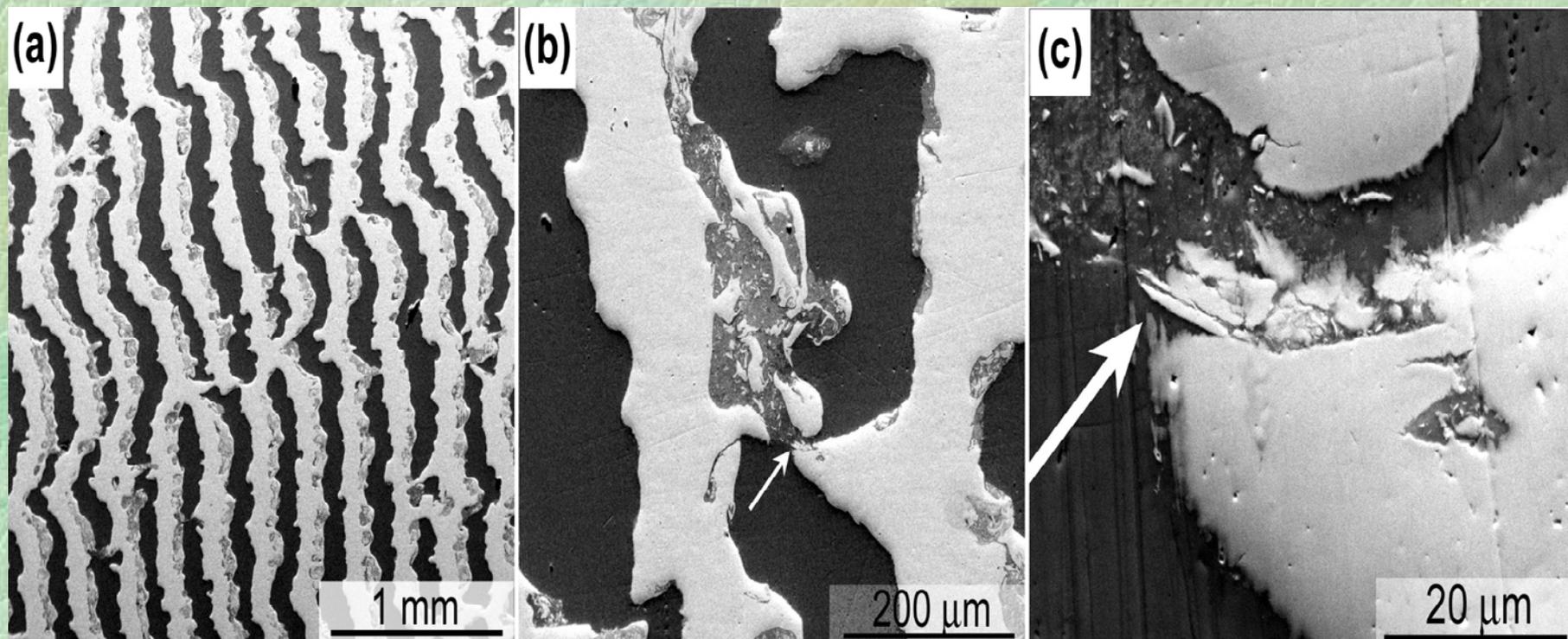
**J. Recent Successes in Tantalum  
Clad Pressure Vessel Manufacture: A New  
Generation of Tantalum Clad Vessels //  
Proceedings of Corrosion Solutions  
Conference USA: Wah Chang.  
P. 163–169.**

- *Размеры корпуса реактора:*
- *Длина 12.6 м*
- *диаметр 2.1 м*
- *толщина стенки 50 мм*  
*толщина слоя тантала 1 мм*

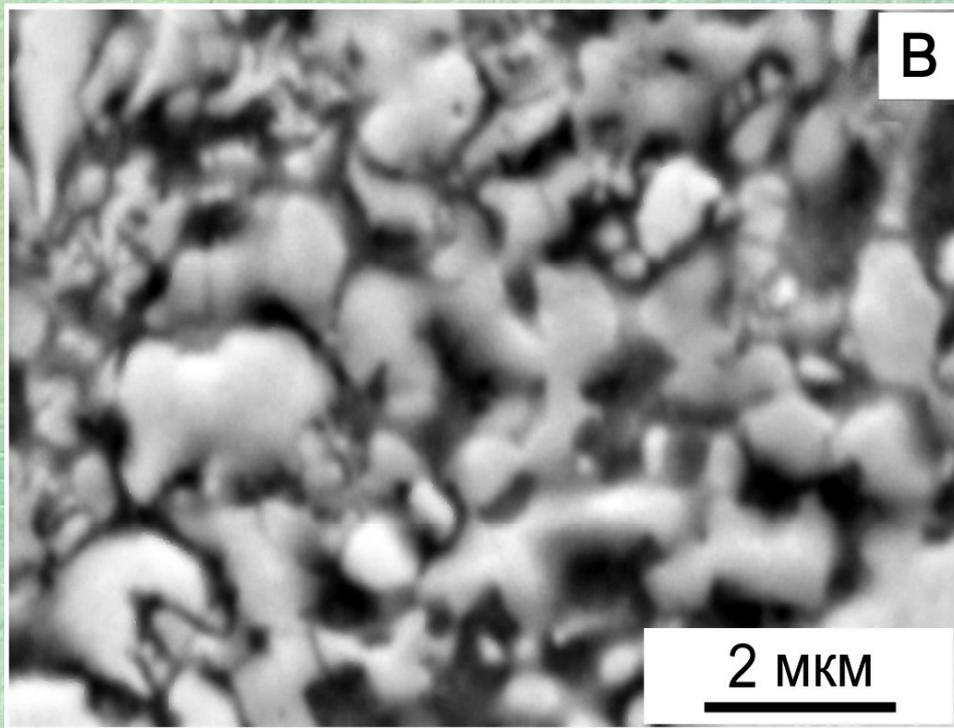
# Продольное сечение волнообразной поверхности раздела для соединения (С<sub>w</sub>) медь-тантал (СЭМ)



