



Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»



*Межкафедральная лаборатория
создания новых материалов
с применением электромагнитных полей*

**Закономерности высоковольтной
электроимпульсной консолидации
порошковых материалов.**

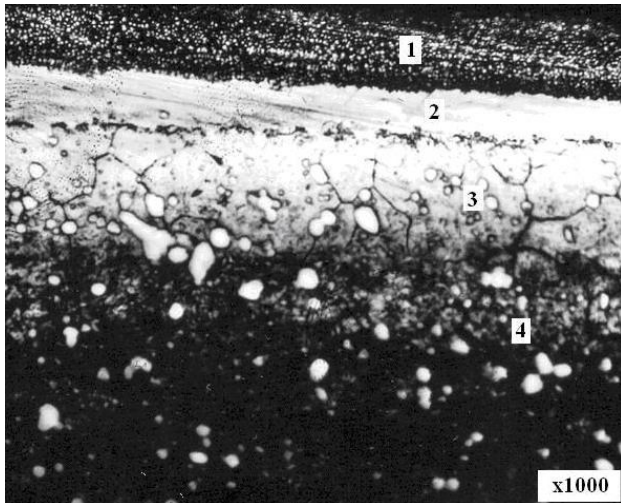
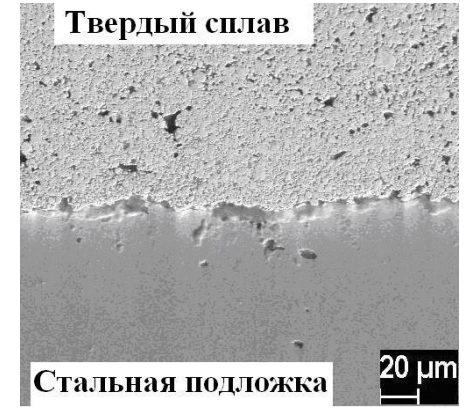
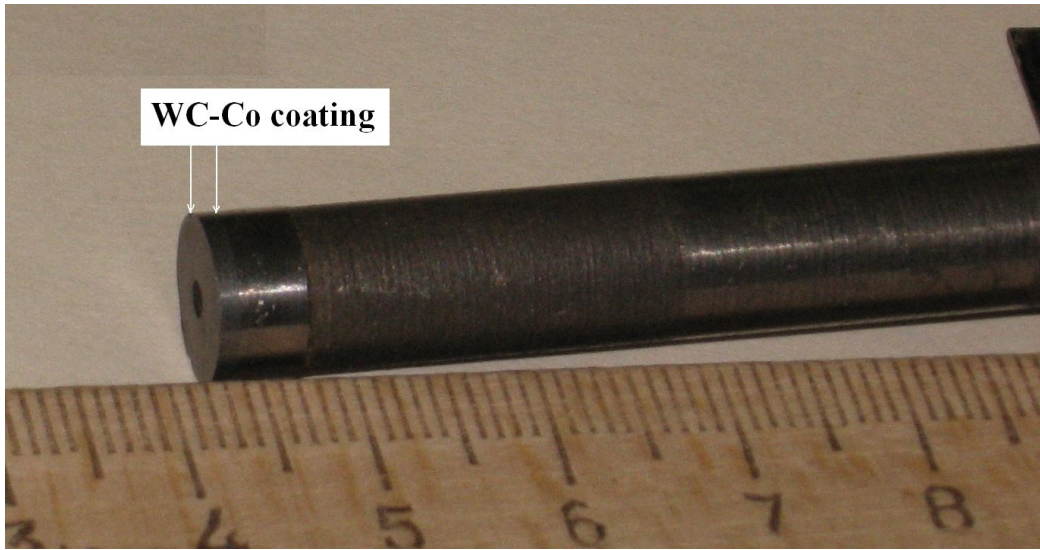
Григорьев Е.Г.

План доклада

1. Уникальные возможности ВЭК.
2. Основные особенности метода высоковольтной электроимпульсной консолидации (ВЭК) порошковых материалов.
3. Электро-тепловые процессы при ВЭК:
 - на контактах между частицами порошка,
 - в масштабе консолидируемого образца.
4. Динамика закрытия (схлопывания) межчастичных пор.
5. Кинетика уплотнения порошкового образца.
6. Направления дальнейших исследований.

Высоковольтная электроимпульсная технология способна:

- 1. Создавать изделия из порошков компактных материалов и изделий с уникальными свойствами (плотность, пористость, структура, свойства, состав композиции), недостижимыми с помощью других методов.**
- 2. Изготавливать композиционный твердосплавный алмазосодержащий инструмент.**
- 3. Наносить твердосплавные покрытия на рабочую поверхность лезвийного и штампового инструмента.**
- 4. Получать высокопрочные герметичные сварные соединения.**
- 5. Упрочнять материалы и т. д...**



1. Уникальные возможности ВЭК.
2. Основные особенности метода высоковольтной электроимпульсной консолидации (ВЭК) порошковых материалов.
3. Электро-тепловые процессы при ВЭК:
 - на контактах между частицами порошка,
 - в масштабе консолидируемого образца.
4. Динамика закрытия (схлопывания) межчастичных пор.
5. Кинетика уплотнения порошкового образца.
6. Направления дальнейших исследований.

Характеристики порошка, определяющие исходные свойства порошковой заготовки:

- гранулометрический состав,
- свойства поверхностных оксидных пленок на частицах,
- текучесть,
- насыпная плотность,
- ...

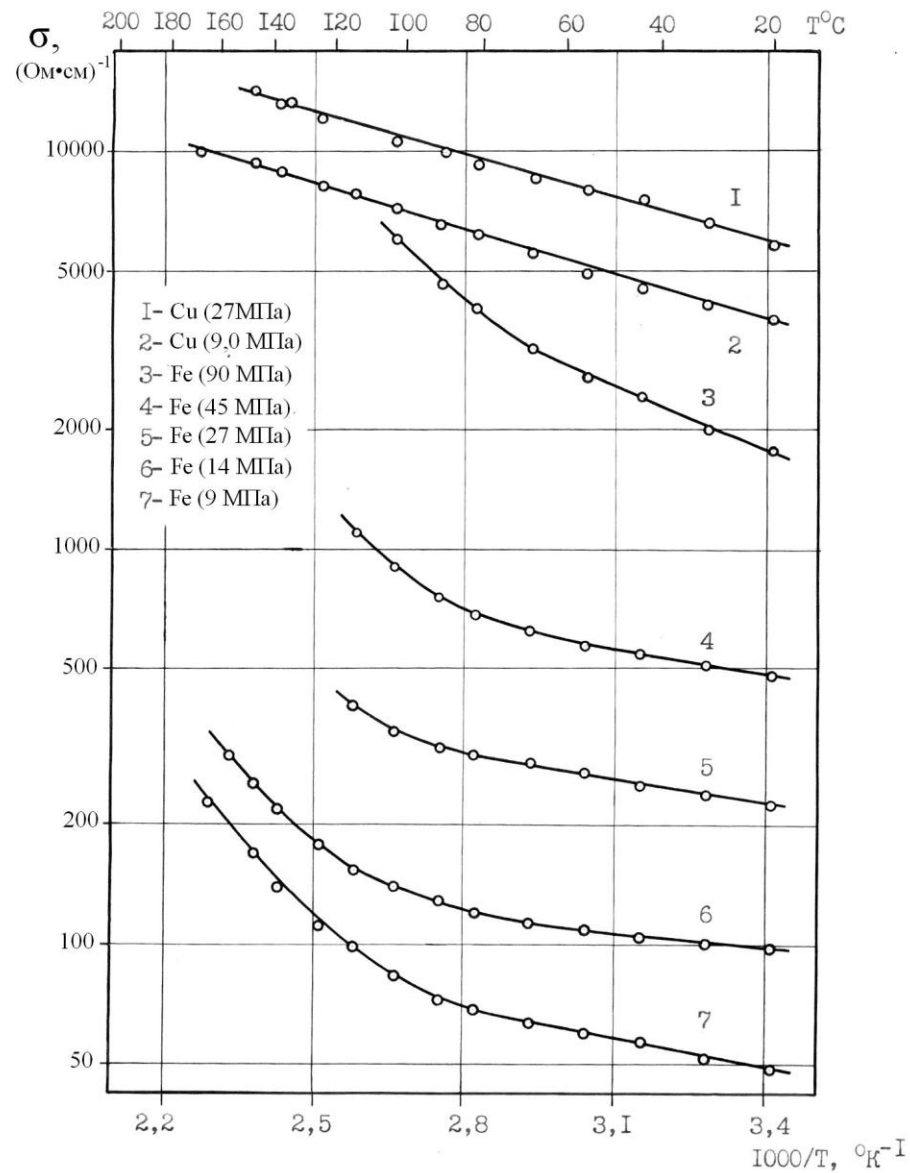
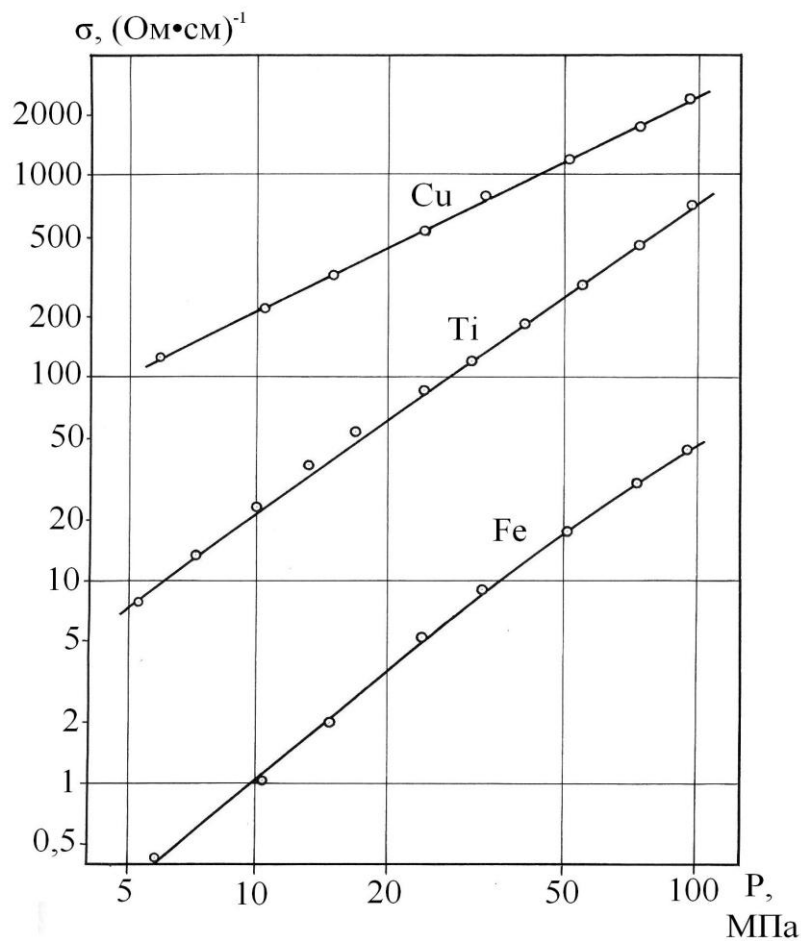
Изменение свойств порошковой заготовки в процессе ВЭК:

Влияние трения порошка о внутреннюю поверхность матрицы.
Изменение проводимости порошка при приложении давления.
Изменение проводимости порошка при прохождении по нему импульса электрического тока.

