



Международная научная конференция  
«Сварка и родственные технологии для изготовления  
оборудования специального и ответственного назначения»



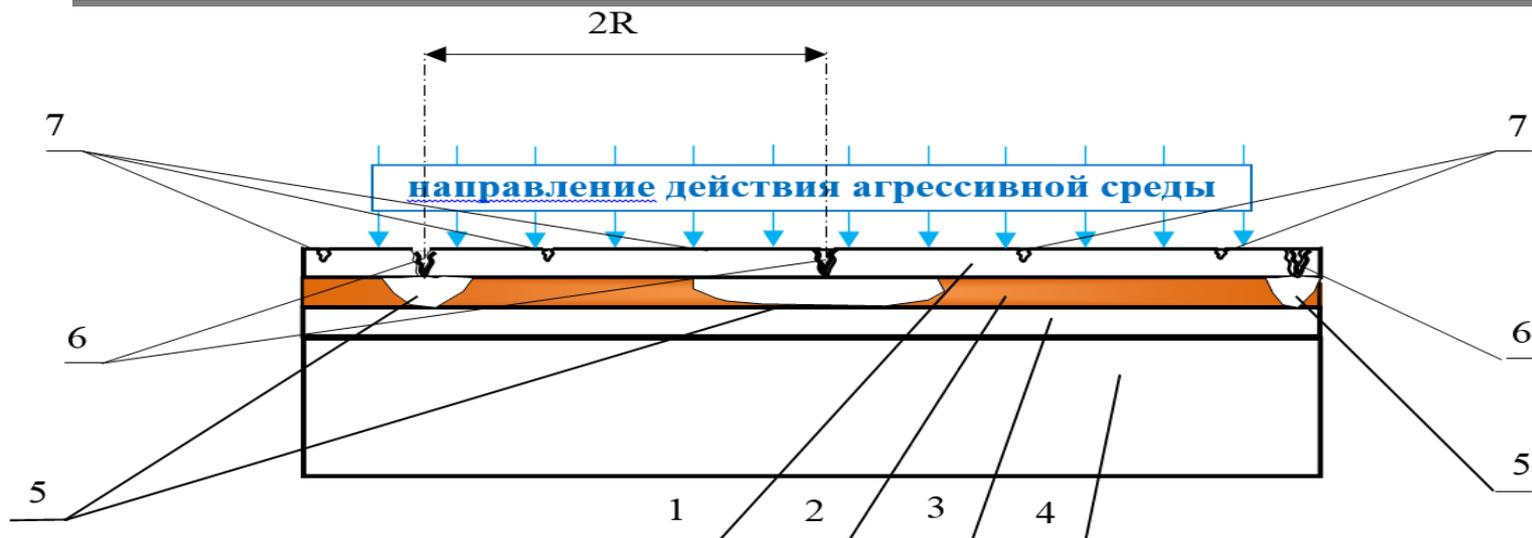
# ПОЛУЧЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ВНУТРЕННИМ ПРОТЕКТОРОМ

Д.т.н., профессор,  
**Розен Андрей Евгеньевич**  
E-mail: [aerozen@bk.ru](mailto:aerozen@bk.ru)  
+7 927 380 93 81

28-30 мая 2019 года , Москва



# Архитектура слоистого металлического материала с внутренним протектором



1 – наружный слой; 2 – внутренний протектор; 3 – третий слой; 4 – базовый слой;  
5 – линзы в протекторе из продуктов коррозии; 6 – сквозные питтинги первого слоя;  
7 – питтинги, у которых прекратился рост ввиду электрохимического воздействия внутреннего протектора; R – радиус действия внутреннего протектора

**Повышение коррозионной стойкости в 10 раз и более !**

**«Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения».**

**Техническое решение запатентовано в 11 странах**



*Евразийский патент № 016878 ЕАПВ «Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения», С23F 13/06, В 32В 7/02 // А.Е. Розен, И.С. Лось, Ю.П. Перельгин [и др.] - выдан 30.06.2012, приоритет от 26.09.2008.*

# Способы получения материала с ВП

1. Пакетная прокатка

2. **Сварка взрывом + термическая обработка и правка**

3. К: - пакетная прокатка + сварка взрывом  
- **сварка взрывом + прокатка**

4. К: - электродуговая наплавка + прокатка  
- электрошлаковая наплавка + прокатка

5. Газодинамическое напыление

6. Газотермическое напыление

7. К: электроосаждение + прокатка

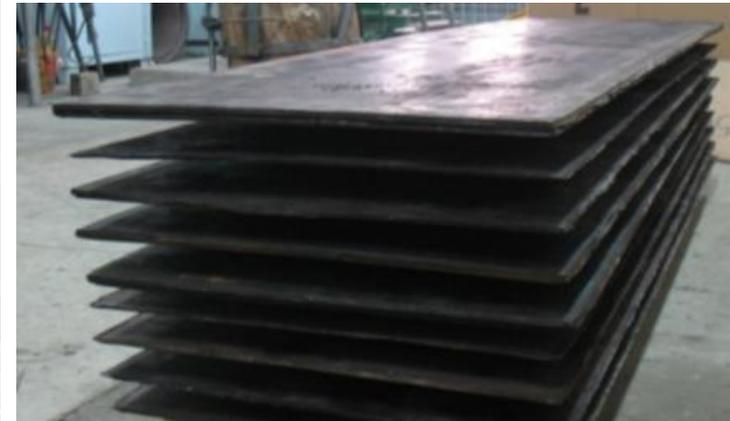
8. Аддитивная технология послойного синтеза