**(Cw) медь-тантал,  
волна,  
продольное сечение**



# Дисперсионное упрочнение



В

- *Микротвердость зон локального расплавления:*
- *3000 МПа (на 2000 МПа больше, чем у меди)*

# Минимизация зон риска

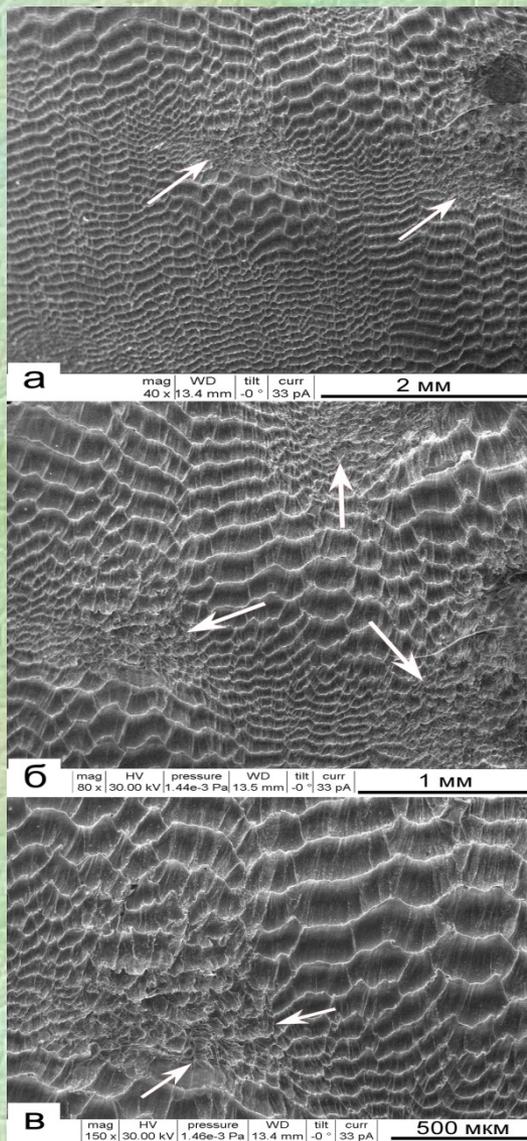
- *регулярная волнообразная граница;*
- *выступы на границе;*
- *зоны локального расплавления:  
коллоидный раствор типа суспензии  
(медная матрица, дисперсионно  
упрочненная частицами тантала)*

# Почему выбор соединения медь-тантал оказался удачным?

- *нет химических соединений (отсутствует взаимная растворимость);*
- *нет коллоидного раствора типа эмульсии (плавится только медь)*
- *Greenberg, B.A., Ivanov, M.A., Rybin et al*
- *The problem of intermixing of metals possessing no mutual solubility upon explosion welding.*
- *Mater. Charact. 2013. 75: 51-62.*

# И все-таки зоны риска существуют:

Квазиволновая  
поверхность для  
соединения ( $C_w$ )  
Структура типа  
“лоскутного одеяла”