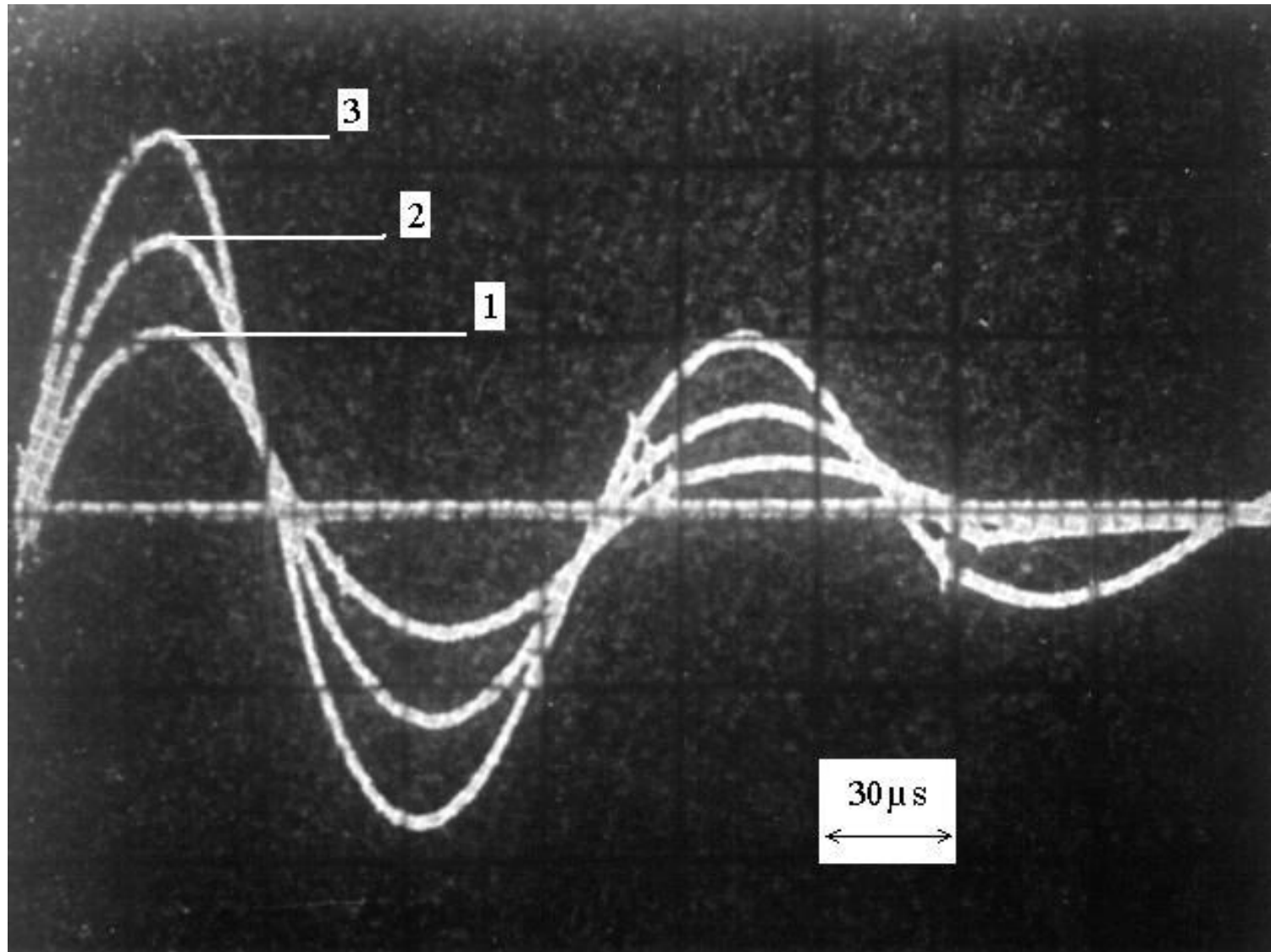
Зависимость проводимости порошка от температуры

от температуры

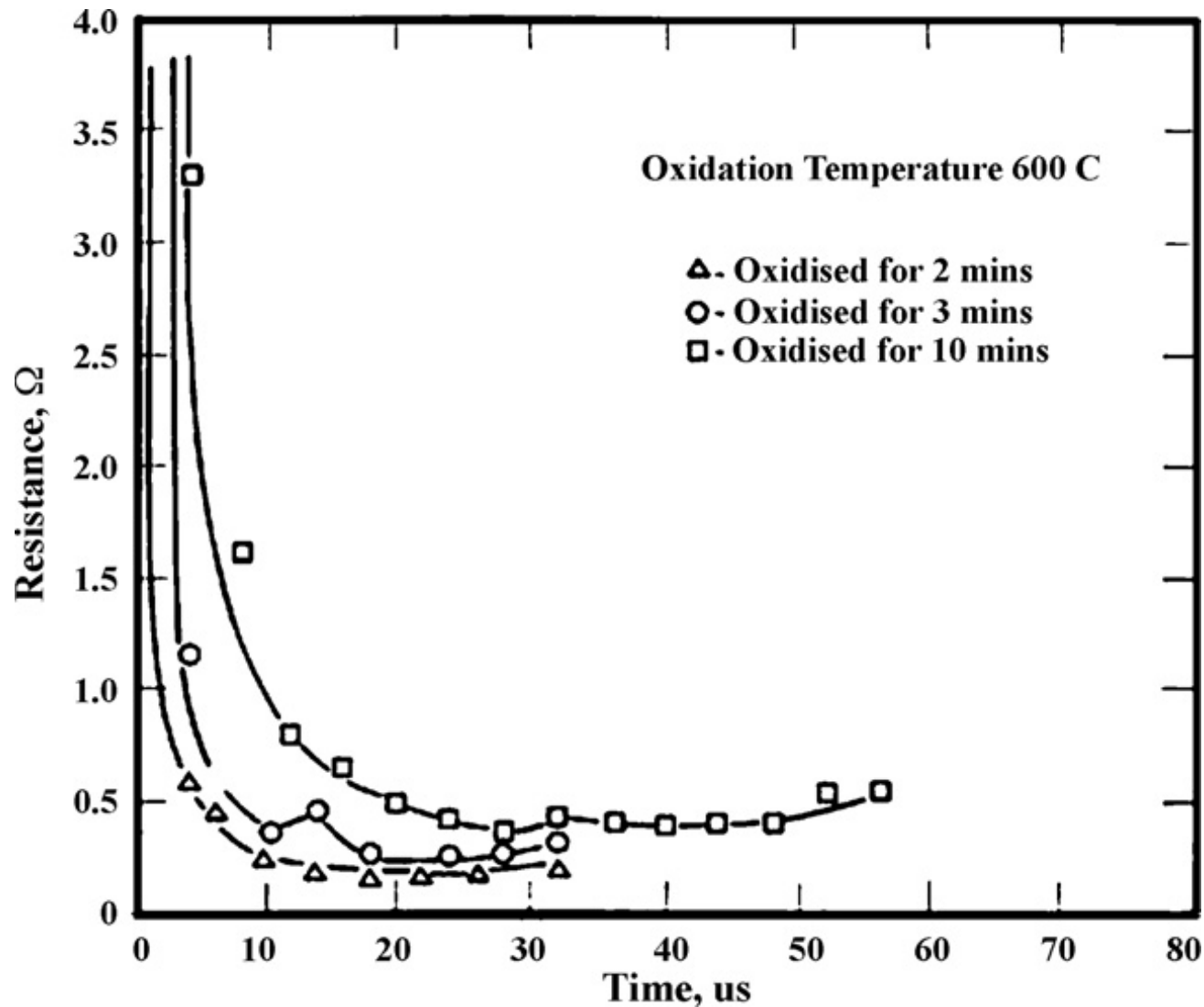
от давления



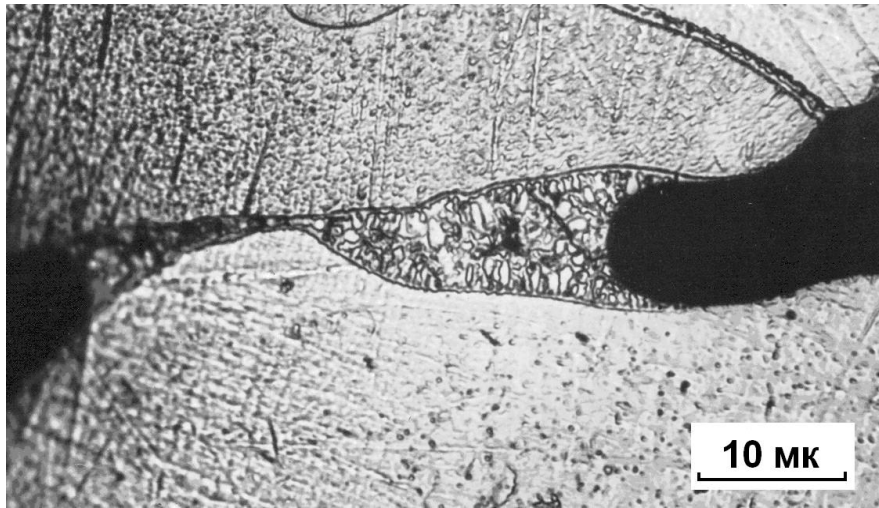
**Типичные формы импульсов тока:
1 – 50 кА, 2 – 80 кА, 3 – 100 кА**



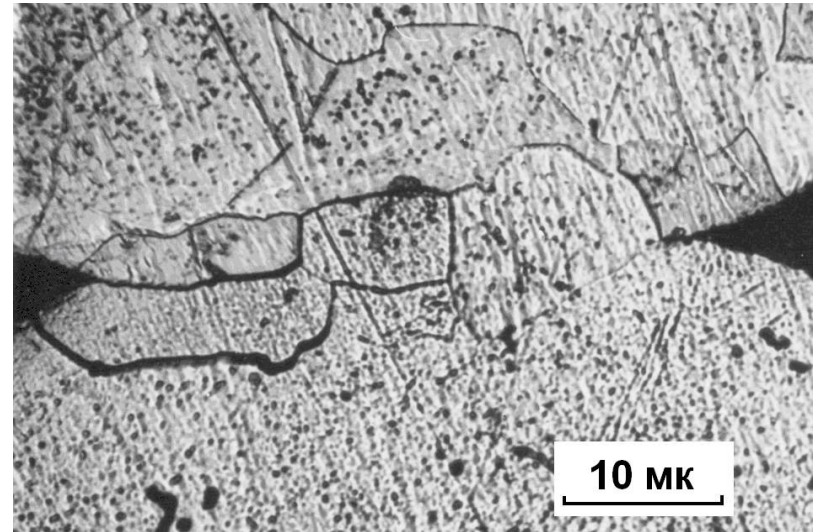
Изменение сопротивления порошкового образца при прохождении импульса тока



Высоковольтная электроимпульсная консолидация порошковых материалов



Зона контакта двух частиц Мо с образованием расплава.



Зона контакта двух частиц Мо, пластическая деформация

Тепловые процессы при электроимпульсном прессовании порошков. ФХОМ, 1984, N2, с.124-129. (Баланкин С.А., Горбачев Л.П., Григорьев Е.Г. и др.)

Основные особенности ВЭК:

- зависимость процессов от многих параметров;
- сильная взаимосвязь и взаимозависимость электромагнитных, тепловых и деформационных процессов;
- пространственная неоднородность и нестационарность во времени;
- многомасштабность процессов по времени и по пространству:
 - **макро**: распределение тока, температуры, трение с поверх. матрицы;
 - **мезо**: распределение темп-ры в частицах, локализация деформации;
 - **микро**: пробой оксидных пленок, электрический взрыв проводящих МОСТИКОВ.

Уравнения математической модели:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla) \vec{v} \right)_i = \left(\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \right) + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\varepsilon + \frac{\vec{v}^2}{2} \right) = -\operatorname{div} \left(\rho \vec{v} \left(w + \frac{v^2}{2} \right) - (\vec{v}, \sigma') - \kappa \nabla T \right) + \frac{\vec{j}^2}{\sigma} \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{F} = [\vec{j}, \vec{B}], \quad \vec{j} = \sigma(\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]) \quad (5)$$

здесь: ρ - плотность, \vec{v} - скорость, ε - внутренняя энергия, w - энтальпия, $\hat{\sigma}$ - тензор внутренних напряжений, σ' - тензор вязких напряжений, T - температура, \vec{E} , \vec{H} - напряженность электрического и магнитного поля, \vec{B} - индукция магнитного поля, \vec{j} - плотность электрического тока, \vec{F} - сила Ампера, κ - теплопроводность, σ - проводимость среды.

Уравнение состояния порошкового материала

$$P = \frac{2}{3} \sigma_T \ln \frac{\alpha}{\alpha(\alpha-1)} - \frac{4}{3} \eta \frac{\dot{\alpha}}{\alpha(\alpha-1)} - \frac{\rho_m a^2}{3(\alpha_0-1)^{2/3}} \frac{d}{d\alpha} \left\{ \frac{\dot{\alpha}^2}{2} \left[(\alpha-1)^{-1/3} - \alpha^{-1/3} \right] \right\}, \quad (6)$$

P - давление в порошковой среде, $\alpha = \rho_m / \rho$ ($\dot{\alpha}$ - дифференцирование α по времени),
 ρ и ρ_m - плотность порошка и компактного композиционного материала, σ_T - предел
текучности вещества порошка, η - динамическая вязкость вещества порошка, a_0 -
начальный размер пор в порошковом материале, α_0 - начальное значение α .

M.M. Carroll, K.T. Kim, V.F. Nesterenko "The effect of temperature on viscoplastic pore collapse". Journal of Applied Physics, 59, N6, 1986, pp. 1962-1967.

Параметры внешнего воздействия на порошковую заготовку:

Амплитуда плотности тока – j_0 , длительность импульса тока – τ_0 ,
механическое давление – P_0 .

Характеристики порошковой заготовки:

Плотность порошковой заготовки – γ ,

Удельное сопротивление порошковой заготовки – ρ (проводимость – σ),

Удельная теплоемкость материала порошковой заготовки – c_p ,

Температура плавления материала порошковой заготовки – $T_{пл}$,

Предел текучести материала порошковой заготовки – σ_T .

Безразмерные параметры, определяющие температурное и механическое (силовое) воздействие на порошковую заготовку:

$$\theta = \frac{\rho j_0^2 \tau_0}{\gamma c_p T_{пл}} = \frac{T}{T_{пл}}; \beta = \frac{\sigma_T(T)}{P_0}$$

Схема макроскопических процессов:

Время ввода энергии в порошковый материал определяется длительностью импульса тока: $\tau_0 < 300$ мкс.

Время уплотнения (формирования компактного материала из порошковой заготовки) τ_1 зависит от механической системы нагружения и лежит в пределах: 2 мс $< \tau_1 < 20$ мс.

Время охлаждения прессуемого материала τ_2 определяется теплопроводностью материала и характерным размером прессовки: $\tau_2 \sim 2,5$ с.

Соотношение между временными масштабами процессов:

$$\tau_0 < \tau_1 \ll \tau_2$$

1. Уникальные возможности ВЭК.
2. Основные особенности метода высоковольтной электроимпульсной консолидации (ВЭК) порошковых материалов.
3. Электро-тепловые процессы при ВЭК:
 - на контактах между частицами порошка,
 - в масштабе консолидируемого образца.
4. Динамика закрытия (схлопывания) межчастичных пор.
5. Кинетика уплотнения порошкового образца.
6. Направления дальнейших исследований.