Примечание: К – комбинированная технология

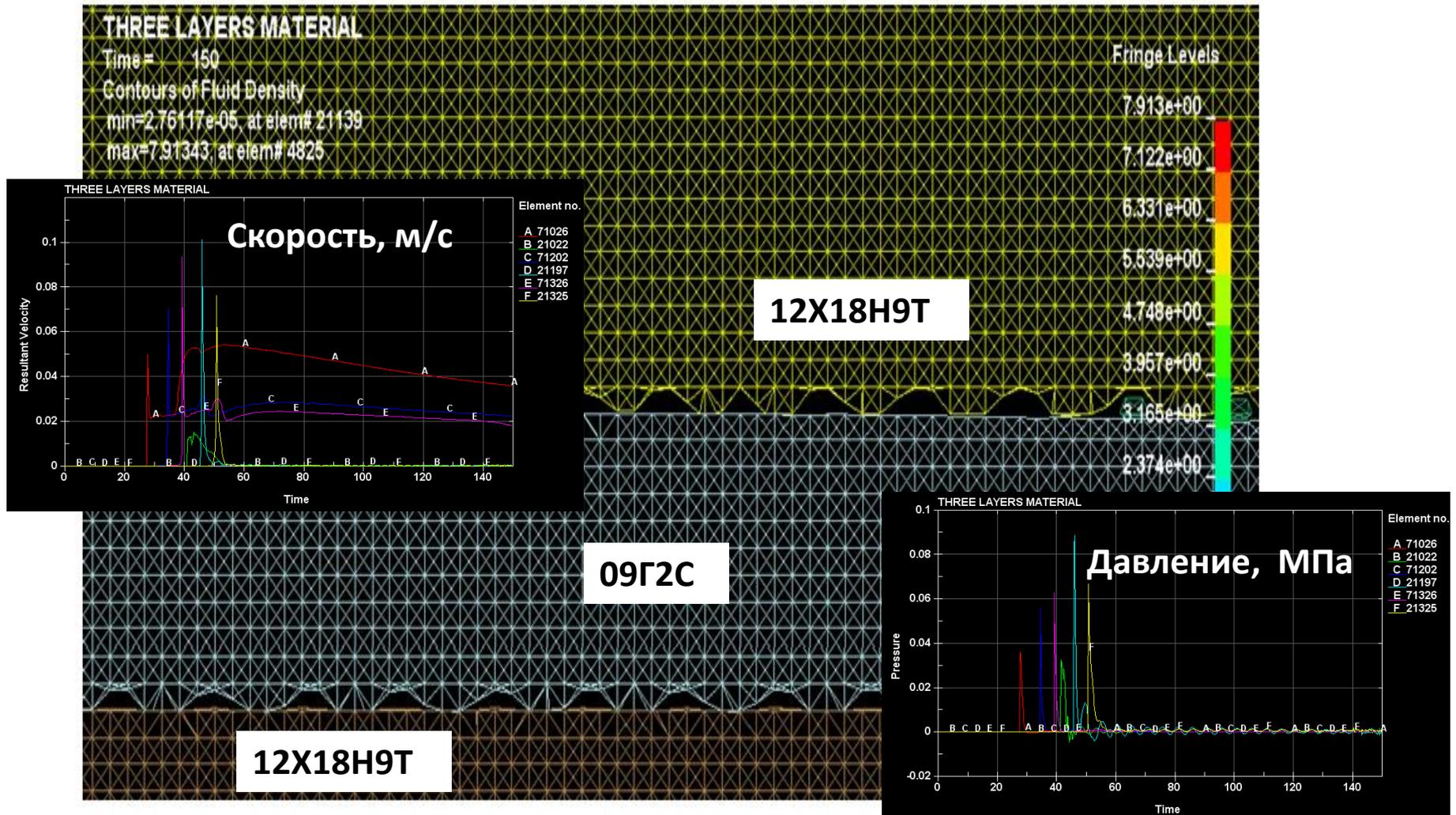
# Производство МВП сваркой взрывом

---

Команда проекта **более 30 лет** осуществляет промышленный выпуск биметалла сваркой взрывом и **6 лет** производит МВП

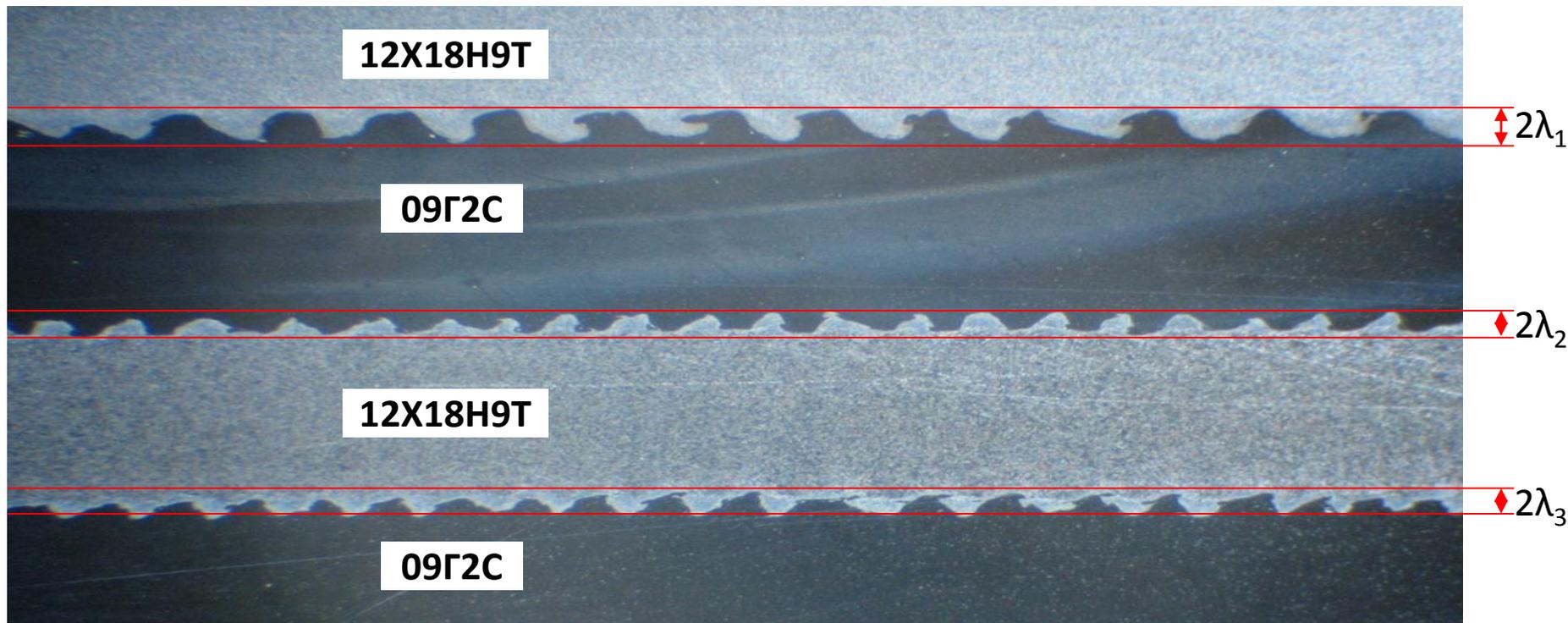


# Моделирование процесса волнообразования при сварке взрывом



Розен А.Е., Муйземнек А.Ю. и др. Компьютерное моделирование деформации составляющих слоев биметалла в процессе сварки взрывом с использованием программы LS-DYNA // Межвуз. Сб. науч. статей Известия ВолгГТУ, серия Сварка взрывом и свойства сварных соединений, выпуск 4, № 5(65), Волгоград, 2010. – 45-53

# Профиль межслойных границ при сварке взрывом с применением расчётных параметров



Отклонение по амплитуде волны ( $2\lambda$ ) на каждой межслойной границе не превышает **37 %** (снижено **в 5 раз**).

Отклонение экспериментальных и расчётных значений не превышает **24 %**.  $2\lambda = 110...150$  мкм.

# Образцы МВП различной архитектуры



1 – слои с высоким электрохимическим потенциалом; 2 – внутренние протекторы;  
3 - слой, по которому рассчитывают прочность всей металлоконструкции.

# Дуговые методы сварки для получения неразъёмных соединений МВП

Апробированы **промышленные способы сварки**:

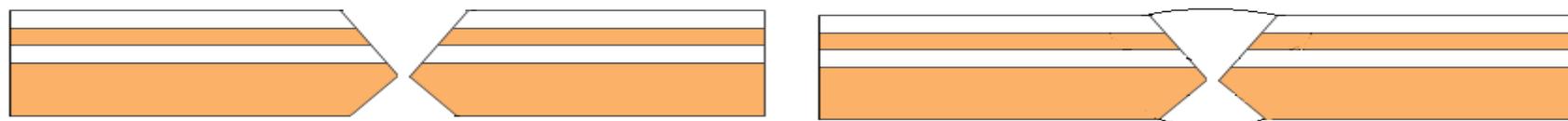
- ручная дуговая покрытыми электродами;
- ручная аргонодуговая неплавящимся электродом;
- механизированная плавящимся электродом в инертном газе;
- автоматическая под флюсом;
- комбинированные способы сварки



