

«Электроимпульсное компактирование (брикетирование) дисперсных металлических материалов»

**С.Д. Самуйлов, Физико-Технический Институт им. А.Ф.
Иоффе, Sam.mhd@mail.ioffe.ru, (812)-292-71-36, (911)-161-07-22,
С.Н.С., К.Т.Н.**

Основные работы лаб. МГД явлений ФТИ Б.П. Перегуда и К.Б. Абрамовой

1. Магнитная ловушка «Торнадо» со сферической сепаратрисой для вращающейся плазмы (в рамках советско-шведской и российско-шведской программ).
2. Показано что первопричина разрушения проводников электрическим током при относительно небольшой плотности тока - МГД неустойчивости их формы.
3. Обнаружено новое явление механолюминесценция металлов.
4. Разработаны методы управления положением канала дугового разряда. Позволяют перемещать дугу по заданной траектории, т.е. повысить безопасность вакуумно-дуговой плавки, увеличить выход годного и качество металла.
5. Диспергирование металлов для рафинирования и производства гранул. Позволяет изготавливать гранулы из струи расплава и из твердой заготовки. В т.ч. в процессе вакуумно-дуговой плавки. Основное достоинство- возможность получения гранул высокой чистоты.
6. Способ упрочнения расходующихся электродов для вакуумно-дуговой плавки титана. Позволяет обеспечивать гарантированную прочность электродов и исключить их обрыв в процессе плавки.
7. Технология компактирования (брикетирования) металлической (в т.ч. титановой) стружки и лома.

Электрический ток большой плотности – ток такой величины и длительности который вызывает необратимые изменения среды

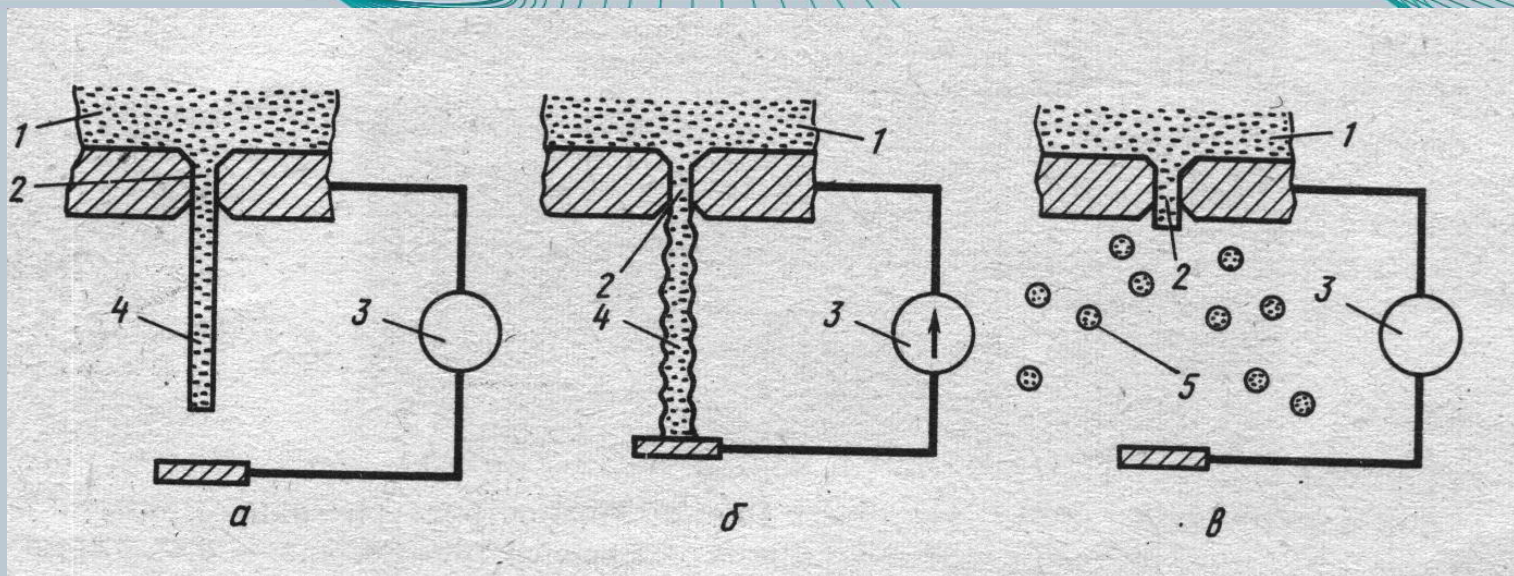
Возможности электрического тока большой плотности как технологического инструмента при воздействии на конденсированные (твёрдые и жидкие) проводники:

1. Диспергирование проводника
2. Залечивание пор и микротрещин
3. Электропластический эффект