Nonlinear electrical conductivity in a 1D granular medium

E. Falcona, B. Castaing, and M. Creyssels, Eur. Phys. J. B **38**, 475–483 (2004)

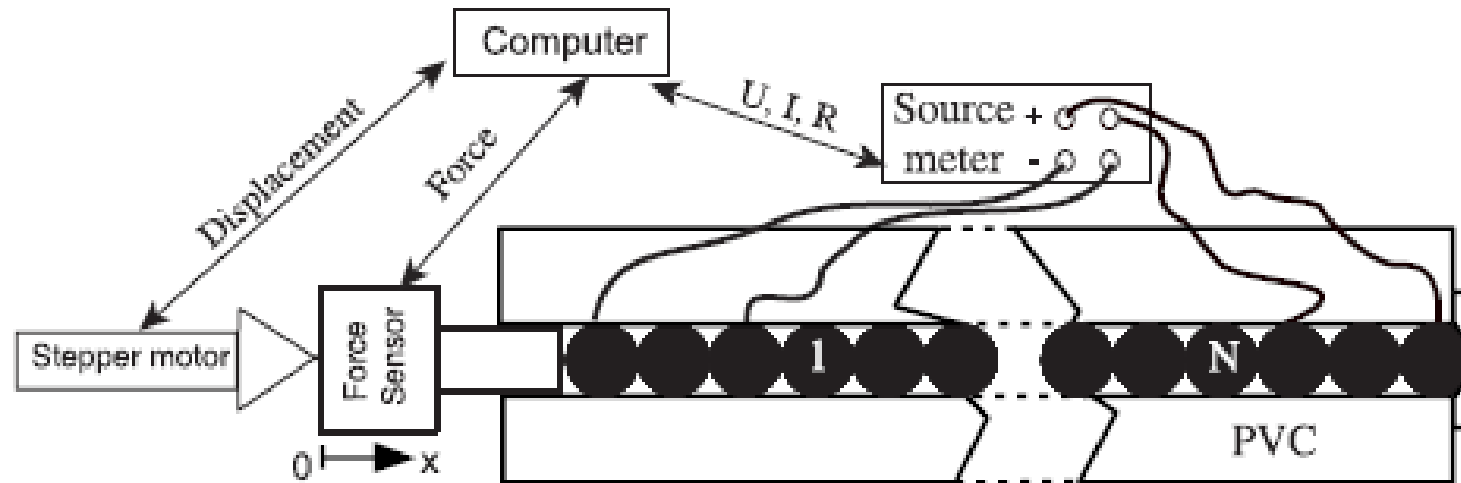


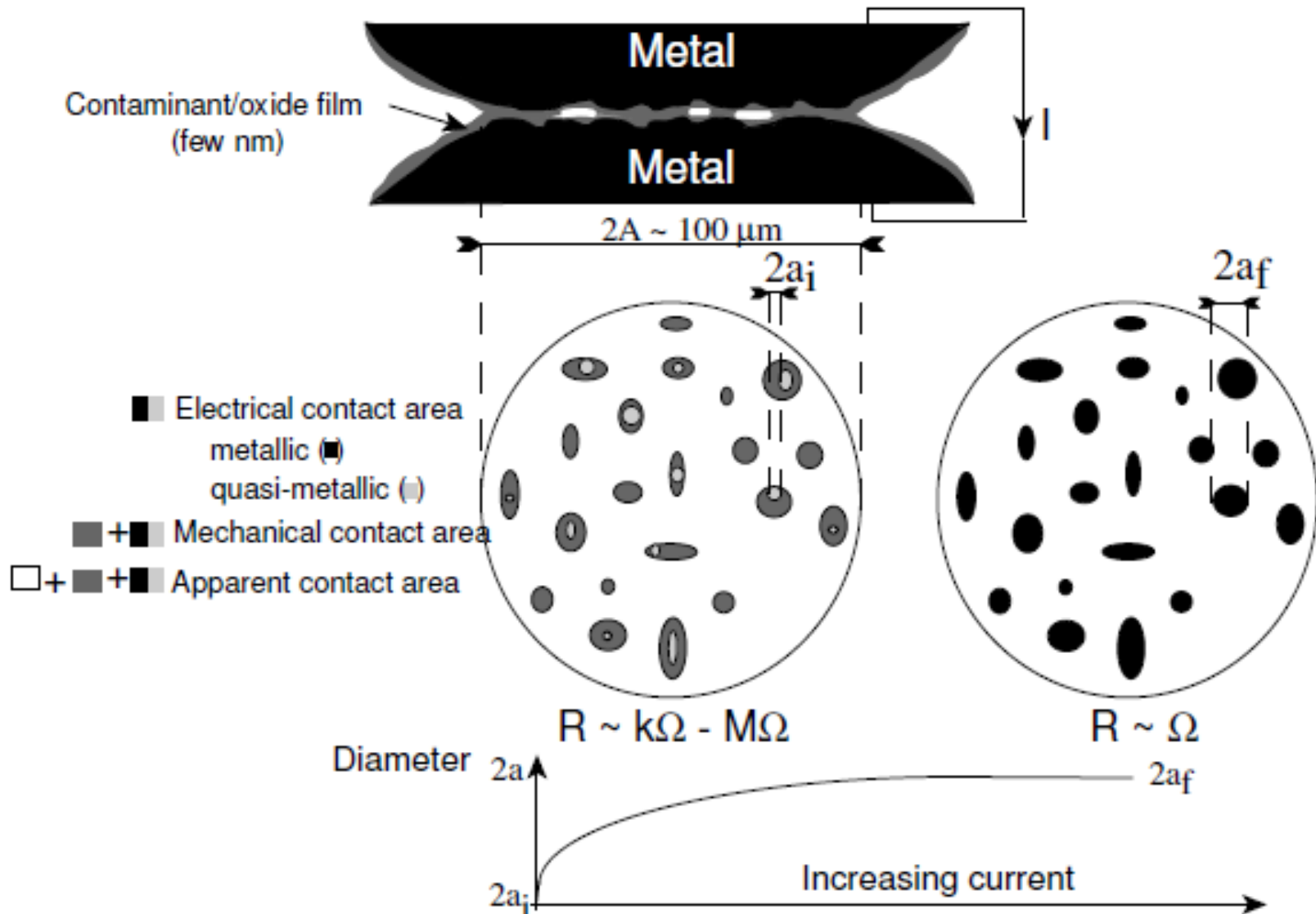
Fig. 1. Schematics of experimental setup.

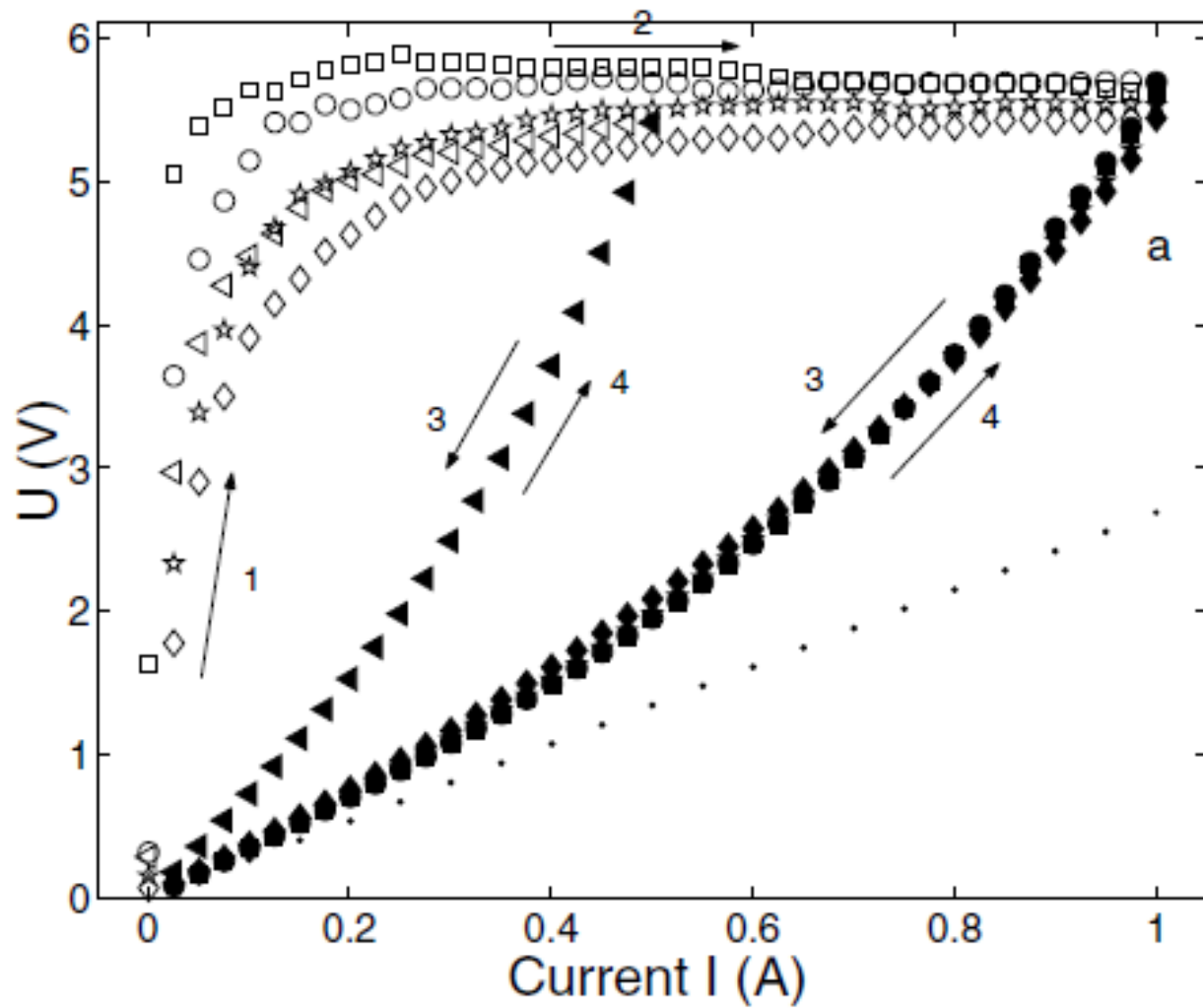
properties of stainless steel beads used in the chain (AISI 420C)

r	Bead radius	$4 \text{ mm} \pm 2 \mu\text{m}$ [31]
R_a	Roughness	$0.1\text{--}0.2 \mu\text{m}$ [31]
ρ	Density	7750 kg/m^3 [31]
ν	Poisson's ratio	0.27
E	Young's modulus	$1.95 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ [32]
ρ_{el}	Electrical resistivity $20 \text{ }^\circ\text{C}$	$72 \mu\Omega \text{ cm}$ [32]
	$650 \text{ }^\circ\text{C}$	$116 \mu\Omega \text{ cm}$ [32]
λ	Thermal conductivity $20 \text{ }^\circ\text{C}$	16.2 W/(Km) [32]
	$500 \text{ }^\circ\text{C}$	21.5 W/(Km) [32]
T_{mel}	Approx. melting point	$1425 \text{ }^\circ\text{C}$ [32]

Nonlinear electrical conductivity in a 1D granular medium

E. Falcona, B. Castaing, and M. Creyssels, Eur. Phys. J. B **38**, 475–483 (2004)





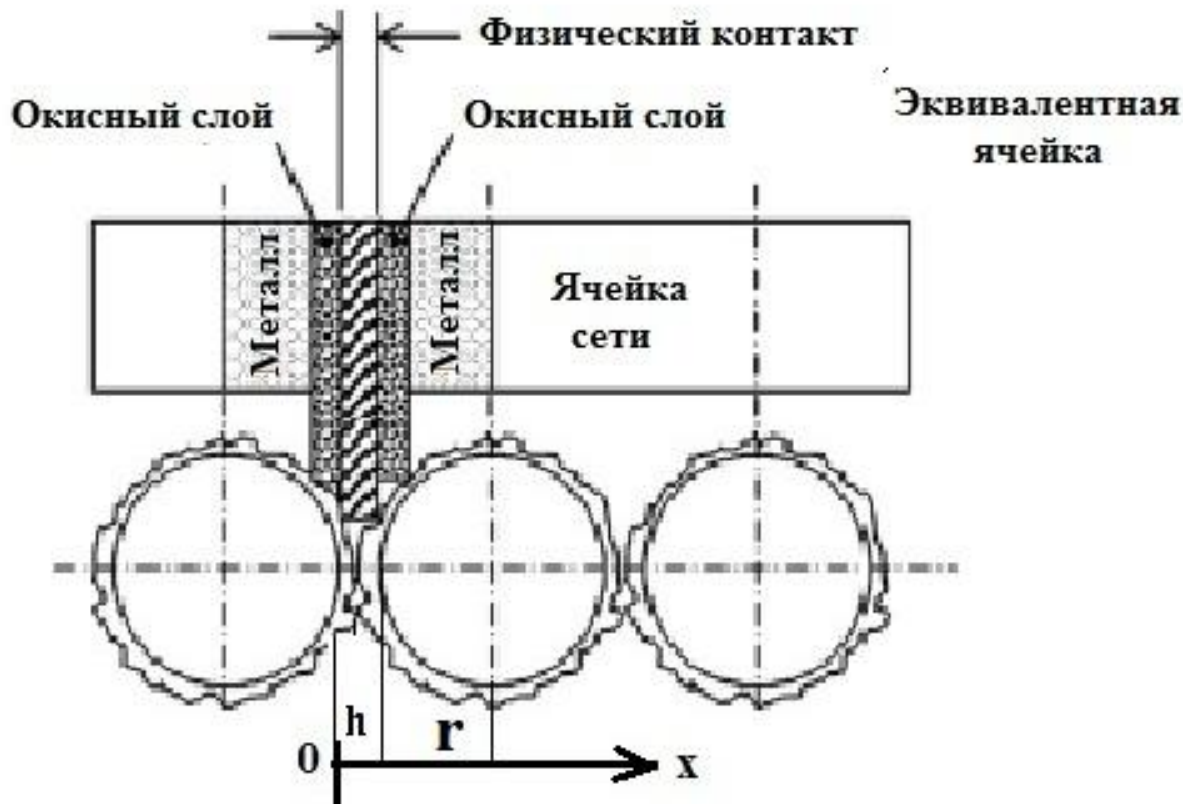
$$U^2 = 8 \int_{T_0}^{T_m} \lambda \rho_{el} dT,$$

$$\lambda \rho_{el} = LT,$$

$$T_m = \sqrt{T_0^2 + \frac{U^2}{4LN_c^2}},$$

(a) $U-I$ characteristics (in linear axes) showing the saturation voltage, $U_0 = 5.8$ V, when increasing the current I in the range $1 \text{ mA} \leq I \leq I_{max}$ (open symbols), then decreasing I (full symbols) for various $F = 32$ (\square), 125 (\circ), 321 (\star) and 505 (\diamond) N with $I_{max} = 1$ A, and for $F = 211$ N (\triangleleft) with $I_{max} = 0.5$ A. Measurement of test resistance $R_{test} = 2.7 \Omega$ (small \bullet -marks) instead of the chain.