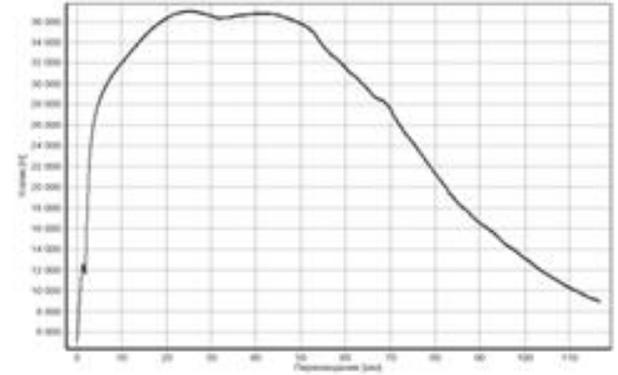
аналог С17 по ГОСТ 5264-80



аналог С20 по ОСТ 26.260.480-2003



# Предварительные исследования механических и технологических свойств



# Единый отраслевой тематический план ГК Росатом

## «Многослойные металлические материалы с внутренним протектором для объектов хранения и переработки РАО»

**Цель:** создание и разработка нормативных требований к новым коррозионно-стойким многослойным металлическим материалам с внутренним протектором, в 10 раз и более превышающих коррозионную стойкость нержавеющей сталей аустенитного класса, при условии обеспечения высоких механических и технологических свойств и сохранении указанных качеств в сварных соединениях при изготовлении объектов для хранения РАО»

### Команда проекта

Экспертная оценка  
ГК «Росатом»:  
уровень технологической  
готовности  
(«Technology Readiness Level»)

**TRL 4**

- ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»



- ООО «Ромет»



- АО «Институт реакторных материалов»



- ФГУП «ПО «Маяк»





Международная научная конференция  
«Сварка и родственные технологии для изготовления  
оборудования специального и ответственного назначения»



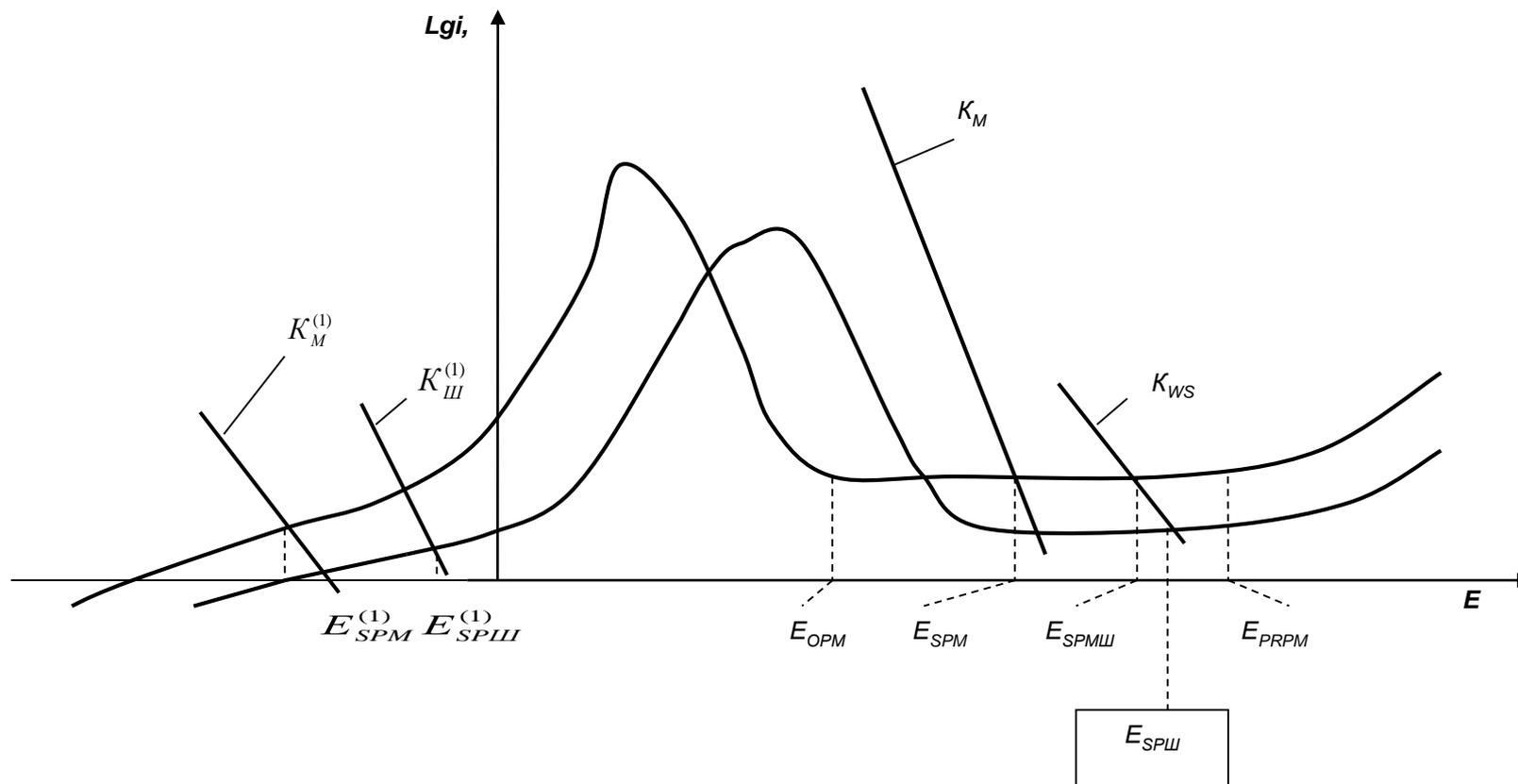
# ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ВНУТРЕННИМ ПРОТЕКТОРОМ

Д.т.н., профессор,  
**Розен Андрей Евгеньевич**  
E-mail: [aerozen@bk.ru](mailto:aerozen@bk.ru)  
+7 927 380 93 81

28-30 мая 2019 года , Москва



# Поляризационные кривые СММ с ВП и сварного шва



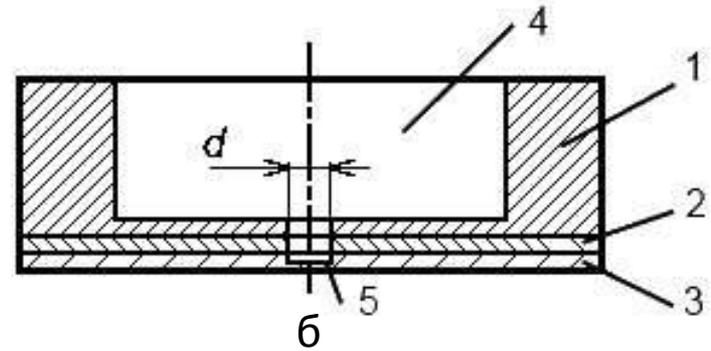
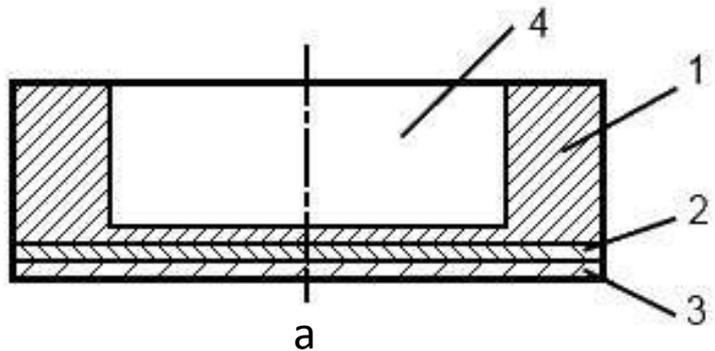
$E_{SPM}^{(1)}$  - первичный электрохимический стационарный потенциал;