# Нефтехимический реактор (коксовая камера)



## **Оболочка камеры:**

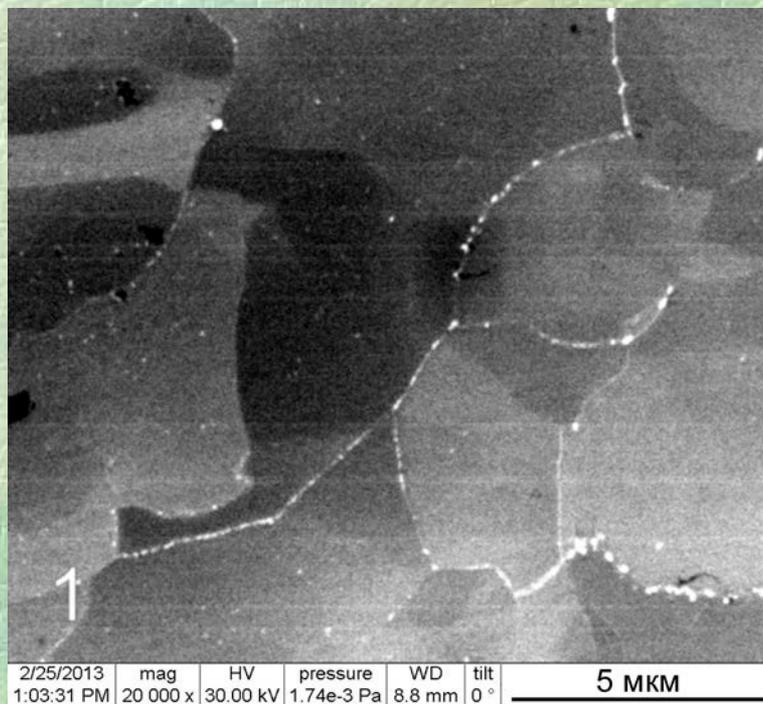
**композит сталь 08Х13 – сталь 12ХМ**

- *Для внутренней оболочки камеры:  
хромистая сталь 08Х13  
(коррозионностойкая и жаростойкая  
вплоть до 750-800°С).*
- *Для наружной оболочки камеры:  
значительно более дешевая  
низколегированная сталь 12ХМ.*

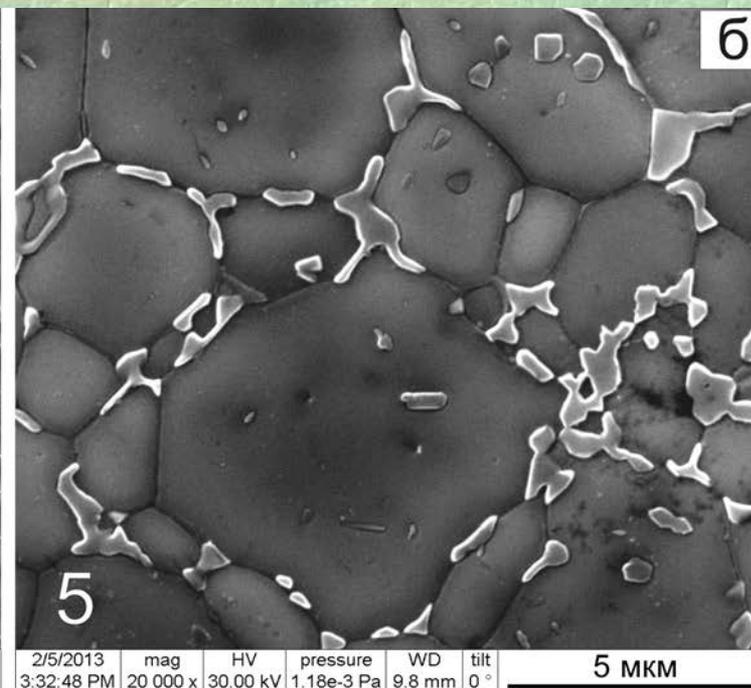
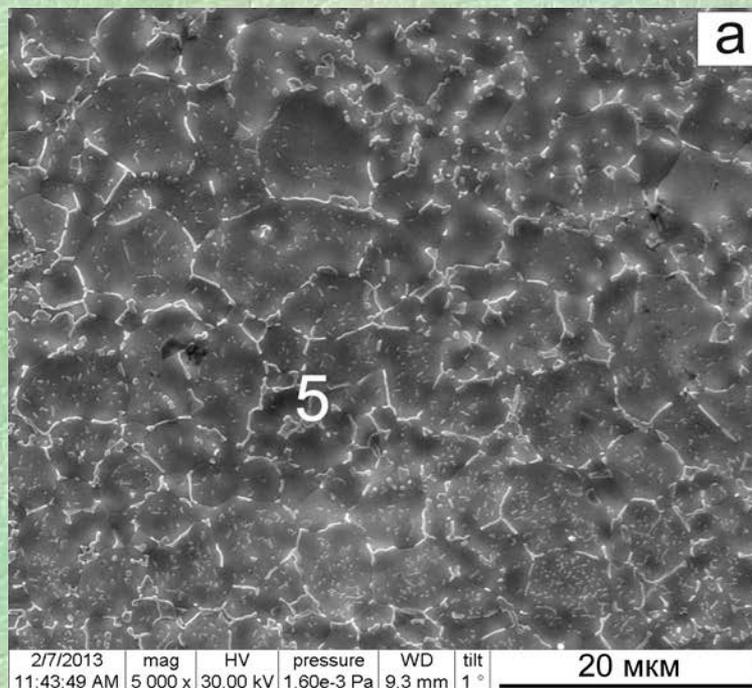
# Размеры листов и параметры сварки

- *Листы, полученные сваркой взрывом, имеют длину 4-5м и ширину до 2.4м. Толщина пластины стали 08Х13 - 6 мм, толщина пластины стали 12ХМ – 24 мм.*
- *Скорость точки контакта 2400-2700 м/с. Соударение пластин под углом 9-11°.*
- *После сварки проводили отпуск для снятия остаточных напряжений при 680-700 °С , 2 часа.*