При воздействии на перкаляционные системы состоящие из частиц проводника и диэлектрика:

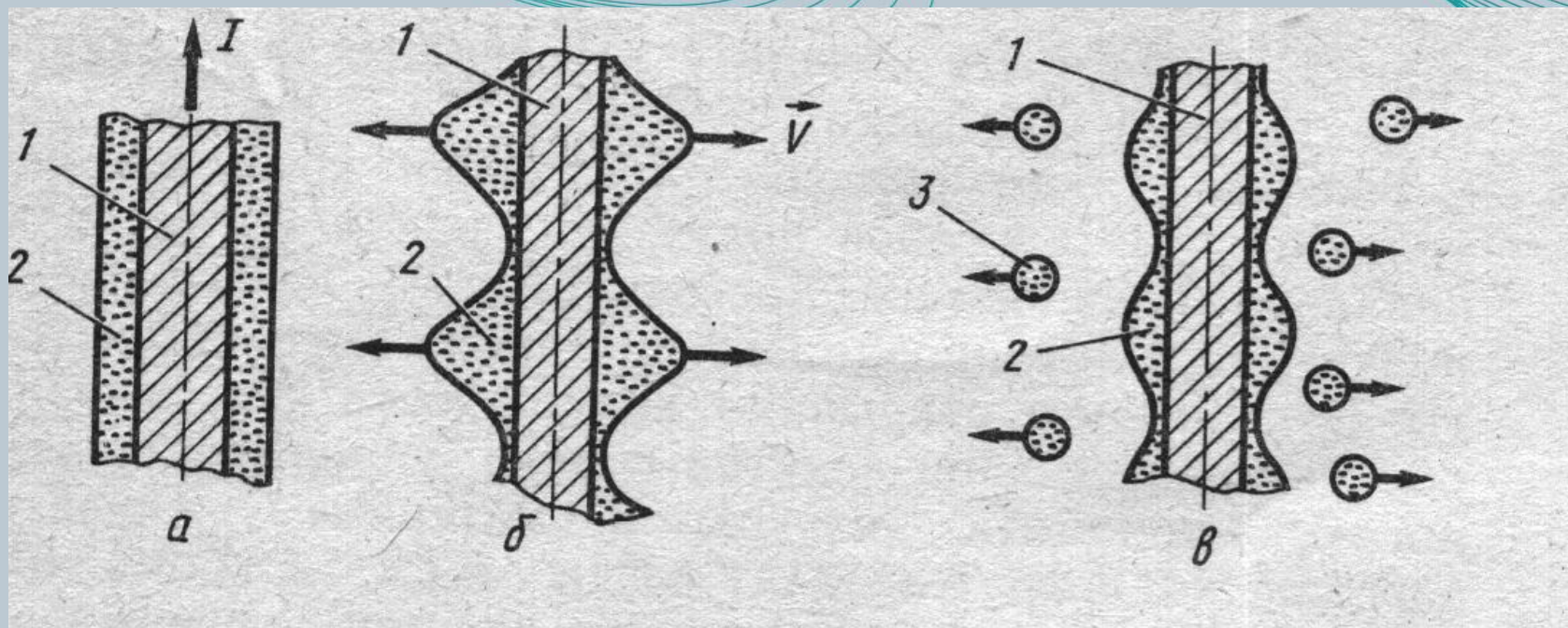
1. Развитие системы т.е. создание или увеличение прочности и проводимости среды в т.ч. компактирование (брикетирование)
2. Деградация системы – снижение проводимости и прочности среды (если прочность обеспечивается проводящей фазой), вплоть до превращения проводящей среды в диэлектрическую, в т.ч. создание квазикритических перкаляционных систем, разрушение и диспергирование.

Диспергирование металла электрическим током большой плотности с целью получения гранул из струи расплава и рафинирования металла