Модель межчастичных контактов



Форма импульса тока:

$$j(t) = j_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t)$$

Безразмерные параметры:

$$\varepsilon = (\rho j_0^2 t_r / \gamma c_p T_m)$$

$$\Omega = \omega t_r, \quad \delta = 2\beta t_r$$

Безразмерная температура

$$\vartheta = T/T_m$$

$$(h \ll r, \quad a \ll r, \quad h < a)$$

ρ – удельное сопротивление материала в области контакта;

j_0 – амплитуда плотности тока в контакте;

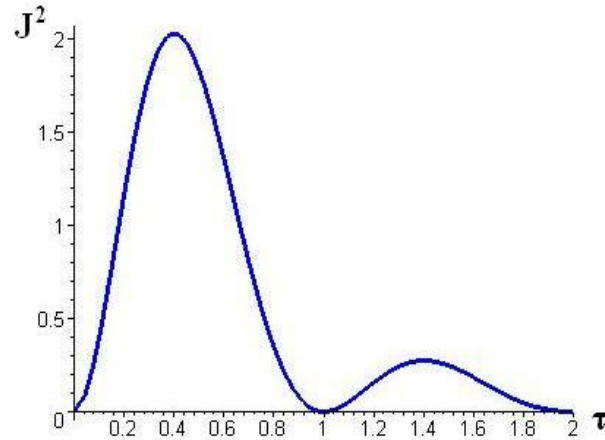
γ, c_p, χ – плотность, теплоемкость, температуропроводность;

T_m, T_b – температуры плавления, кипения (потери проводимости);

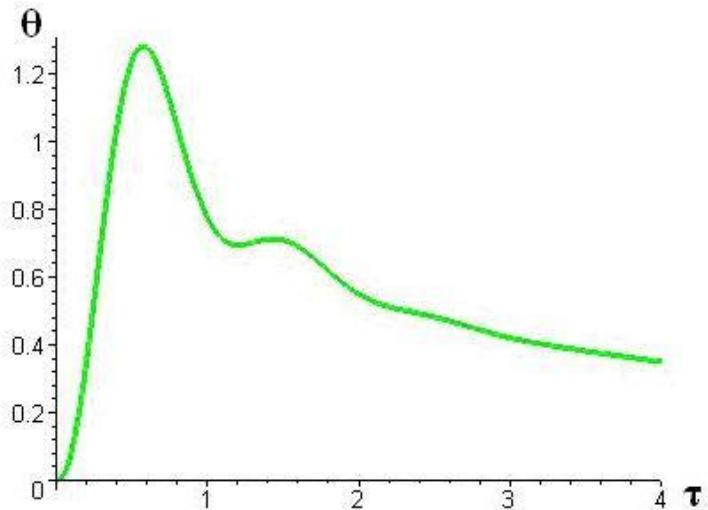
a – радиус межчастичного контакта, r – радиус частицы;

$t_r = r^2/\chi$ – характерный масштаб времени; $\tau = t/t_r$ – безразмерное время;

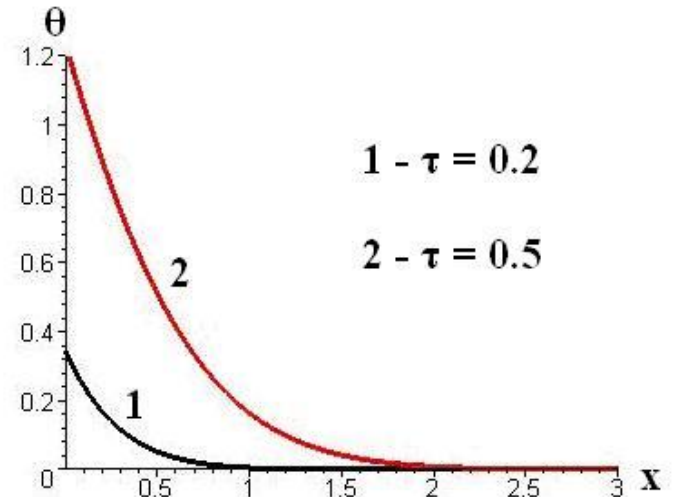
Функция квадрата плотности импульсного тока от времени



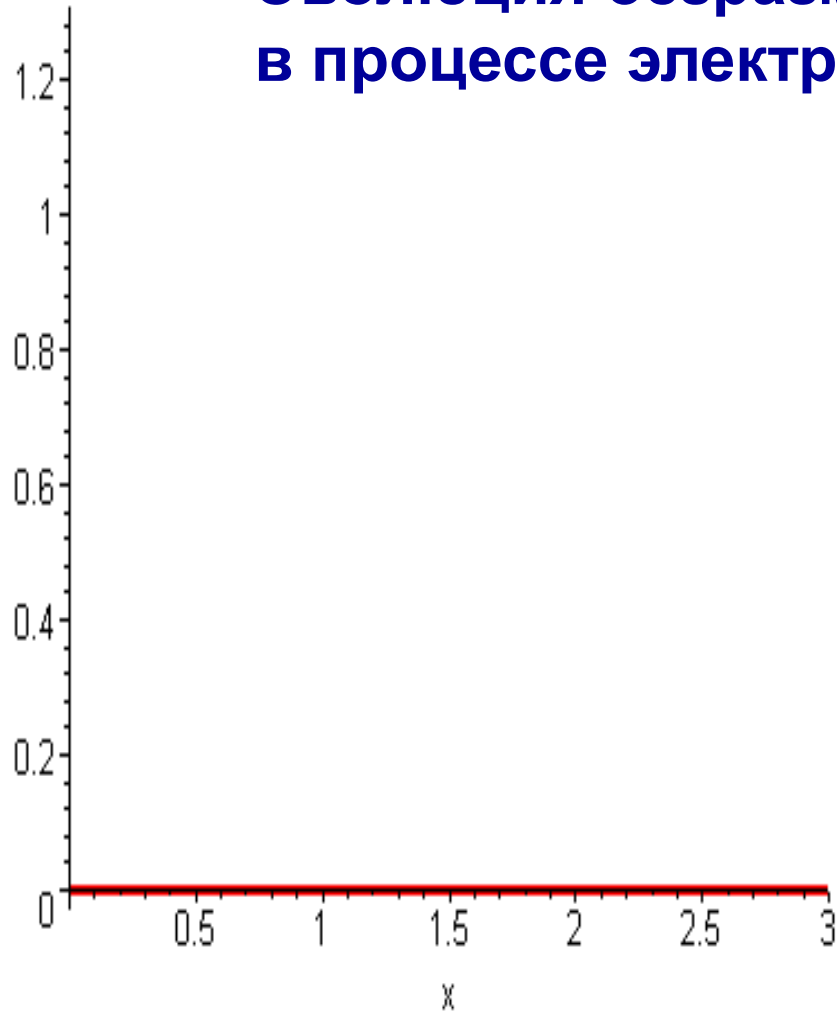
Температура в межчастичном контакте



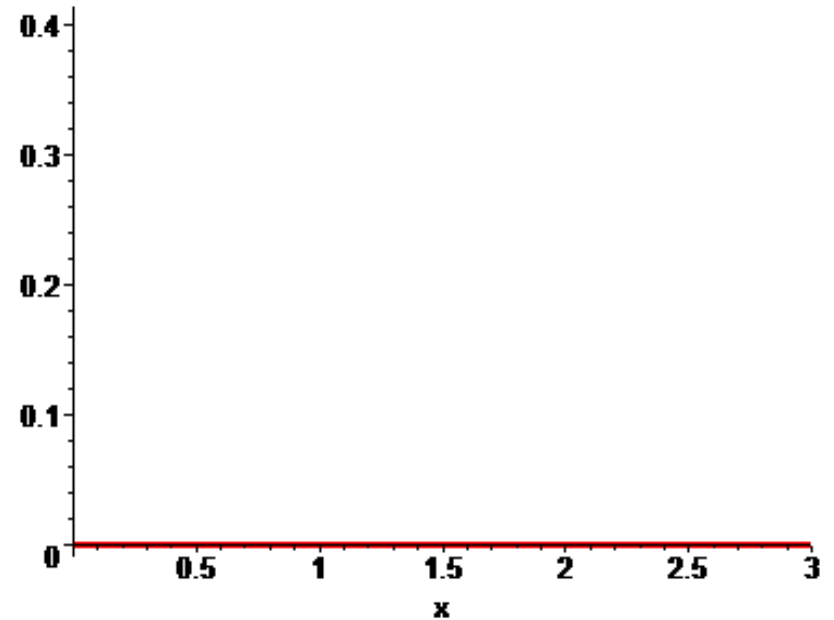
Локализация температуры в зоне контакта



Эволюция безразмерной температуры ϑ в процессе электроимпульсной консолидации



$$\varepsilon = 5; \Omega = 3; \delta = 2.$$



$$\varepsilon = 1; \Omega = 1; \delta = 0.7.$$

Условие локализации тепловыделения в межчастичном контакте:

- 1) $P \sim P_k$, давление, соответствующее максимальному значению электрической емкости прессовки
- 2) Для значений плотности тока в межчастичных контактах, не превышающих условия теплового взрыва контакта:

$$j < \sqrt{\frac{2\xi\sigma}{\rho h} T_b^2}$$

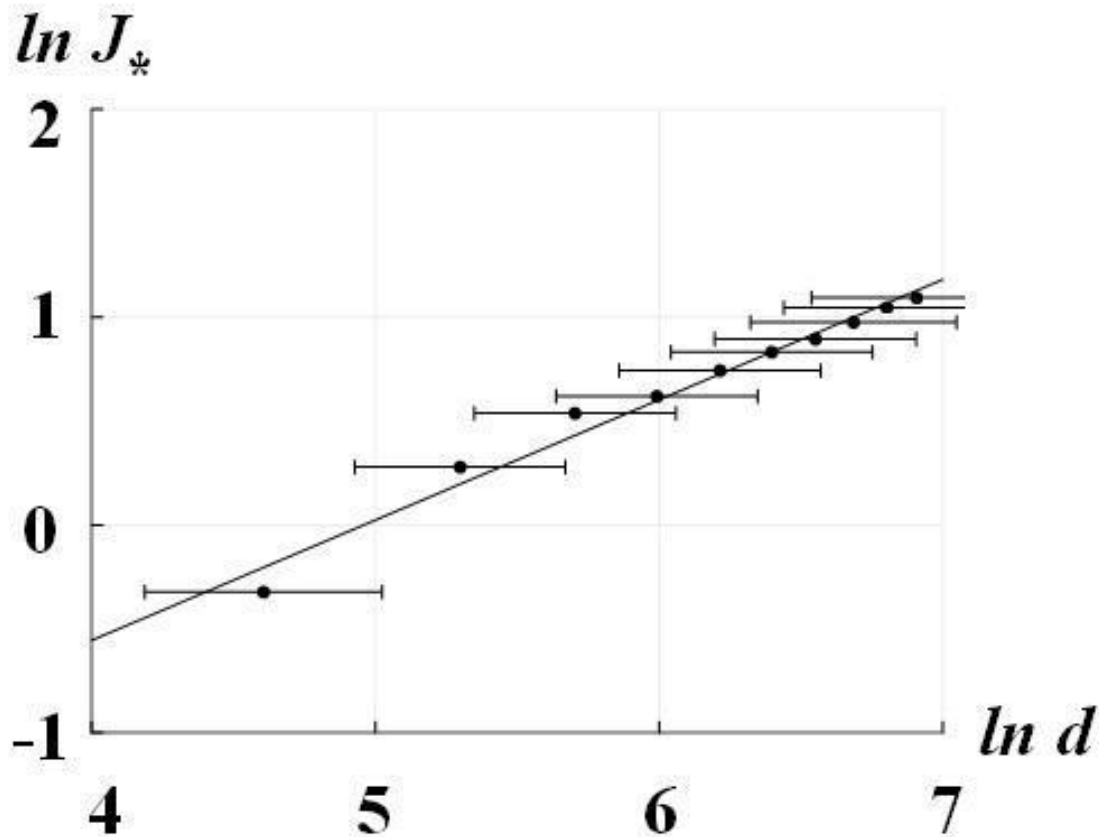
$$\left(\frac{dj}{dt}\right)_{crit} \leq \frac{E_*^3}{3\rho^2 \gamma c_p (T_b - T_m)}$$