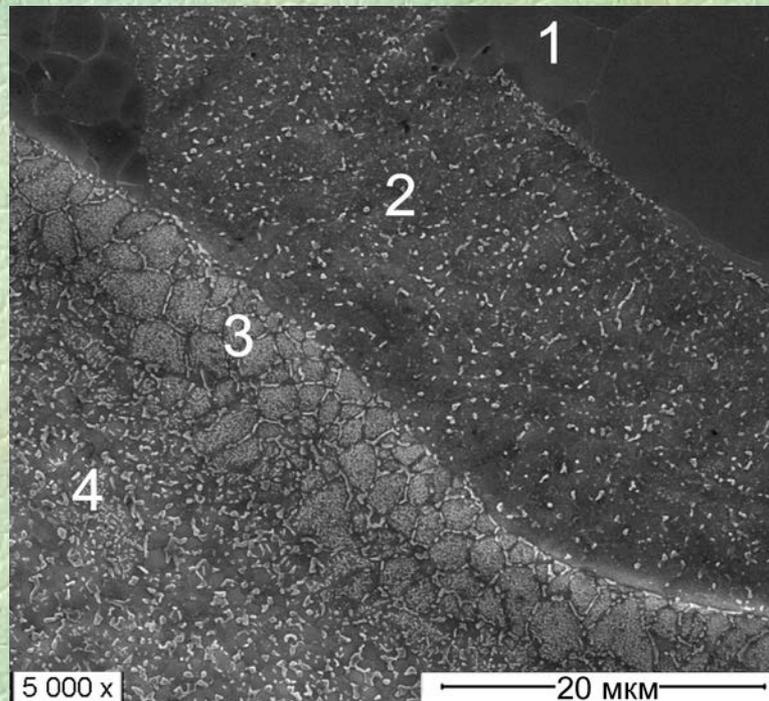
# Зона 1 - рекристаллизованная сталь 12ХМ



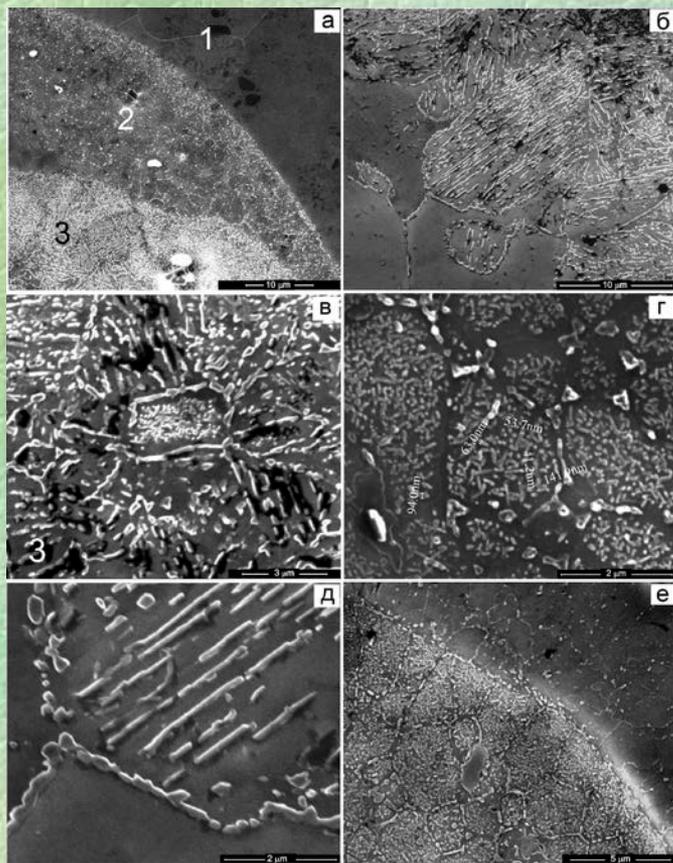
# Зона 5 - рекристаллизованная сталь 08X13



**Переходы между зонами: резкая граница между зонами 2 и 3, почти белая зона 3**



## Зона 3, содержащая колонии стержневидных карбидов, имеющие различную ориентацию



- *микротвердость зоны стержневидных карбидов (толщина стержней 40-60 нм)*
- *составляет 3600 МПа (на 2000 МПа больше, чем для рекристаллизованных сталей)*

## Роль зоны 3

- *Колонии стержневидных карбидов: “лабиринт”, выход из которого затруднен, поскольку затруднены процессы перерезания и огибания стержней.*