$E_{SPM}$  - электрохимический стационарный потенциал;

$E_{OPM}$  - электрохимический потенциал полной пассивации;

$A_M$  - анодная и  $K_M$  - катодная поляризационные кривые СКМ,

# Испытания на коррозионную стойкость



в

г

Образцы без искусственного питтинга (а, в) и с искусственным питтингом (б, г) 1 – 1-й слой; 2 – 2-й слой (протектор); 3 – 3-й слой; 4 – полость для реактива; 5 – искусственный питтинг

# Испытания на коррозионную стойкость

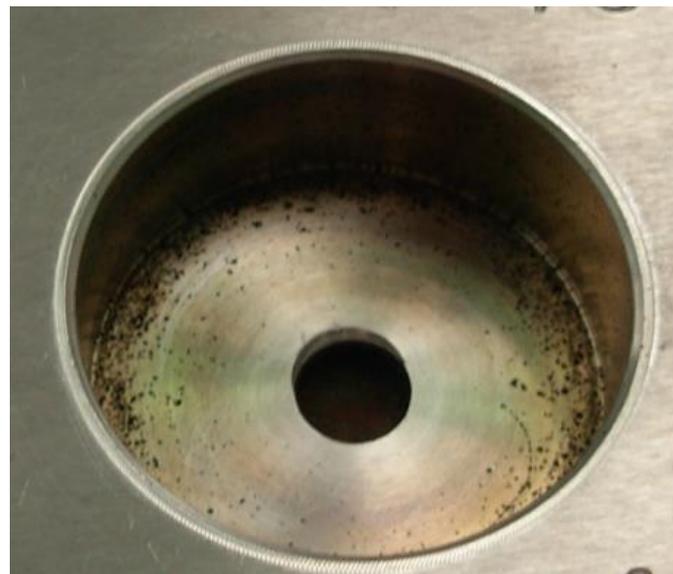
В качестве реактива использовали **10% - ный раствор** трихлорида железа гексагидрата  **$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$**



а



б



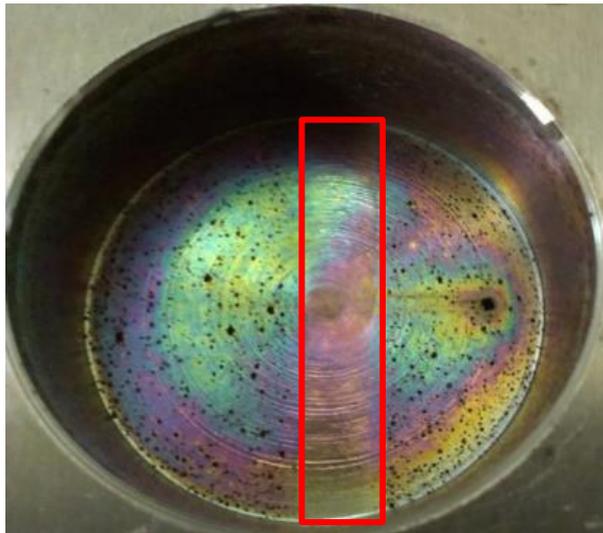
в

Образцы с искусственным питтингом (а, в), без искусственного питтинга (б)

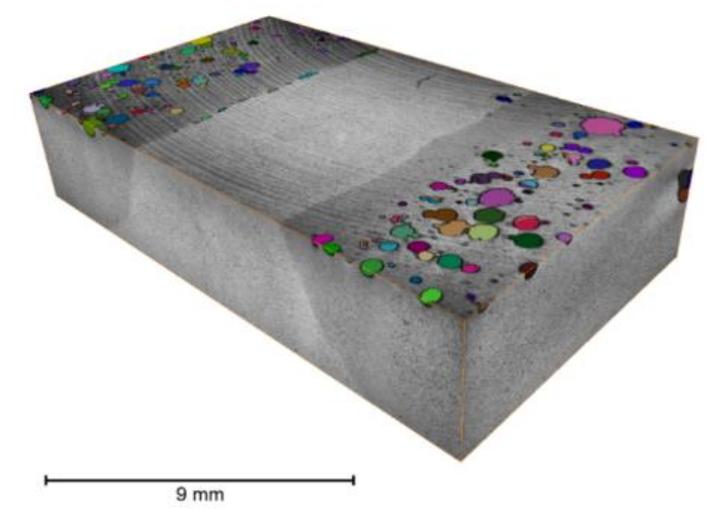
# Коррозионные испытания сварного шва

## Первая серия экспериментов

Был определен характер коррозионного поражения в сварном шве, не имеющем поверхностных дефектов



Общий вид трёхслойного образца со сварным швом после коррозионных испытаний.

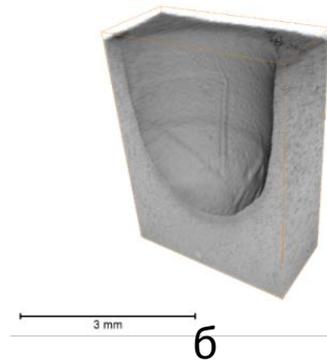
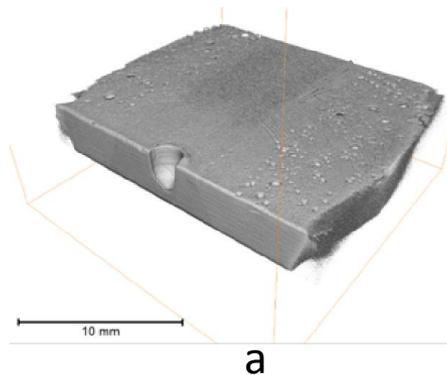


3D-визуализация объема питтингов на поверхности трёхслойного образца

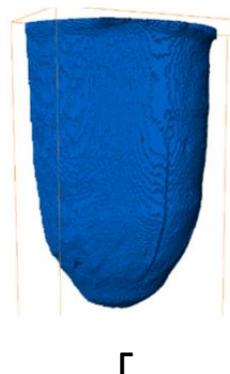
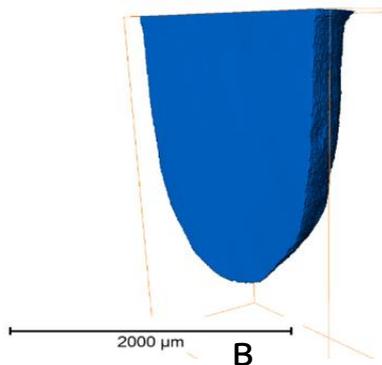
# Коррозионные испытания сварного шва

## Вторая серия экспериментов

Была установлена особенность коррозионного поражения сварного шва при наличии в нём поверхностного дефекта диаметром 1,5 мм и глубиной 3,0 мм.