σ – постоянная Стефана – Больцмана; $\xi \leq 1$; E_* – электрическая прочность пленки

Критическое значение для тока теплового взрыва контакта:

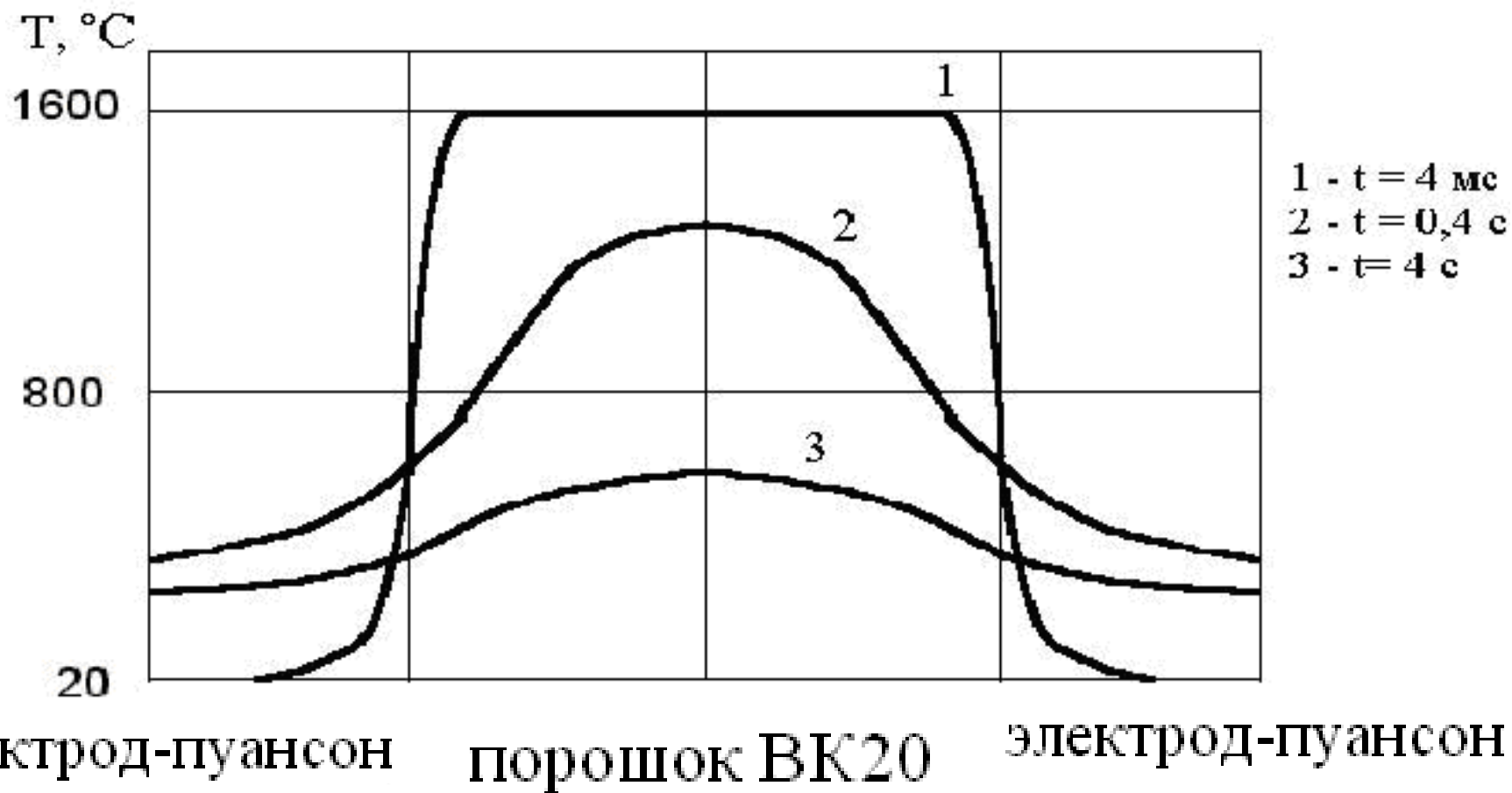
$$J_* \sim d^{2/3} \quad (d \text{ — характерный размер гранул})$$

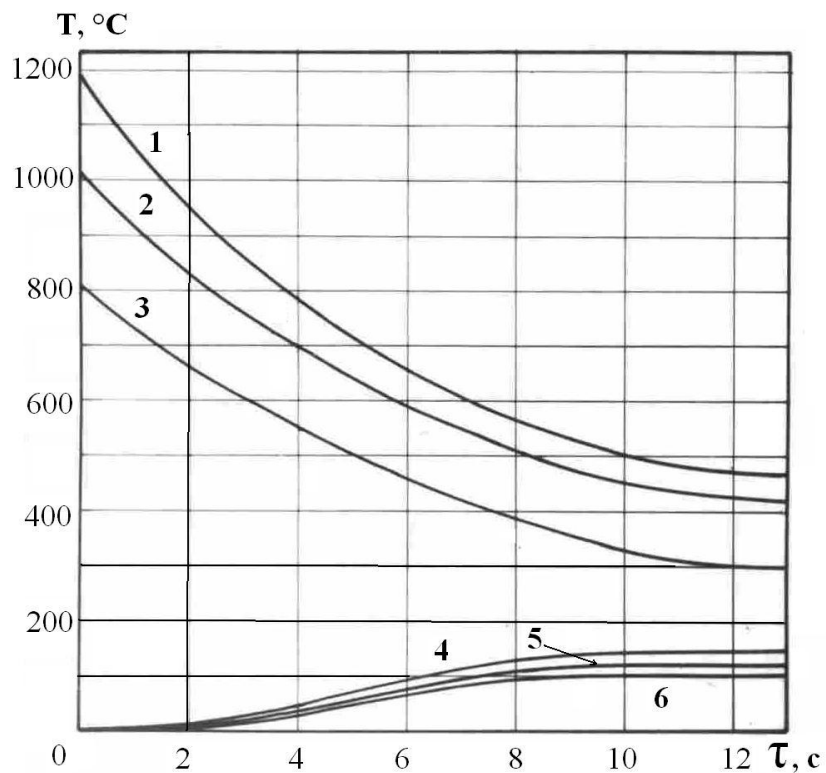
График линейной зависимости $\ln J_*$ от $\ln d$
(коэффициент корреляции 0,99)



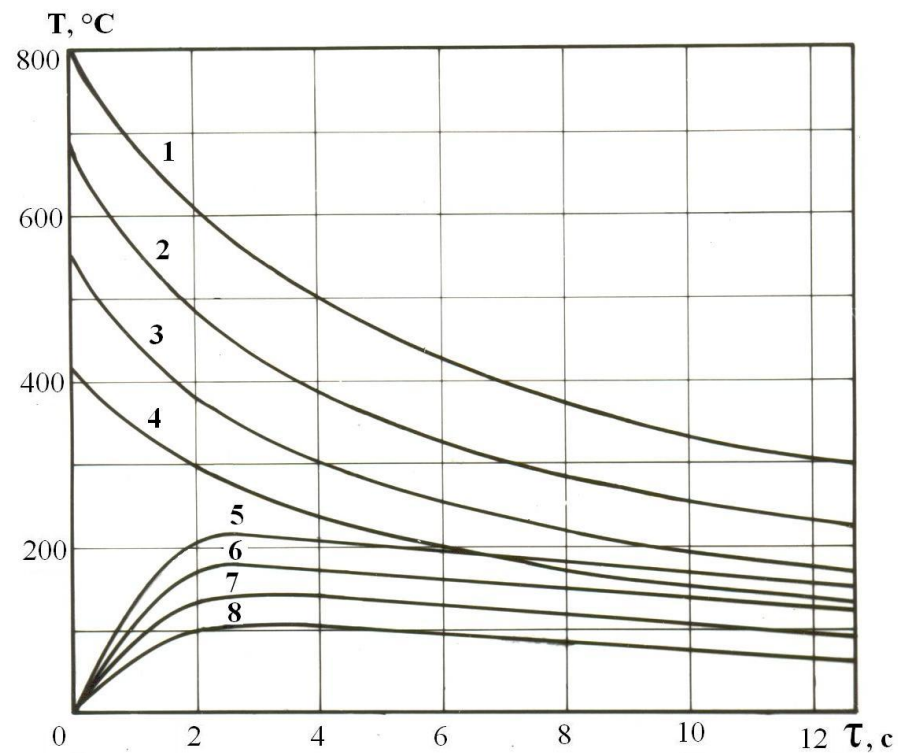
1. Уникальные возможности ВЭК.
2. Основные особенности метода высоковольтной электроимпульсной консолидации (ВЭК) порошковых материалов.
3. Электро-тепловые процессы при ВЭК:
 - на контактах между частицами порошка,
 - в масштабе консолидируемого образца.
4. Динамика закрытия (схлопывания) межчастичных пор.
5. Кинетика уплотнения порошкового образца.
6. Направления дальнейших исследований.

Распределение температуры вдоль оси консолидируемого образца





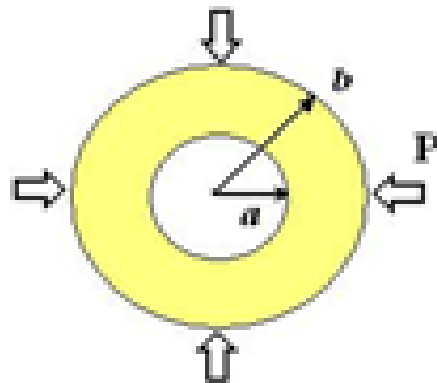
**Изменение температуры
образца и матрицы
(ПЖ2М3, диаметр 9 мм)**



**Изменение температуры
образца и матрицы
(ПЖ2М3, диаметр 14 мм)**

1. Уникальные возможности ВЭК.
2. Основные особенности метода высоковольтной электроимпульсной консолидации (ВЭК) порошковых материалов.
3. Электро-тепловые процессы при ВЭК:
 - на контактах между частицами порошка,
 - в масштабе консолидируемого образца.
4. Динамика закрытия (схлопывания) межчастичных пор.
5. Кинетика уплотнения порошкового образца.
6. Направления дальнейших исследований.

Модель CARROLL'a-HOLT'a для порошкового материала:



P – давление прессования;

a – радиус пор в материале;

a_0 – начальный радиус пор;

$$\alpha = b^3 / (b^3 - a^3)$$

Безразмерные параметры характеризующие процесс захлопывания пор:

$$R = \frac{a}{v} \sqrt{\frac{P}{\rho}}, \quad \beta = \frac{\sigma_T}{P}, \quad \alpha = \frac{\rho}{\rho_0};$$

$\beta = 0$ – захлопывание полости в вязкой жидкости;

$R = 0$ – захлопывание поры в идеально-пластичном материале;

$\beta = 0$ и $R = 0$ – соответствует захлопыванию полости в идеальной жидкости (задача Рэлея: при $a \rightarrow 0$ $a \sim a^{-3/2}$).