# СЕГРЕГАЦИЯ

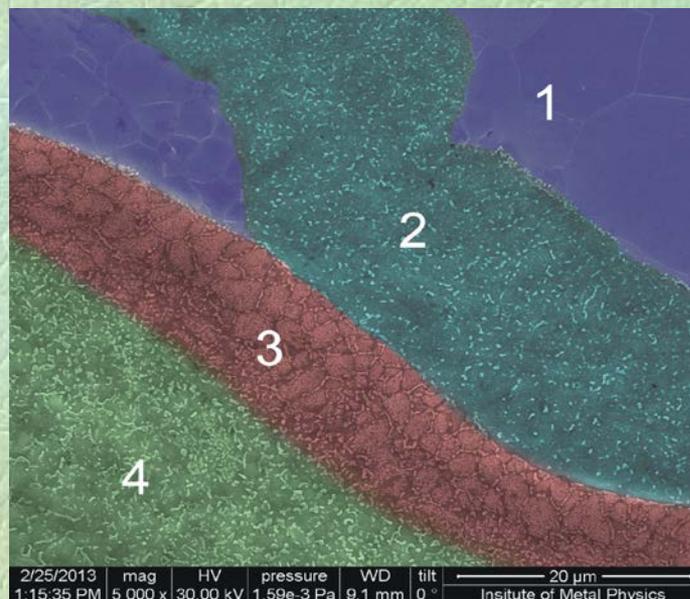
- Для углерода коэффициенты диффузии в стали  $\sim 0.8 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/с для твердой фазы при повышенных температурах и  $\sim 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с для расплава.
- Тогда возникает поток углерода из расплава стали 12ХМ в твердую фазу 08Х13.
- В результате на границе расплава и хромистой стали будет возникать сегрегация углерода.

# Движущая сила для сегрегации:

- *понижение энергии углерода за счет связывания больших концентраций хрома и углерода в колонии стержневидных карбидов.*

# Две зоны риска

- *Образование зоны сегрегации инициировано транспортом углерода из зоны локального расплавления.*
- *В результате обе зоны (как расплавления, так и сегрегации) оказались зонами риска.*
- 
- *Greenberg, B.A., Elkina, O.A., Patselov, A.M., Plotnikov, A.V., Ivanov, M.A., Besshaposhnikov, Yu.P. 2015. Risk zones for coke drum shell produced by explosive welding. J. Mater. Process. Technol. 15: 79–86.*



Переходы между зонами

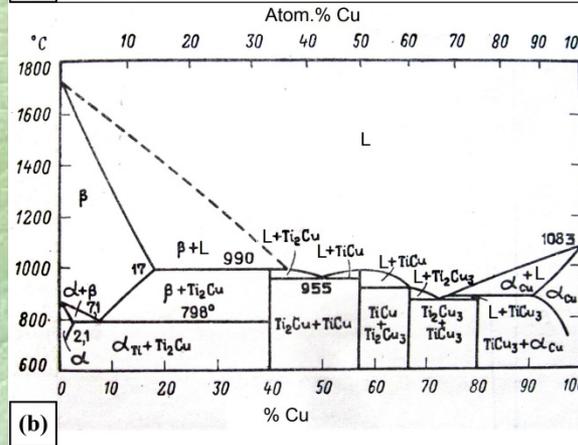
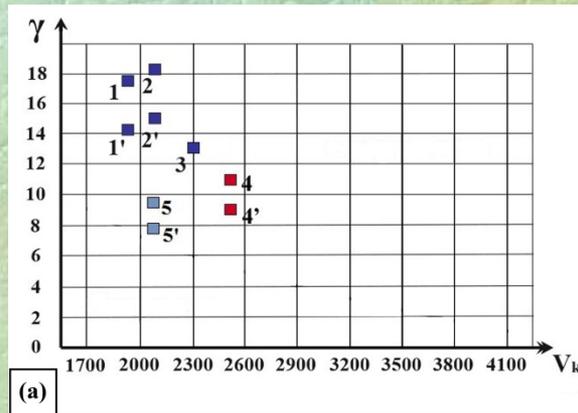