3D-визуализация томографических данных всей области искусственного питтинга в теле сварного шва трёхслойного образца (а) и области проведения численного анализа (б)

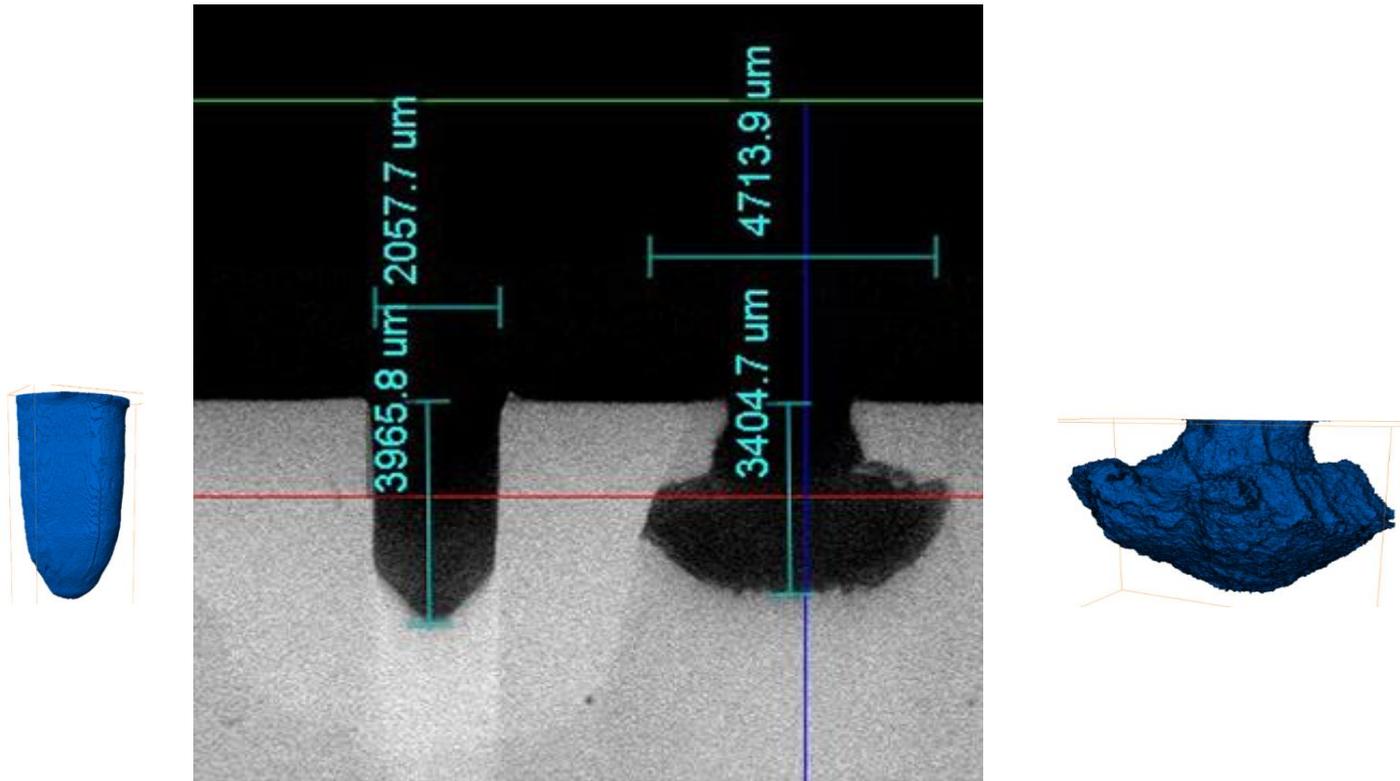


3D-визуализация бинарной модели искусственного питтинга в теле сварного шва трёхслойного образца

# Коррозионные испытания сварного шва

## Третья серия экспериментов

Особенности развития коррозионных процессов в зоне сплавления

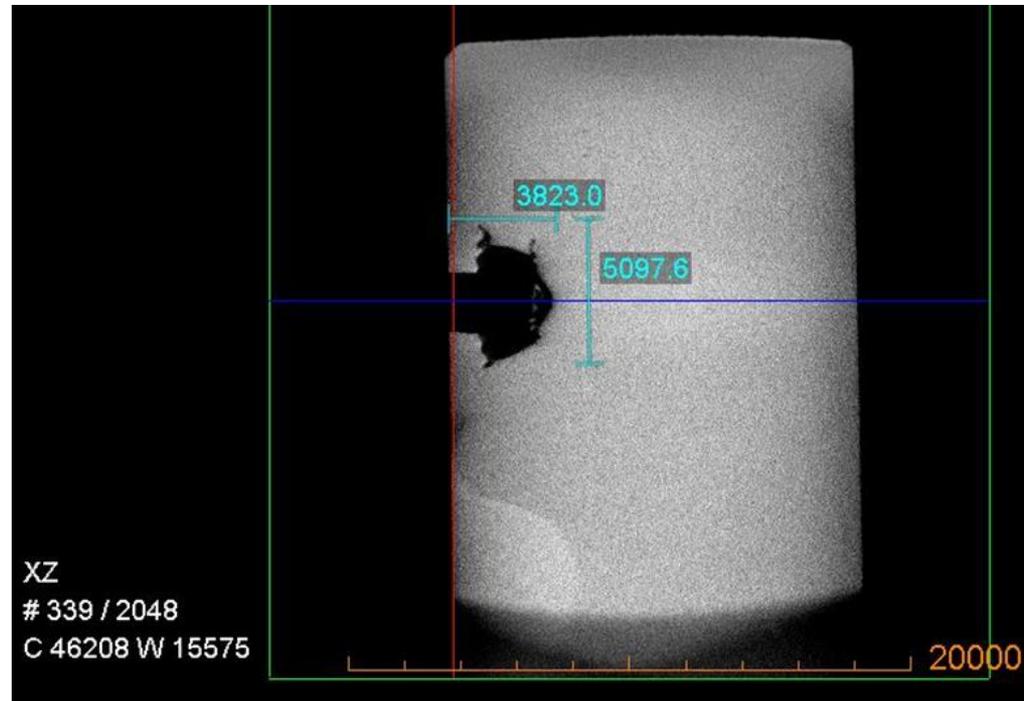


Пример виртуального сечения четырёхслойного образца.  
Область сварного шва и искусственного питтинга на расстоянии 3 мм

# Коррозионные испытания сварного шва

## Четвёртая и пятая серии экспериментов

Были установлены условия развития коррозионных процессов на удалении 5 и 10 мм от сварного шва



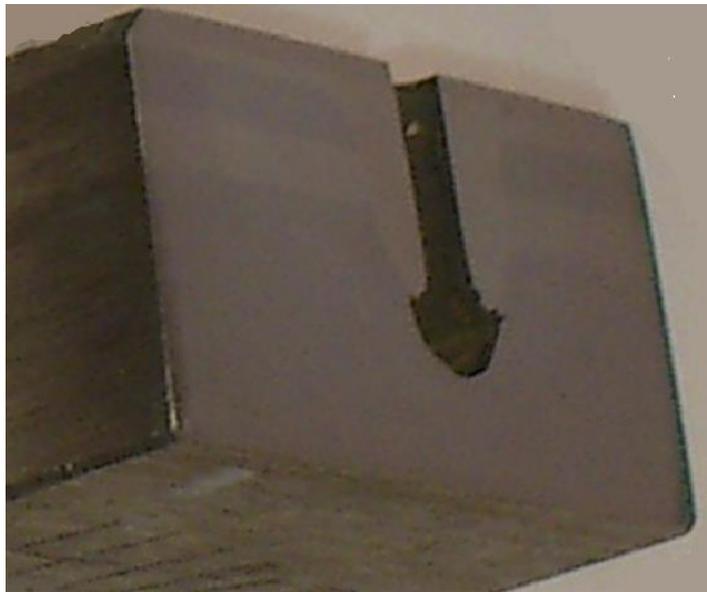
Пример виртуального сечения четырёхслойного образца.  
Область сварного шва и искусственного питтинга на расстоянии 10 мм.