Уравнение, описывающее эволюцию полости под действием внешнего давления:

$$\frac{du}{d\xi} + \frac{u}{\xi} \left(2 - \frac{1 - \varphi^{-4/3}}{2(1 - \varphi^{-1/3})} \right) + \frac{1}{u\xi} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \beta \left[\ln \varphi + 3m \int_1^{\varphi^{1/3}} \left[\frac{2}{3} \ln \left(1 + \frac{1 - \xi^3}{\xi^3 x^3} \right) \right]^n \frac{dx}{x} \right] \right\} (1 - \varphi^{-1/3})^{-1} + \frac{4}{R} \frac{1}{\xi^2} [\varphi(1 - \varphi^{-1/3})]^{-1} = 0$$

$$\xi = \frac{a(t)}{a_0} = \left(\frac{\alpha(t) - 1}{\alpha_0 - 1} \right)^{1/3} \quad u = \frac{da}{dt} \sqrt{\frac{\gamma_m}{P}} \quad \varphi = 1 + 1/\xi^3 (\alpha_0 - 1)$$

ξ , – безразмерный радиус,

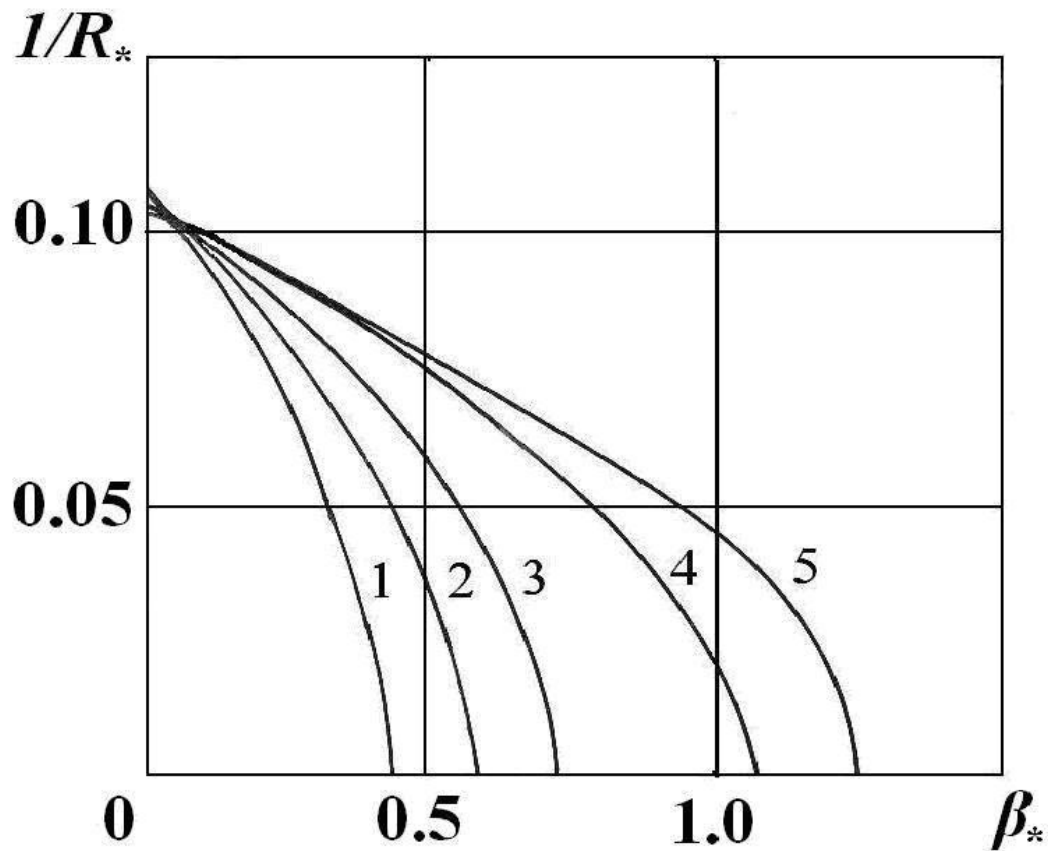
u – безразмерная скорость движения радиуса поры

**Безразмерные параметры R , β ,
характеризующие процесс уплотнения при ВЭК:
(вязко-пластическая модель материала)**

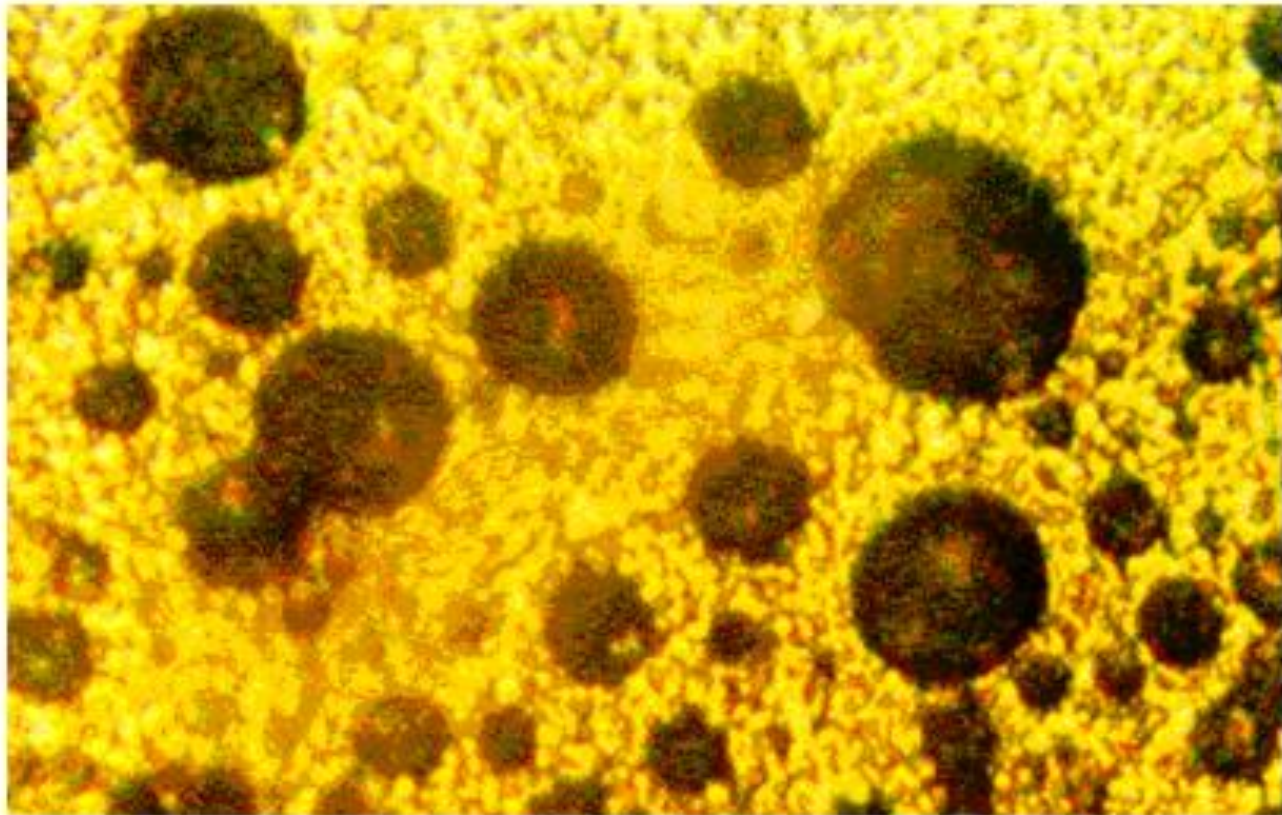
$$R = \frac{a}{\nu} \sqrt{\frac{P}{\rho}}, \quad \beta = \frac{\sigma_T}{P}, \quad \Pi = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) * 100\% .$$

a – начальный размер пор, ν – вязкость материала порошка,
 P – давление на порошок, σ_T – предел текучести материала,
 Π – начальная пористость порошкового образца,
(ρ – теоретическая плотность, ρ_0 – начальная плотность)

Диаграмма оптимальных значений безразмерных параметров R_* , β_* процесса ВЭК:



- 1 - $\Pi = 9\%$,
- 2 - $\Pi = 20\%$,
- 3 - $\Pi = 30\%$,
- 4 - $\Pi = 50\%$,
- 5 - $\Pi = 57\%$



x1000

Микроструктура сплава BK20, сформированного методом ЭИП на кумулятивных режимах.

Временные масштабы процессов при ВЭК:

$$\tau_0 < \tau_1 \ll \tau_2$$

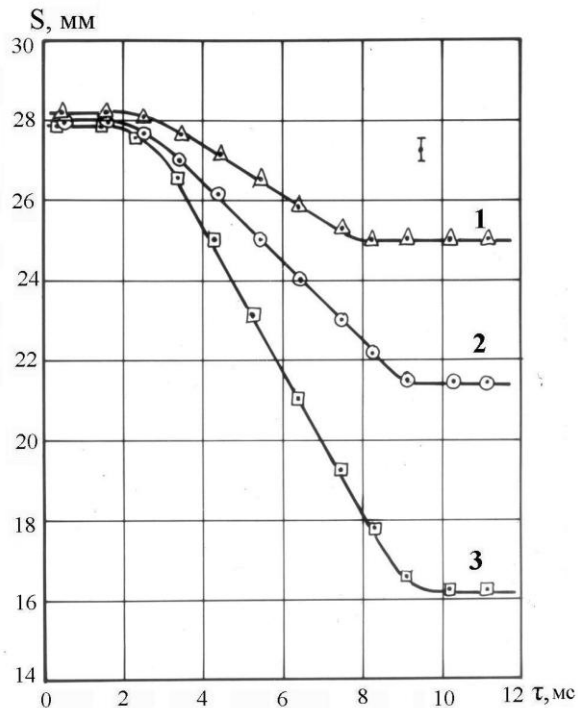
$\tau_0 < 10^{-3}$ s - время ввода энергии в образец,

$2 \times 10^{-3} < \tau_1 < 2 \times 10^{-2}$ s - время консолидации образца за счет пластической деформации,

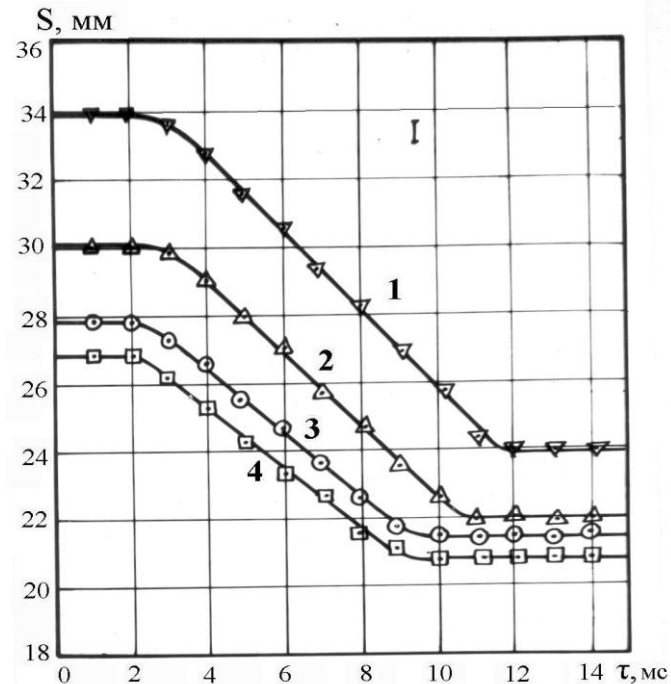
$\tau_2 \geq 2.5$ s – время охлаждения образца

1. Уникальные возможности ВЭК.
2. Основные особенности метода высоковольтной электроимпульсной консолидации (ВЭК) порошковых материалов.
3. Электро-тепловые процессы при ВЭК:
 - на контактах между частицами порошка,
 - в масштабе консолидируемого образца.
4. Динамика закрытия (схлопывания) межчастичных пор.
5. Кинетика уплотнения порошкового образца.
6. Направления дальнейших исследований.

Кинетика уплотнения при ВЭК (ПЖ2М3):



Кинетика уплотнения при фиксированном давлении 247 МПа,
1 – 156, 2 – 195, 3 – 234 (кА/ см²)

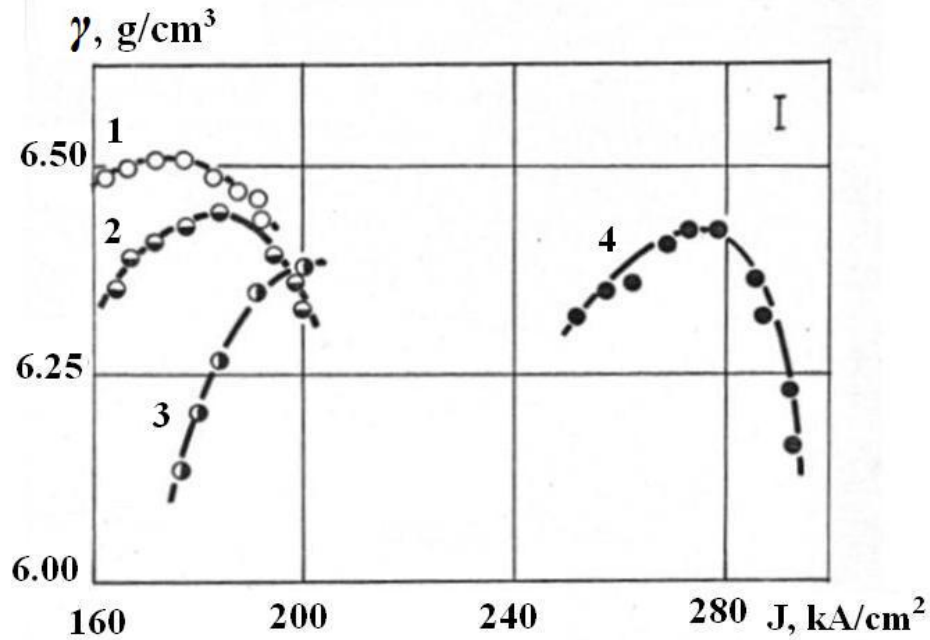


Кинетика уплотнения при фиксированной плотности тока 195 кА/см², 1 – 106, 2 – 176, 3 – 247, 4 – 282 (МПа)