Стержневидные карбиды (зона 3) при большом увеличении

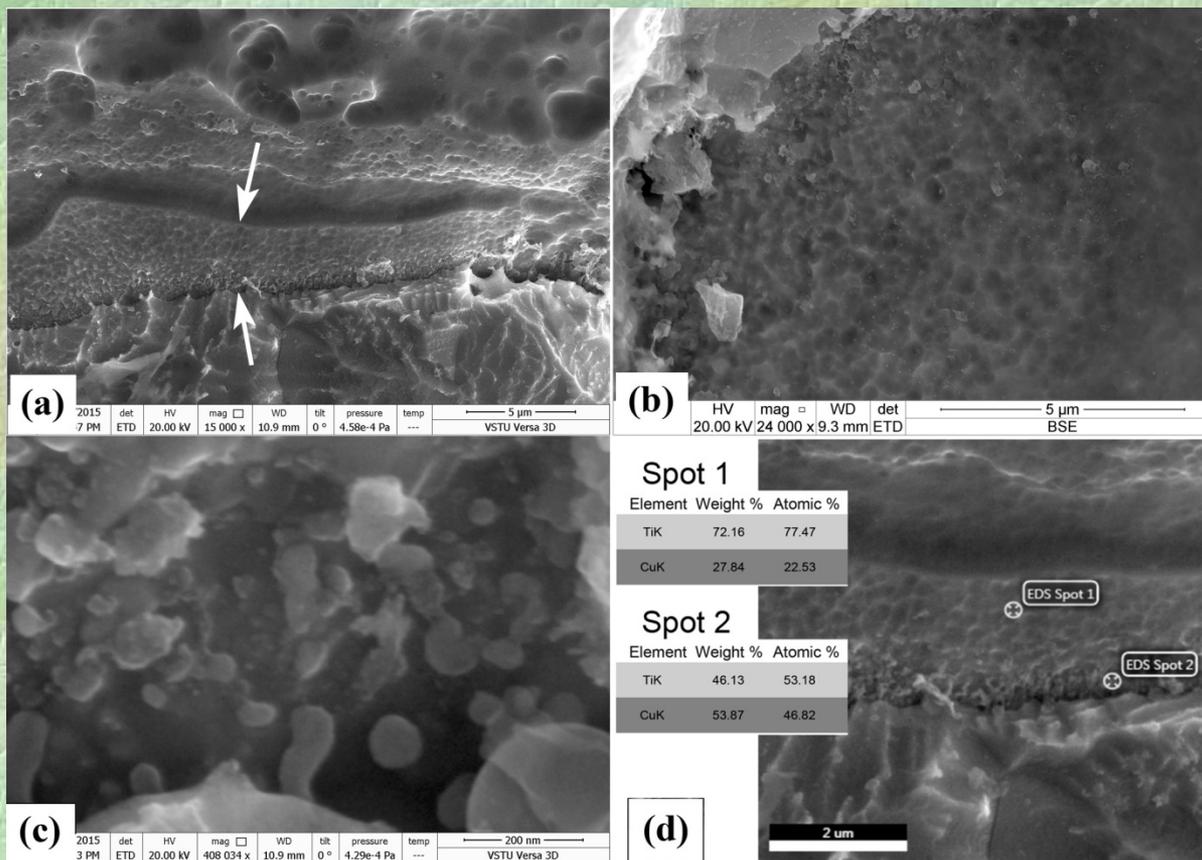
# Наши рекомендации

- *1. Выбор режима термообработки (680-700 °С, 2 ч) был не самым удачным из-за эвтектоидного распада. Длительность эксплуатации камеры была ниже расчетной.*
- *2. Предлагаем использовать нагрев (500 °, 2 ч): эвтектоидные карбиды не образуются.*
- *3. При нагреве (500 °, 10 ч) нет эвтектоидного распада, происходит рекристаллизация и снятие остаточных напряжений.*

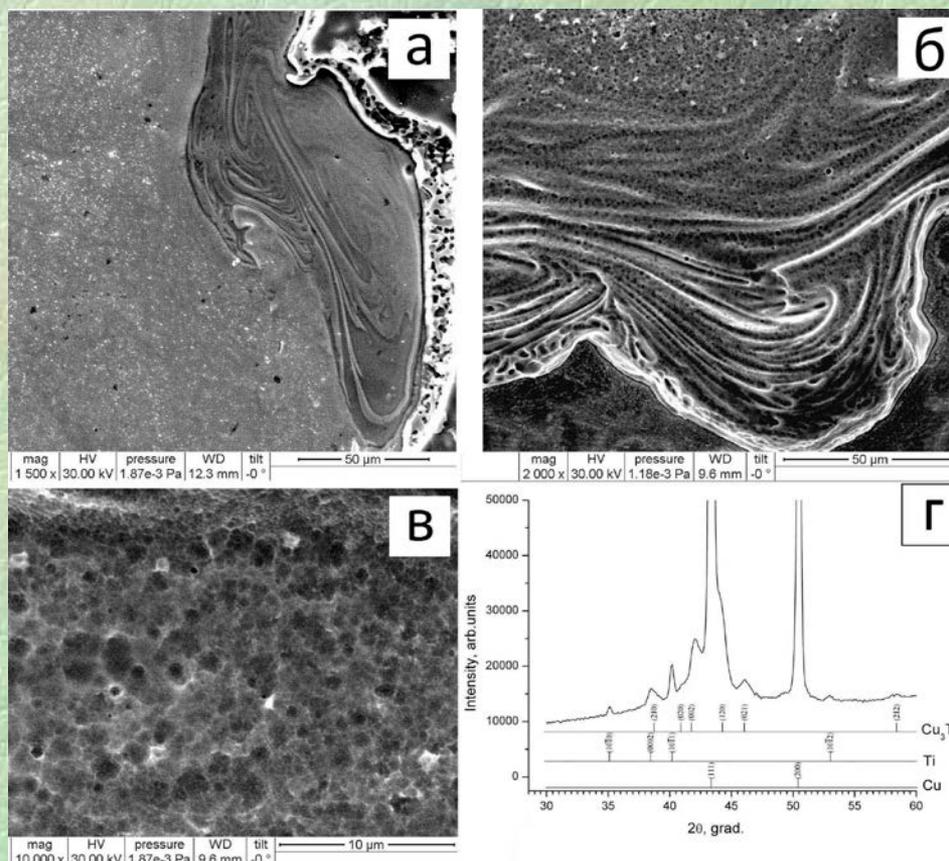
# Образование интерметаллидов (Cu-Ti)