# Коррозионные испытания сварного шва

---

## *Шестая серия экспериментов*

Были установлены условия развития коррозионных процессов в условиях создания глубоких глухих отверстий диаметром 1,5 мм и глубиной 10 мм в сварном шве



Общий вид сечения коррозионного поражения четырёхслойного образца из шестой серии эксперимента



Международная научная конференция  
«Сварка и родственные технологии для изготовления  
оборудования специального и ответственного назначения»



# МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ СЛОЛИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ВНУТРЕННИМ ПРОТЕКТОРОМ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Д.т.н., профессор,  
**Розен Андрей Евгеньевич**  
E-mail: [aerozen@bk.ru](mailto:aerozen@bk.ru)  
+7 927 380 93 81

28-30 мая 2019 года , Москва



# Методики ускоренных коррозионных испытаний

**Электрохимический метод путём измерения величины плотности тока коррозии металлов, находящихся в контакте**

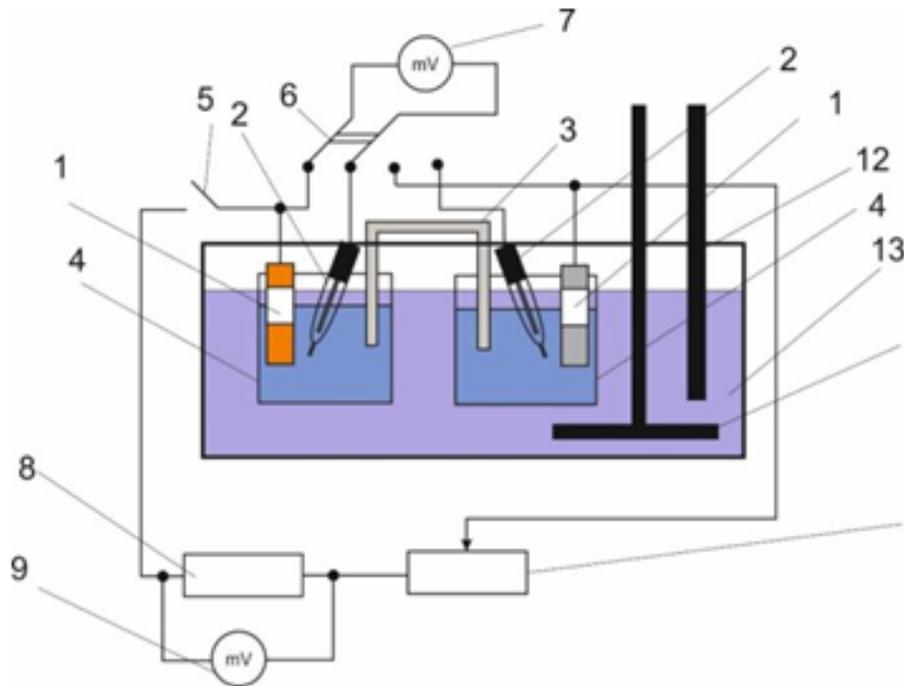
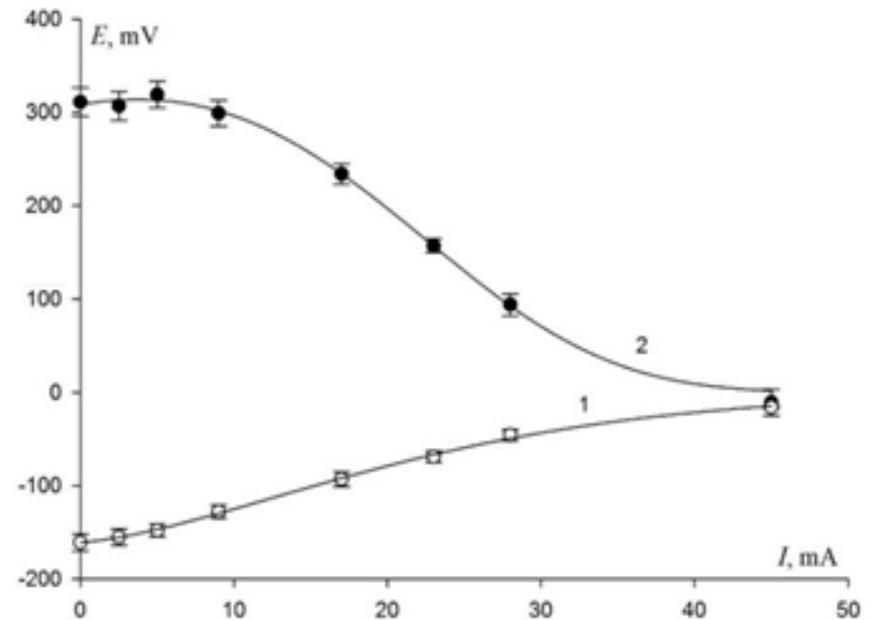


Схема установки для электрохимического исследования коррозионных элементов и построения коррозионных диаграмм



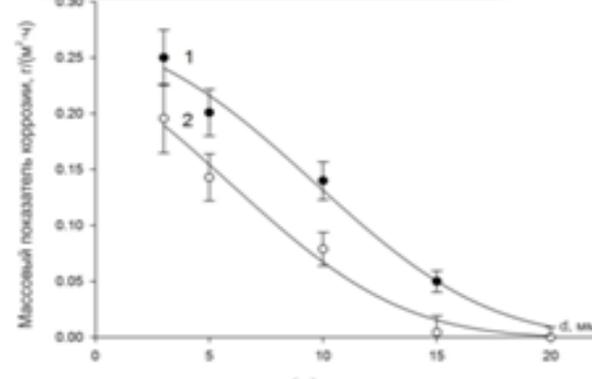
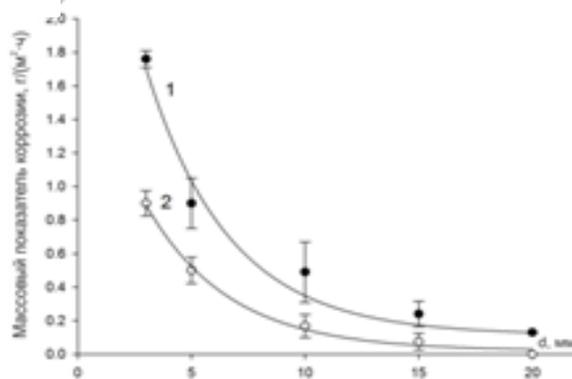
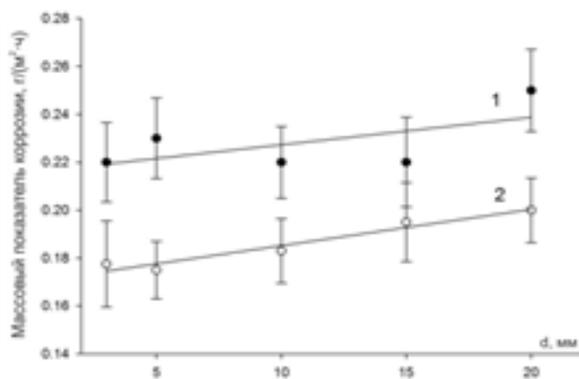
Коррозионная диаграмма гальванической пары 08Х18Н10Т (кривая 2) – сталь 09Г2С (кривая 1)