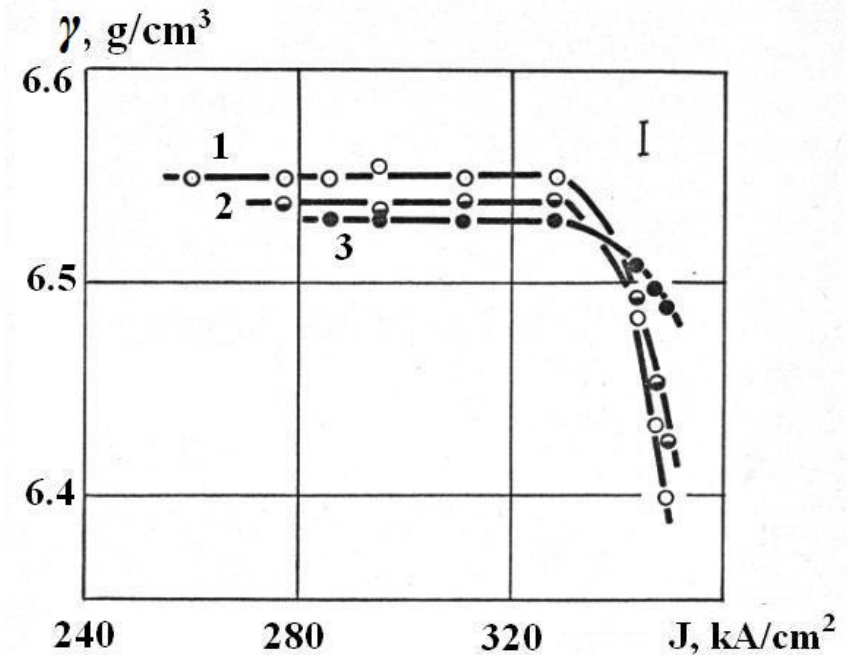
$$V = U(1 - \gamma_0 / \gamma)$$

V - скорость пуансона, U - скорость волны уплотнения

Зависимость плотности образцов от амплитуды плотности тока при ВЭК (Э110):

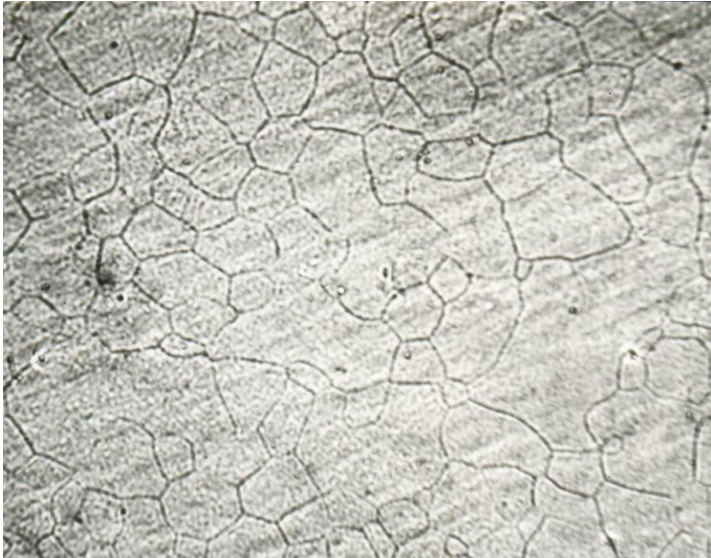


Сплав Э110 (частицы чешуйчатой формы): 1 – $P = 190$ МПа, 2 – $P = 165$ МПа, 3 – $P = 108$ МПа, 4 – $P = 307$ МПа

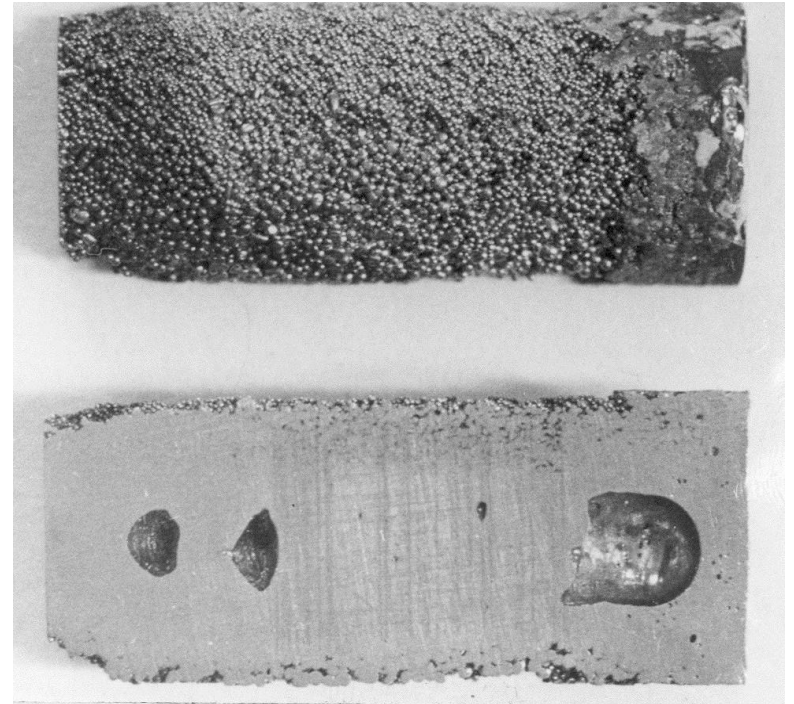


Сплав Э110 (частицы сферической формы): 1 – $P = 250$ МПа, 2 – $P = 350$ МПа, 3 – $P = 300$ МПа

Макроструктуры образцов при различных параметрах ВЭК :



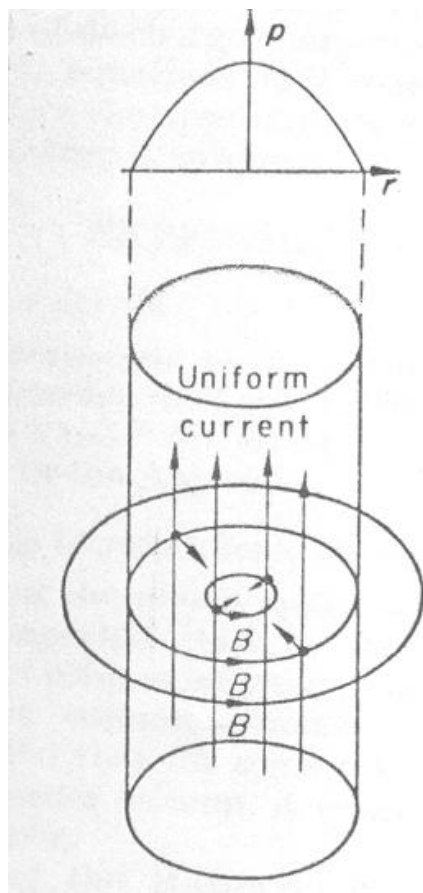
Микроструктура образца из
сферического порошка сплава
Э110 ($\times 125$)
($P = 228 \text{ МПа}$, $J = 221 \text{ кА/см}^2$)



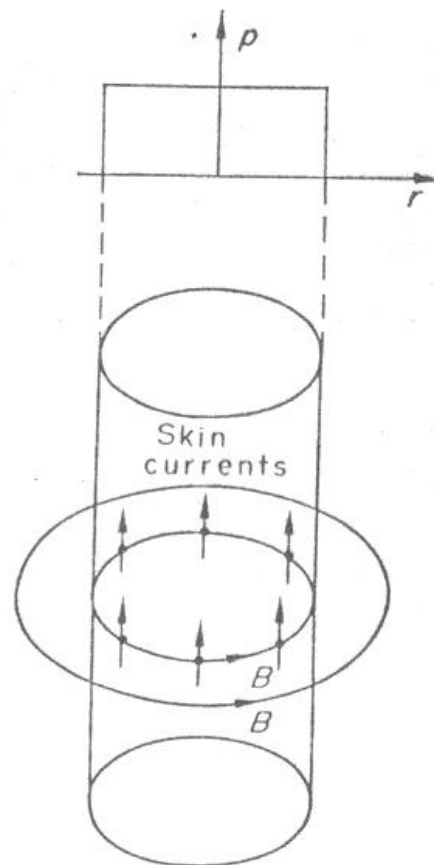
Образец из сферического
порошка сплава Э110
($P = 35 \text{ МПа}$, $J = 231 \text{ кА/см}^2$)

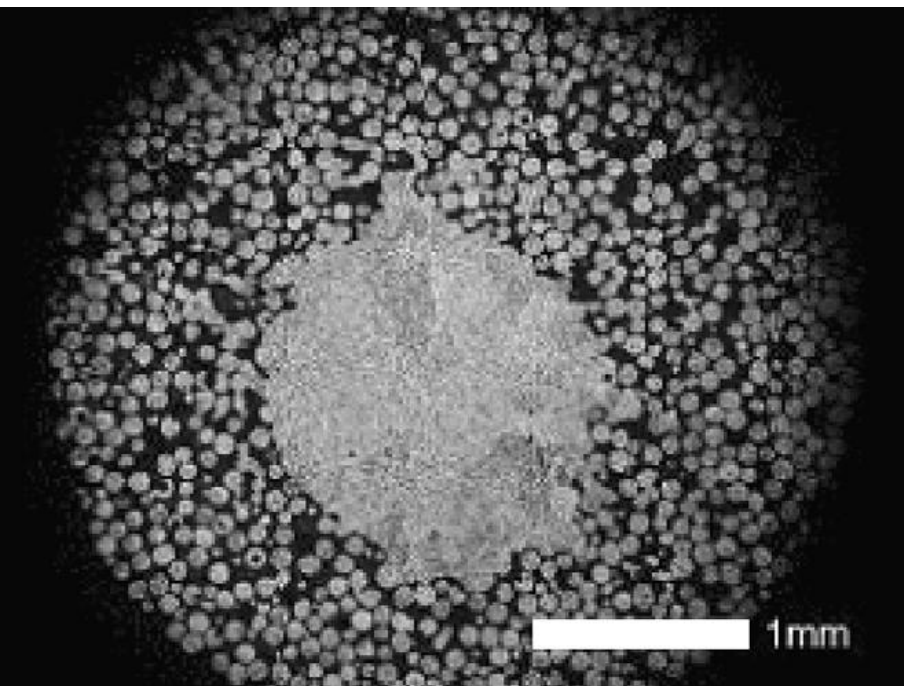
Магнитное давление в образце

Однородная плотность тока

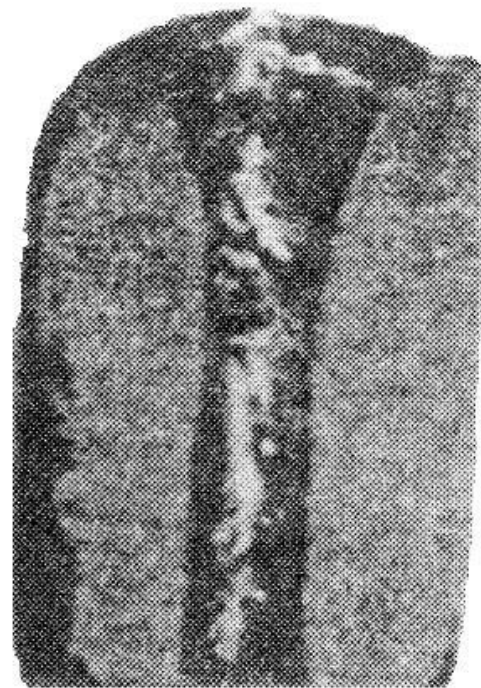


Сильный скин-эффект



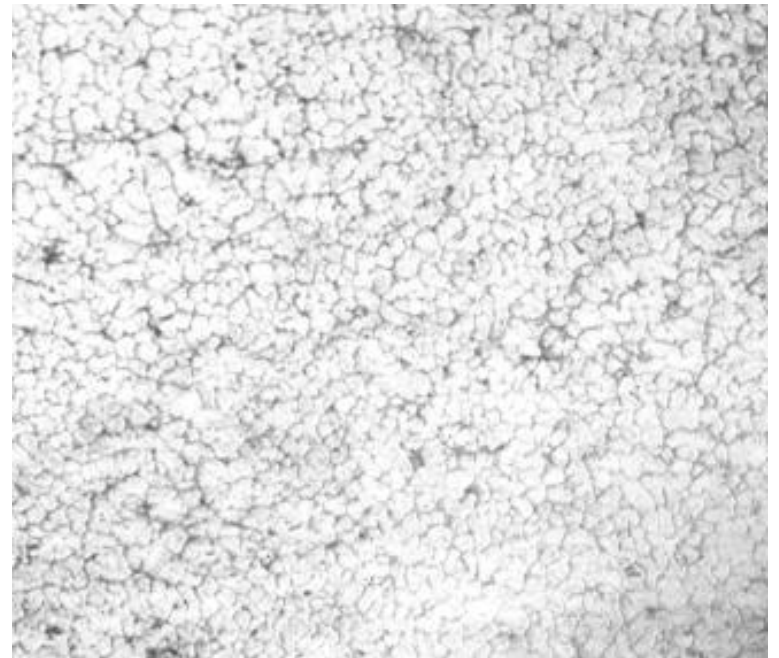
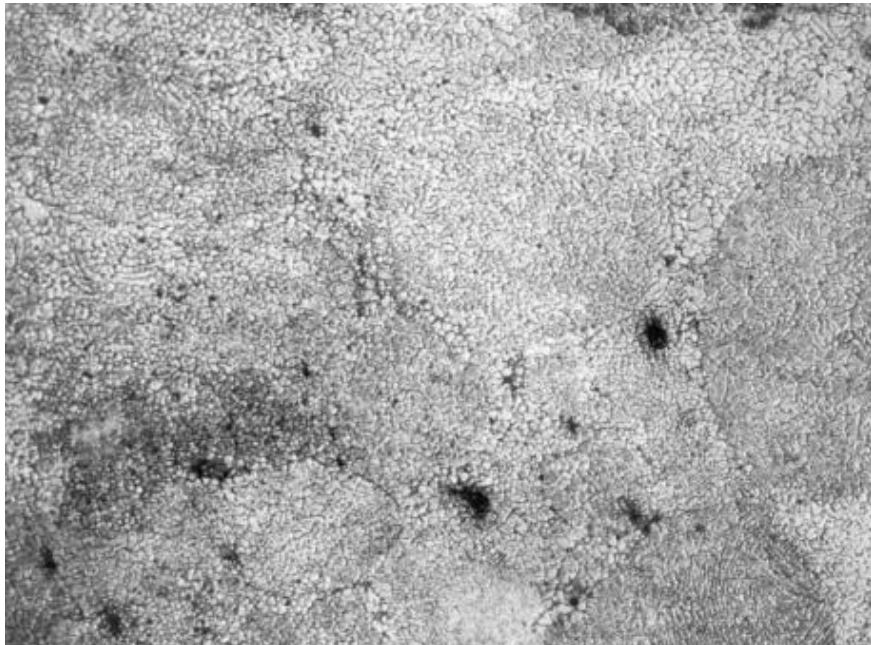