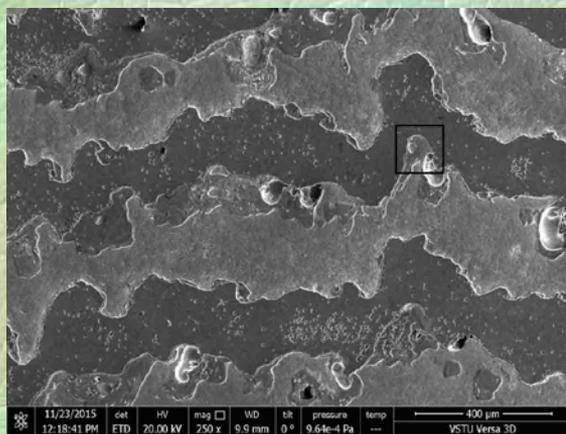
# Внутренняя структура зоны локального расплавления



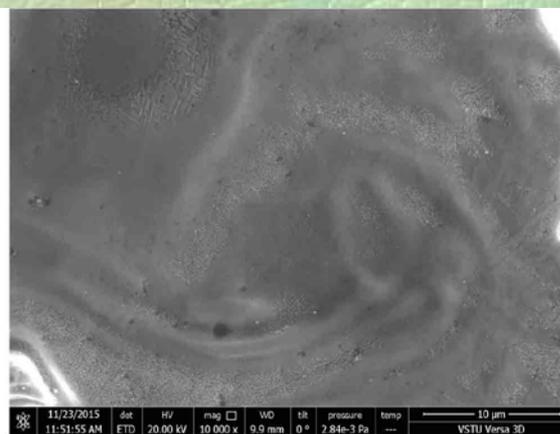
**Рис. 15. Внутренняя структура зоны локального расплавления: а – вихри; б – вихри и частицы; в – частицы кластеров и интерметаллидов вне вихрей; г - дифрактограмма зоны локального расплавления)**



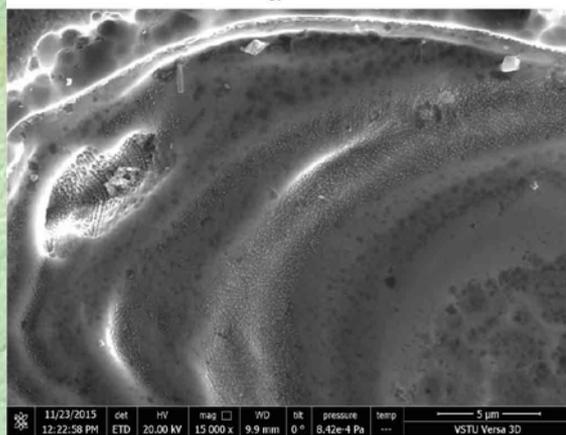
**Микрогетерогенная структура зон локального расплавления: а – продольное сечение волнообразной поверхности; б, в – вихревая структура зоны при разном увеличении; г - частицы кластеров и интерметаллидов внутри зоны**