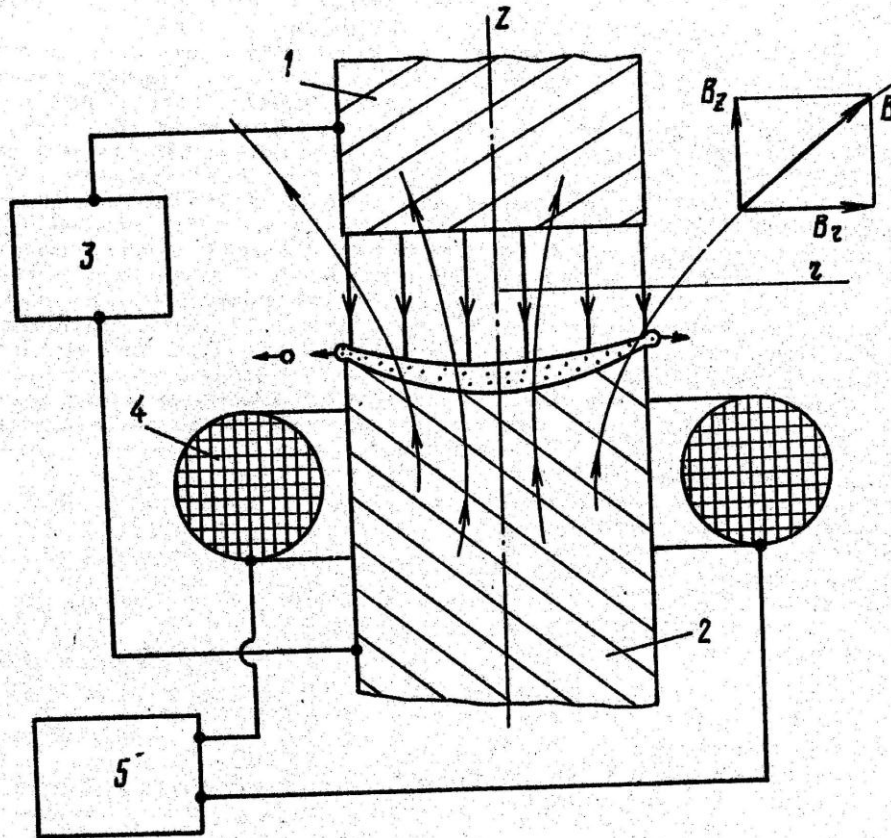
1 — емкость с металлом; 2 — отверстие в днище; 3 — источник тока; 4 — струя металла; 5 — гранулы. а) струя металла, поступающая через отверстие в днище тигля, не касается электрода, цепь не замкнута, тока нет. б) струя замыкает промежуток между тиглем и электродом, источник тока генерирует импульс тока, возбуждается МГД неустойчивость формы струи. в) струя металла диспергирована, образовались гранулы.

Получение гранул из твердой заготовки путём возбуждения МГД неустойчивости формы жидкого слоя на её поверхности при пропускании импульса тока большой плотности



1 — твердый стержень; 2 — жидкий металл, который приходит в движение в результате развития неустойчивости; 3 — гранулы.

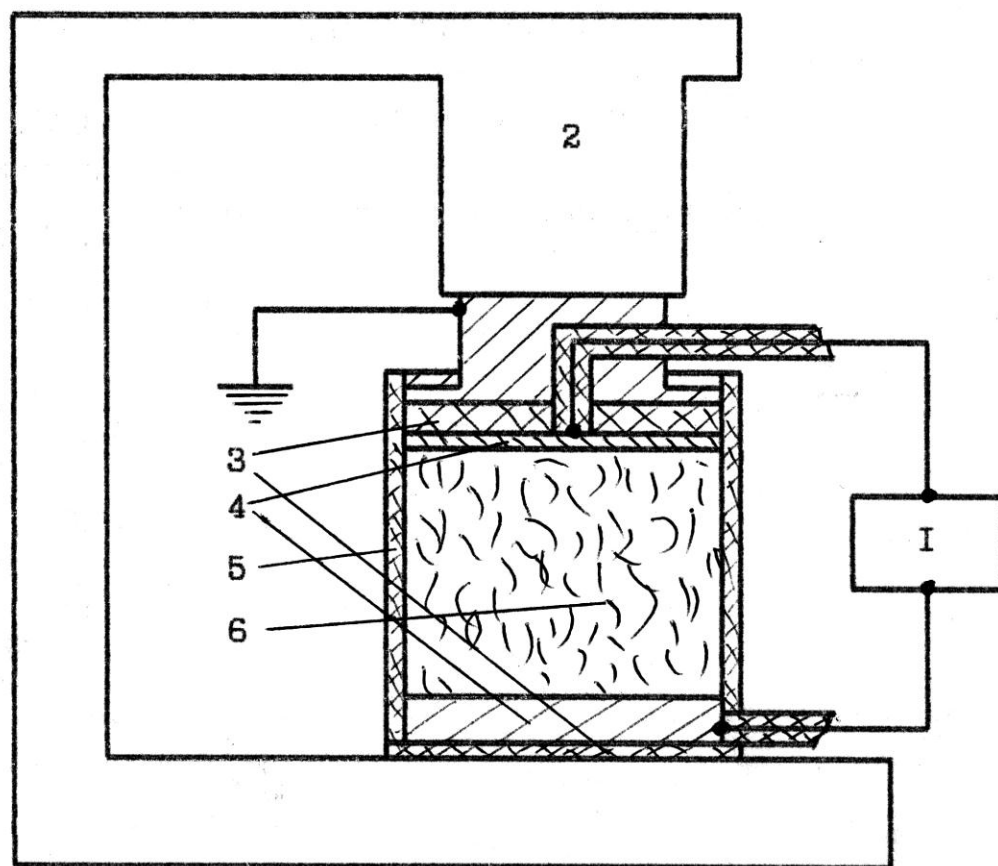
Получение гранул в процессе электродугового переплава



1, 2 - электроды,
3 - источник
тока дуги,
4- катушка,
5 - источник
тока катушки.