# Методики ускоренных коррозионных испытаний

**Химический метод** с применением образцов разборного типа и их гравиметрическим измерением. Рассчитывали массовый показатель коррозии ( $\text{г/м}^2\cdot\text{ч}$ )

$$K_{\text{масс}}^- = \frac{\left[ (m_{01} + m_{02} + m_{03}) - (m_{11} + m_{12} + m_{13}) \right]}{\tau \cdot (S_1 + S_2 + S_3)}$$

где,  $m_{01}, m_{02}, m_{03}, m_{11}, m_{12}, m_{13}$  - массы пластин трёх параллельных образцов до и после испытаний, (г);  $\tau$  – продолжительность экспонирования (ч);  $S_1, S_2, S_3$  - суммарная площадь контакта исследуемых пластин для трёх параллельных образцов с коррозионной средой ( $\text{м}^2$ )

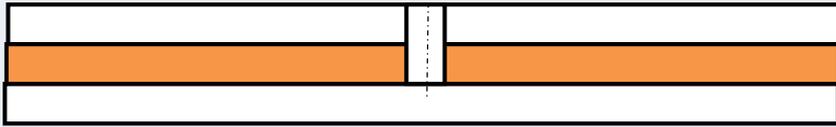


Массовый показатель коррозии наружного (а), среднего (б) и нижнего слоев (в) времени экспозиции 720 ч (кривая 1) и 2208 ч (кривая 2).

# Методики ускоренных коррозионных испытаний

## Образцы с одним ВП

### Первый комплект

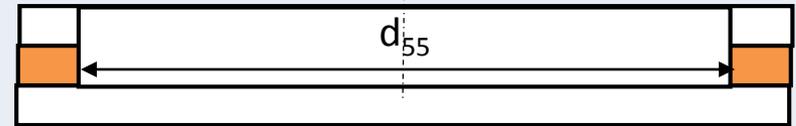
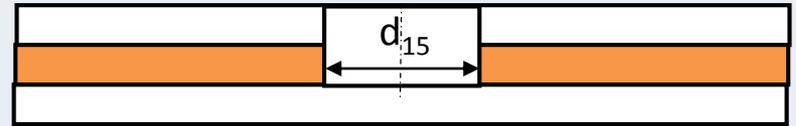
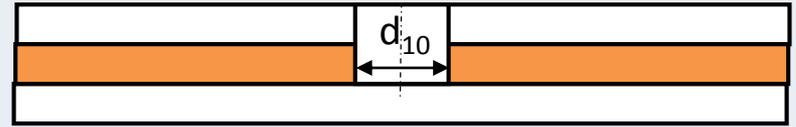


$$d = k t^g$$

$$d = k_1 t^{g_1} + k_2 t^{g_2} + k_3 t^{g_3}$$

Коэффициенты  $k_1, k_2, k_3$  и степени  $g_1, g_2, g_3$  находят при измерении коррозионного поражения

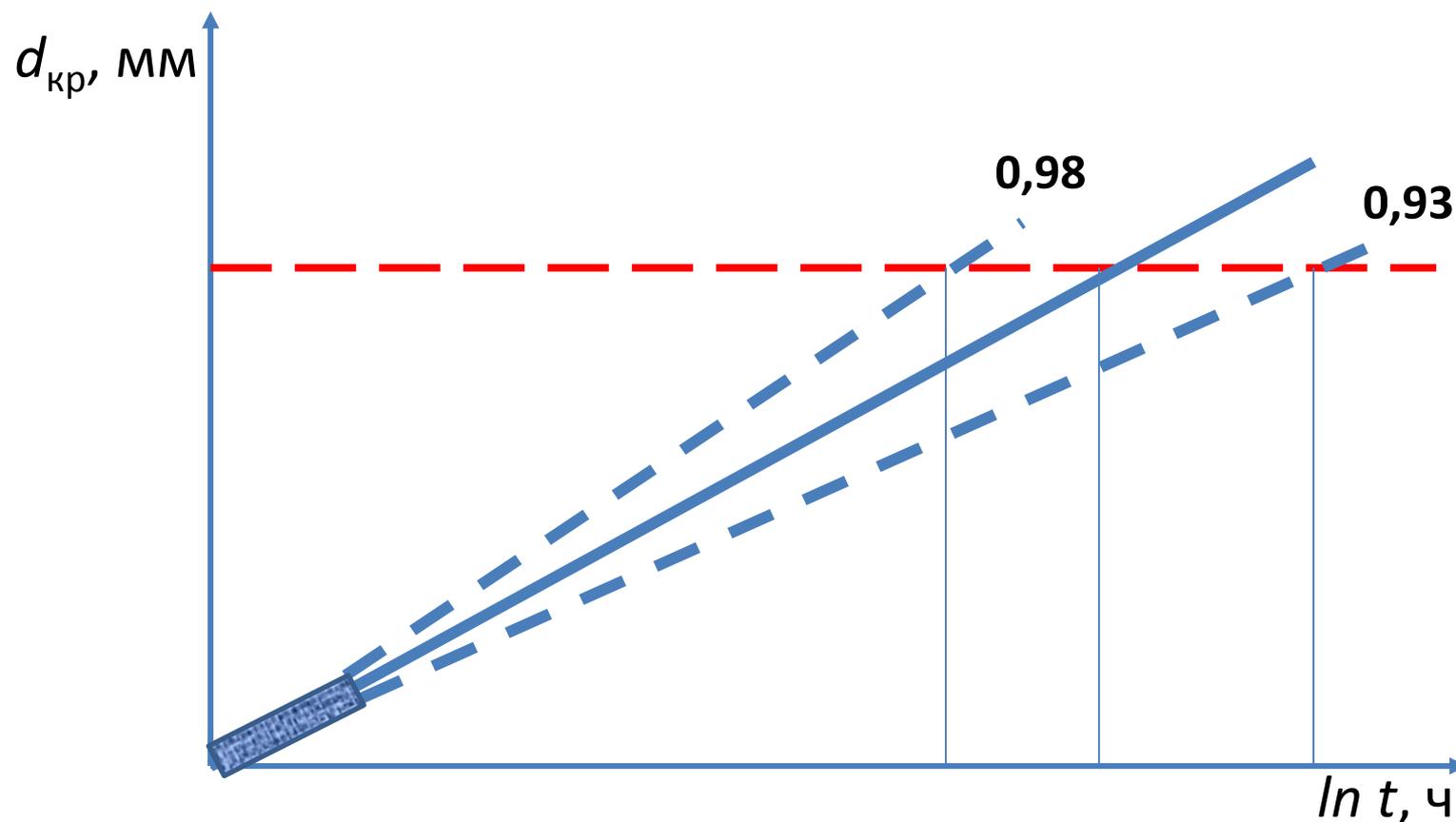
### Второй комплект



Расчёт проводили методом наименьших квадратов. Точность модели определяли ошибкой аппроксимации  $\delta$ :

$$\delta = \sum_i (k_1 t_i^{g_1} + k_2 t_i^{g_2} + k_3 t_i^{g_3} - d_i)^2 \rightarrow \min_{k_1, k_2, k_3, g_1, g_2, g_3}$$

# Оценка ресурса работы при ускоренных коррозионных испытаниях



$0,93$ ,  $0,98$  – доверительные интервалы

 – зона экспериментальных исследований

# Благодарю за внимание!



Д.т.н., профессор,  
**Розен Андрей Евгеньевич**  
E-mail: [aerozen@bk.ru](mailto:aerozen@bk.ru)  
+7 927 380 93 81