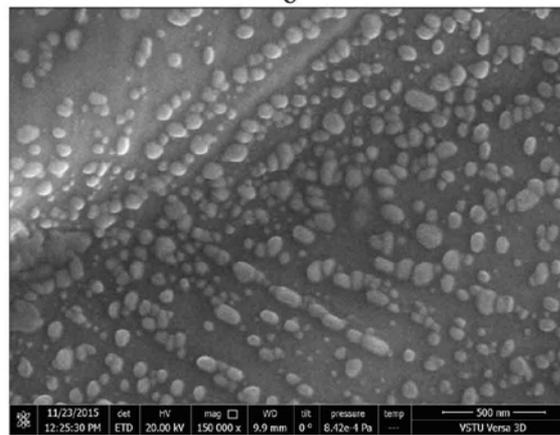
**а**



**б**

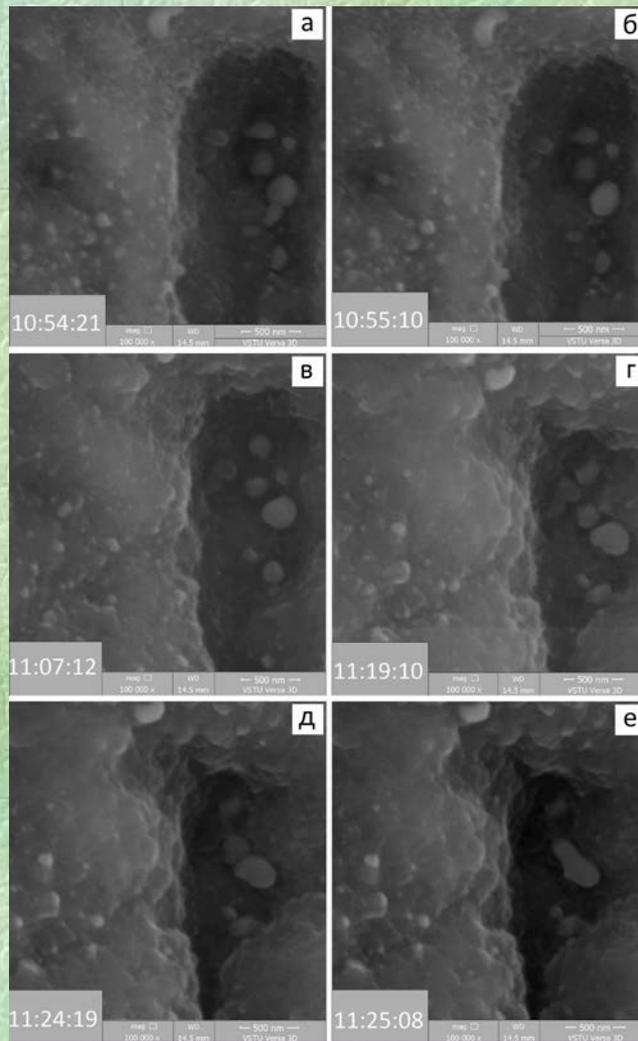


**в**



**г**

# Изменение формы частиц при нагреве (700°C)



# ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- *Nanostructure of vortex during explosion welding.*
- *J. of Nanosci. Nanotechnol. 2011.11(10): 8885–8895.*
- *The problem of intermixing of metals possessing no mutual solubility upon explosion welding.*
- *Mater. Charact. 2013. 75: 51-62.*
- *Interface relief upon explosion welding: splashes and waves // The Physics of Metals and Metallography, 2015, vol. 116, №4, pp. 367-377.*

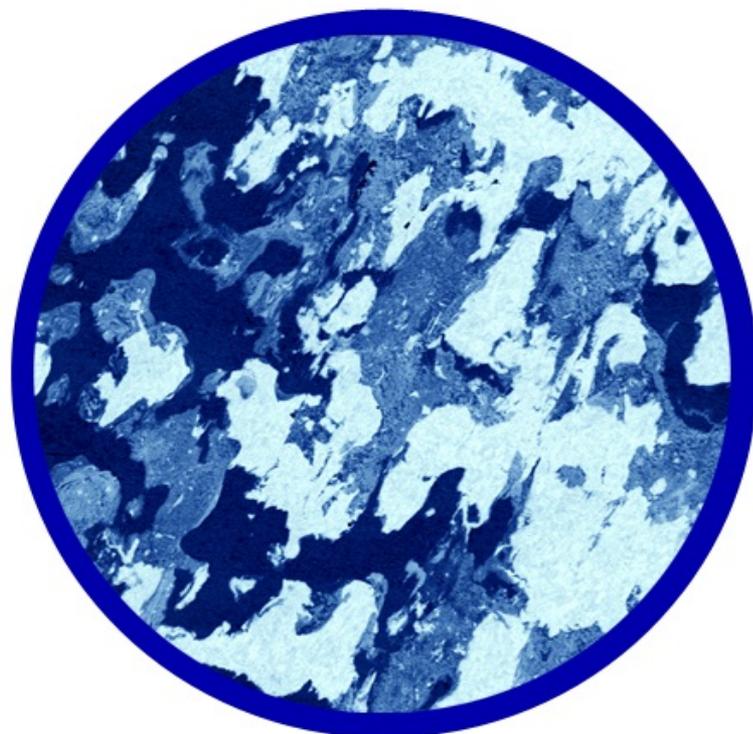
-

- *Evolution of interface relief during explosive welding // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2015. — V. 79. — P. 1118—1121.*
- *Microheterogeneous Structure of Local Melted Zones In The Process Of Explosive Welding // Metallurgical and Materials Transactions – A, 2015, Vol 46, No 8, pp. 3569-3580.*
- *Risk zones for coke drum shell produced by explosive welding. J. Materials Processing Technology. 2015. 15: 79–86.*
- *2015. Chapt. in the book “Tantalum: Geochemistry, Production and Potential Applications”. USA, NY: Nova Science Publishers, Inc.*
-

- *Quasi-wave shape of an interface upon explosive welding // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics – 2016. – V.80. – №10. – P. 1273-1278.*
- *Formation of intermetallic compounds during explosive welding // Metallurgical and Materials Transactions – A, 2016, Vol 47, No 11, pp. 5461-5473.*
- *The structure of molten zones in explosion welding (aluminium–tantalum, copper–titanium) // Welding International, February 2017*
- *Explosive welding: risk zones // Welding Journal 2017 (in press)*
-

# СВАРКА ВЗРЫВОМ: ПРОЦЕССЫ И СТРУКТУРЫ

РЕДАКТОРЫ:  
Гринберг Б.А.  
Иванов М.А.  
Кузьмин С.В.  
Лысак В.И.



Хотя и зоны риска,  
но смеяться,  
право, не грешно...



- *Спасибо*

- *за*

- 

*внимание*