Типичное литое ядро в центре титанового образца



Образование центрального канала, порошок ПЖ2М3:

**Микроструктура стали Р6М5,
полученные методом ВЭК порошка,
прошедшего закалку**



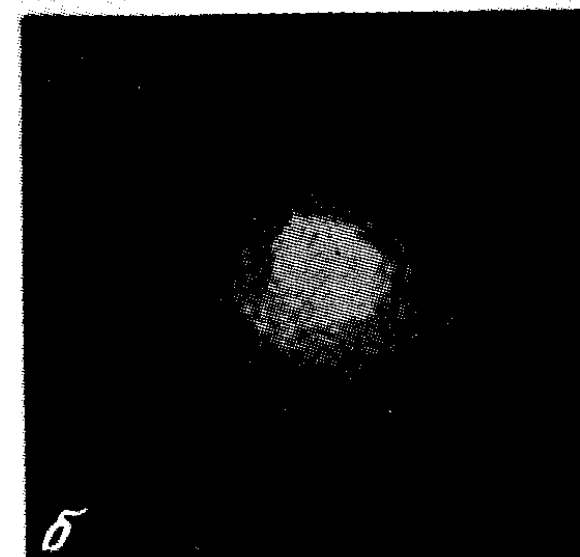
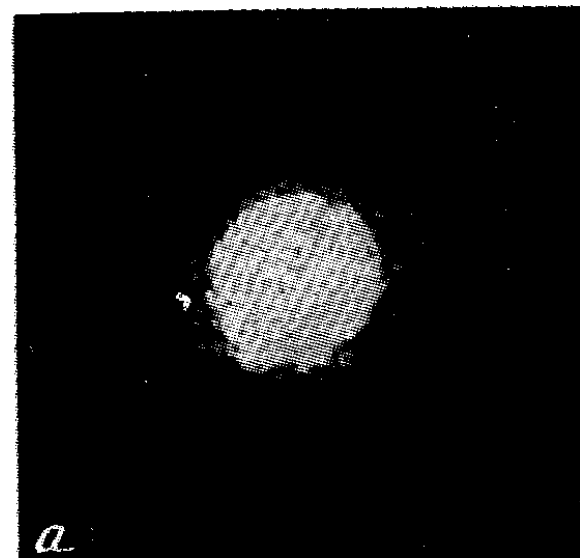
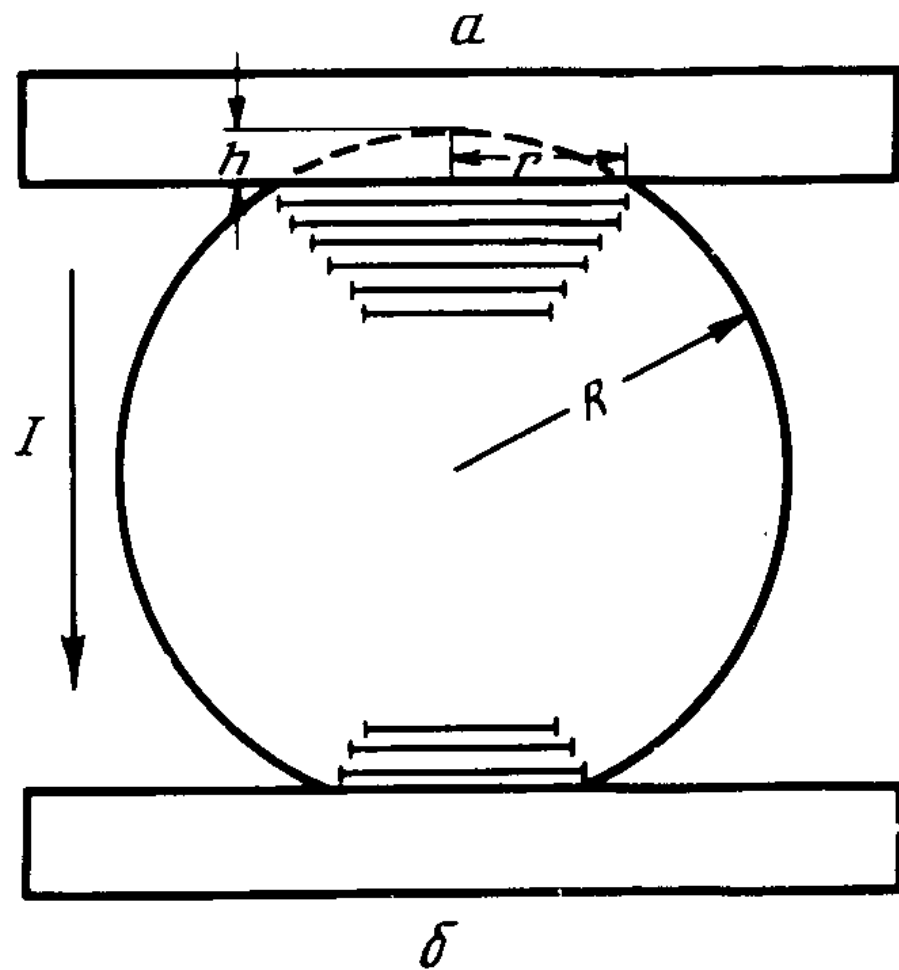
1. Уникальные возможности ВЭК.
2. Основные особенности метода высоковольтной электроимпульсной консолидации (ВЭК) порошковых материалов.
3. Электро-тепловые процессы при ВЭК:
 - на контактах между частицами порошка,
 - в масштабе консолидируемого образца.
4. Динамика закрытия (схлопывания) межчастичных пор.
5. Кинетика уплотнения порошкового образца.
6. Направления дальнейших исследований.

Направления исследований:

- Развитие континуального подхода для описания процесса уплотнения при ВЭК.
- Дальнейшее исследование процессов на контактах между частицами при электроимпульсной консолидации.
- Разработка технологий, сочетающих спарк-плазменное, высоковольтное, магнитно-импульсное воздействия на порошковые материалы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ВЕТРОМ В МЕТАЛЛАХ

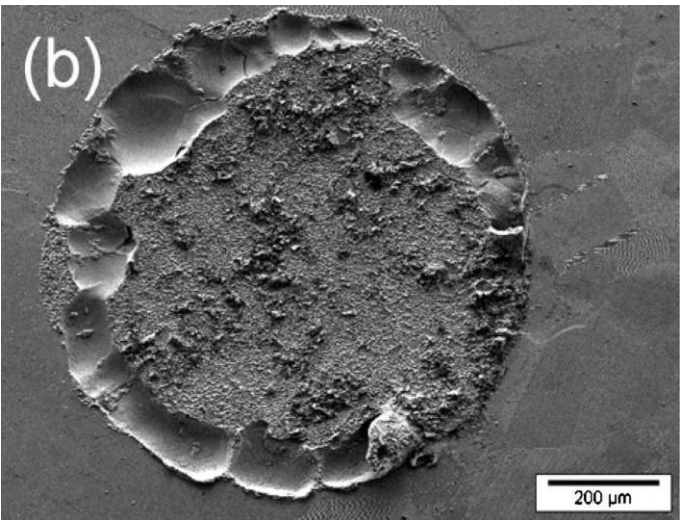
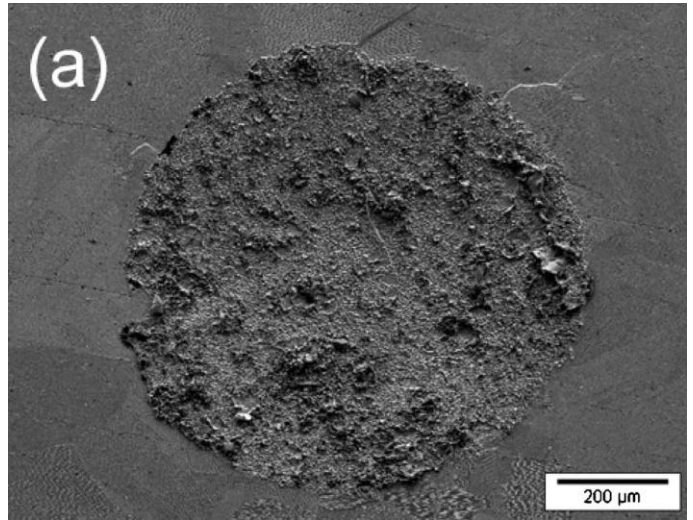
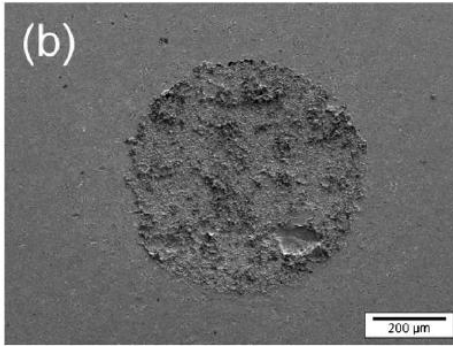
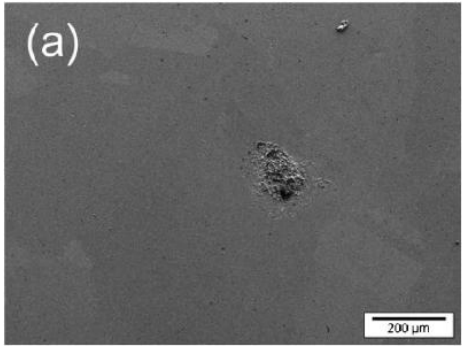
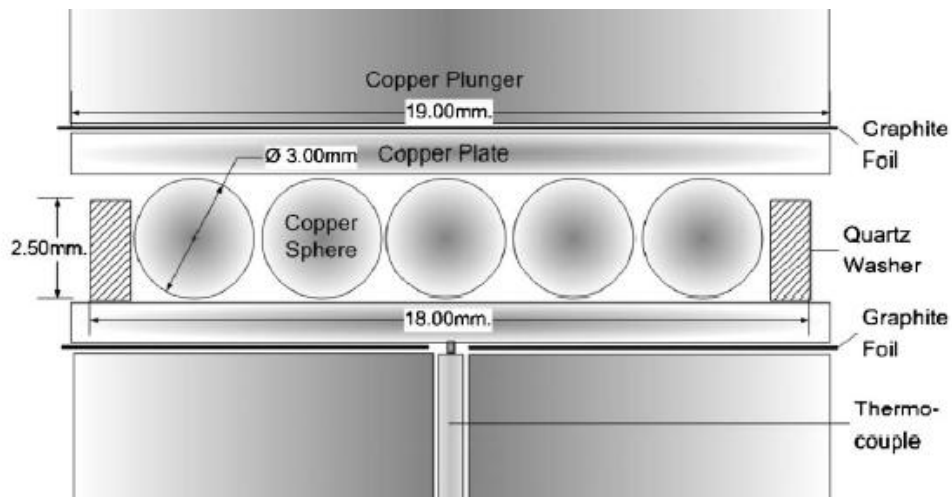
Ю.И.Бойко, Я.Е.Гегузин, Ю.И.Клиничук



Моделирование процесса припекания сферических частиц к пластине

James M. Frei, Umberto Anselmi-Tamburini, Zuhair A. Munir

(J. APP. PHYS., 2007, v. 101, № 114914)



Способ получения консолидированных порошковых материалов. Патент Украины на полезную модель №75650 от 12.12.2012

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПОСТУПЛЕНИИ ЗАЯВКИ

20.09.2012	065081	2012140281
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ <small>оригинала документа заявки</small> 20 СЕН 2012 ◆ ИВС ОТД. №17	(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № (85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу	ВХОДЯЩИЙ №
<input type="checkbox"/> (86) <small>(регистрационный номер международной заявки и дата международной заявки, дата получения патента)</small>	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ <small>(новый почтовый адрес, или по умолчанию адрес)</small> Отдел управления интеллектуальной собственностью Управления научных исследований (ОУИС УНИ) 115409, Москва, Казирское шоссе, д.31, НИЯУ МИФИ Бейгуз Г.В., т.(499) 323-94-53	Телефон: Факс: E-mail:
<input type="checkbox"/> (87) <small>(номер и дата международной публикации международной заявки)</small>	АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ <small>(используется при наличии заявки на изобретение)</small> В Федеральную службу по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Бережковская наб., 30, корп.1, Москва, Г-59, ГСП-5, 113095	
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на изобретение		
(54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КОНСОЛИДИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ		ОТД № 17 24 СЕН 2012 ТЕЛ 24060 16

Спасибо за внимание!