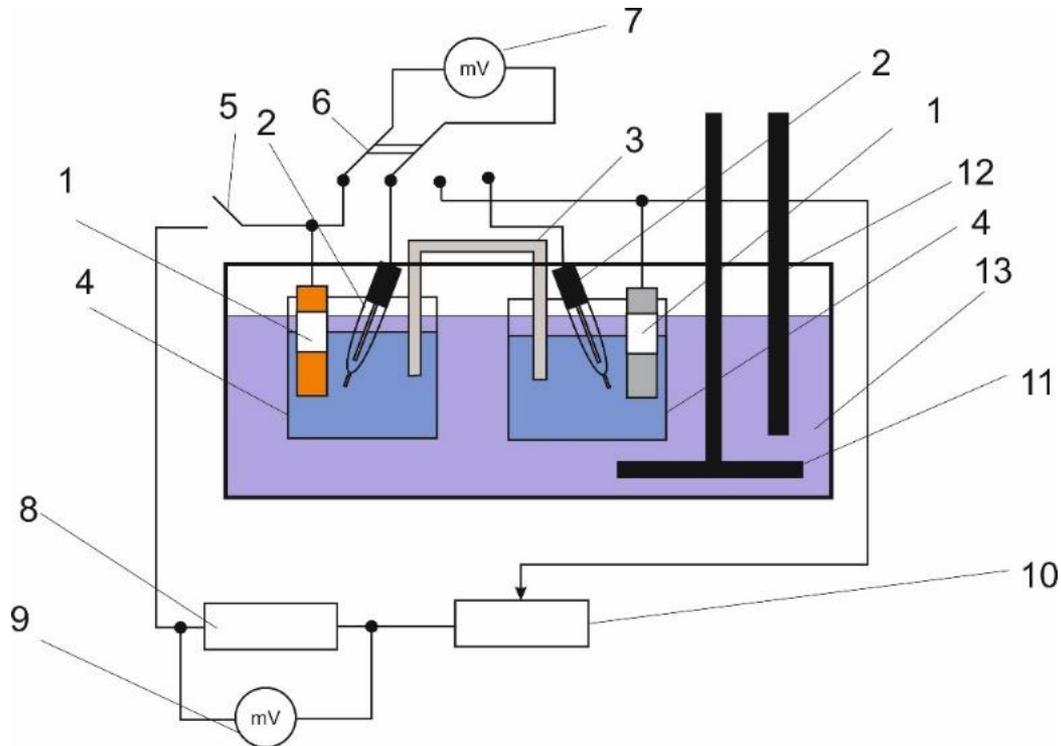


Рис. 5 Схема установки для электрохимического исследования коррозионных элементов и построения коррозионных диаграмм:

1 – электроды, изготовленные из материалов – компонентов многослойного композита, 2 – электроды сравнения, 3 – солевой мостик, 4 – сосуды, заполненные коррозионной средой, 5 – тумблер, 6 – переключатель, 7, 9 – высокоомные милливольтметры, 8 – калиброванный резистор сопротивлением 1 Ом, 10 – магазин сопротивлений, 11 – механическая мешалка, 12 – термометр, 13 – термостат.

*Устройство для электрохимического исследования коррозии металлов: Патент РФ № 2533344, МПК G01N17/02 / Перельгин Ю.П., Киреев С.Ю., Лось И.С., Розен А.Е., Панин М.Ю. заявл. 09.07.2013 ; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32. –10 с.*

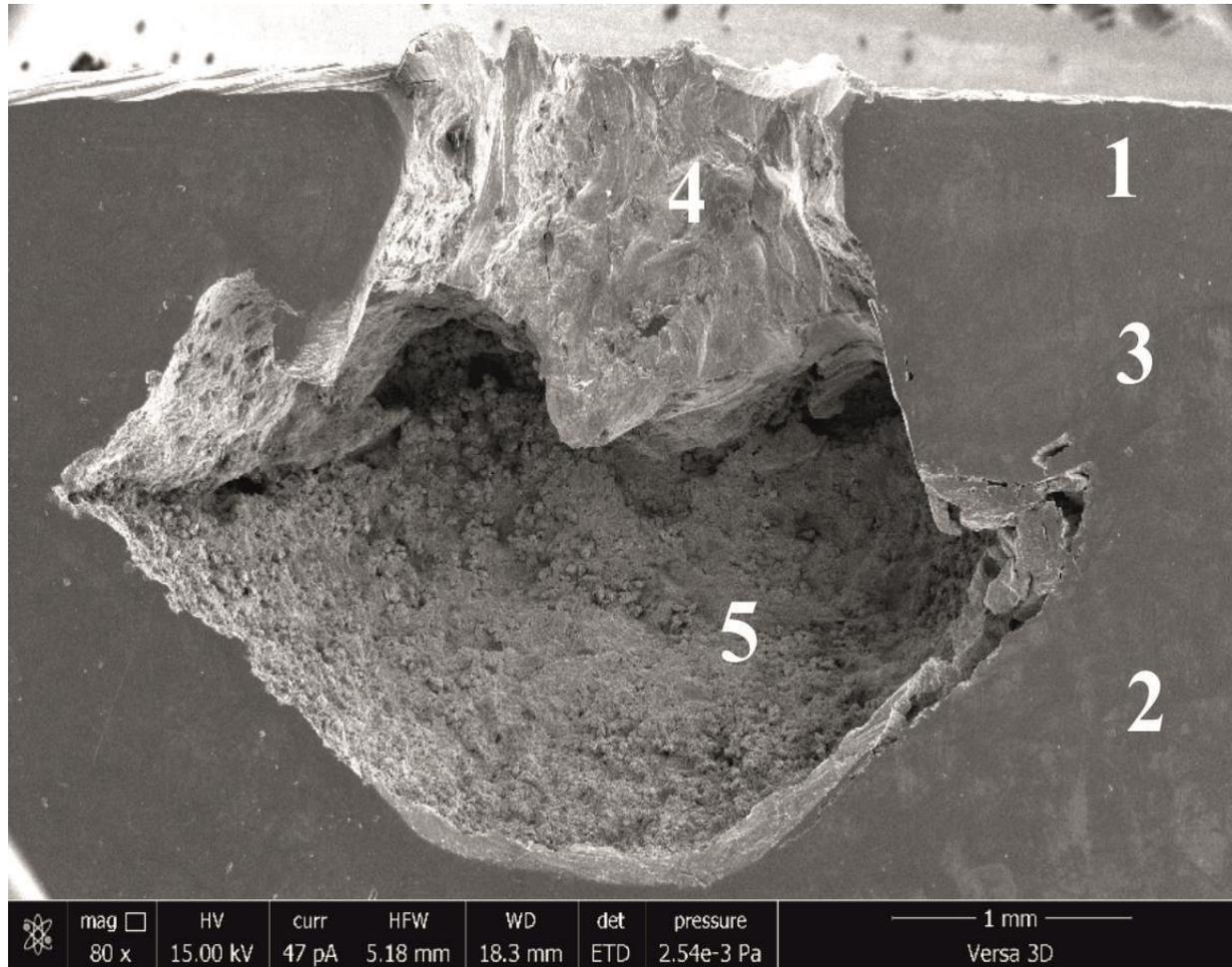


Fig. 8. Electron microscope image of corrosion damages of sample comprised of three layers 08Kh18N10T + Steel 10 + 08Kh18N10T: 1 – external layer, 2 – internal protector, 3 – interface, 4 – natural pitting, 5 - lens.