Схема процесса электроимпульсного брикетирования

Традиционный способ брикетирования – обычное прессование

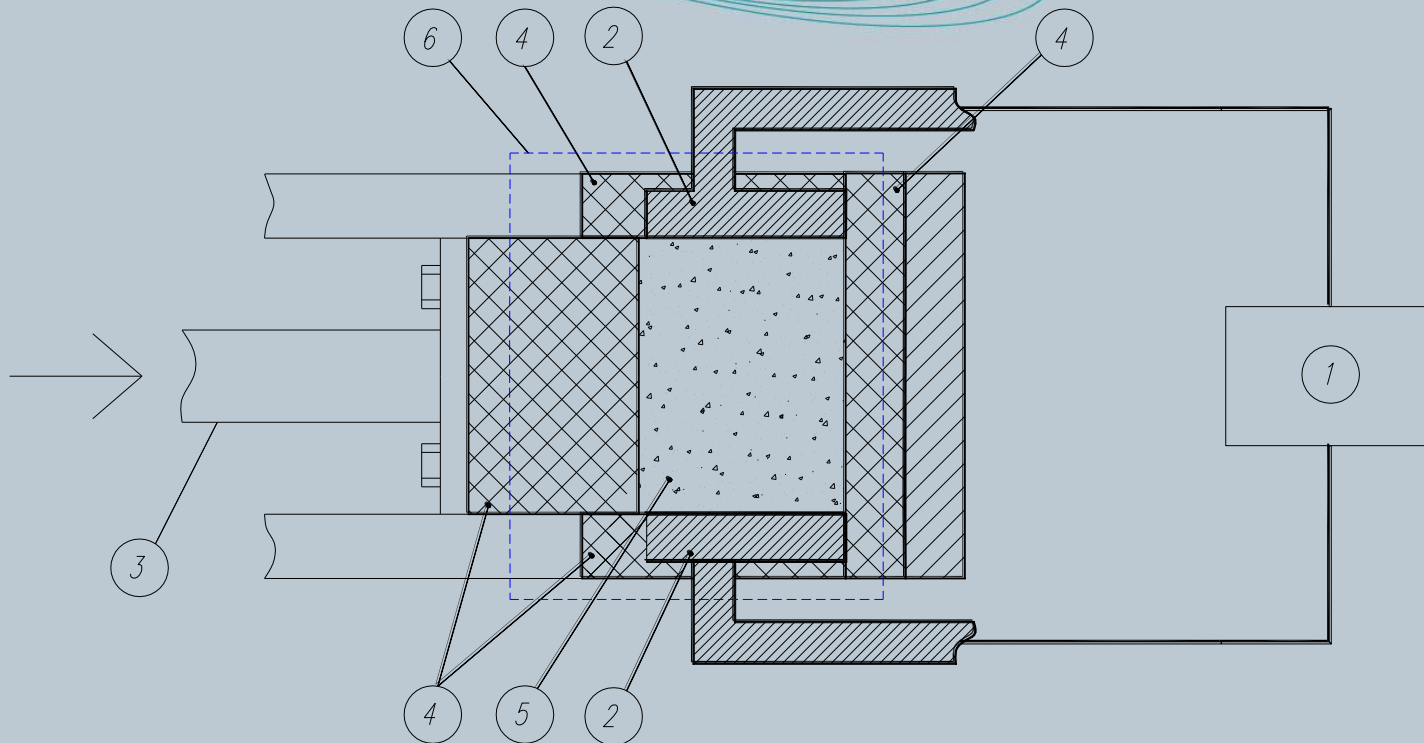


Предлагаемый способ брикетирования – электроимпульсная сварка
Используется локальное кратковременное воздействие на исходное сырьё потока энергии большой плотности - импульс электрического тока. Локальность воздействия обеспечивается способом воздействия, а прочность материала формируется за счёт импульсной электрической сварки контактов между частицами металла.

1 –Источник импульсного электрического тока, 2 – электроды, 3 – пресс, 4 - изоляторы, 5 – стружка, 6 –электроизолированная пресс-форма.

Схема процесса электроимпульсного брикетирования для варианта, при котором электрический ток пропускается перпендикулярно направлению прессования

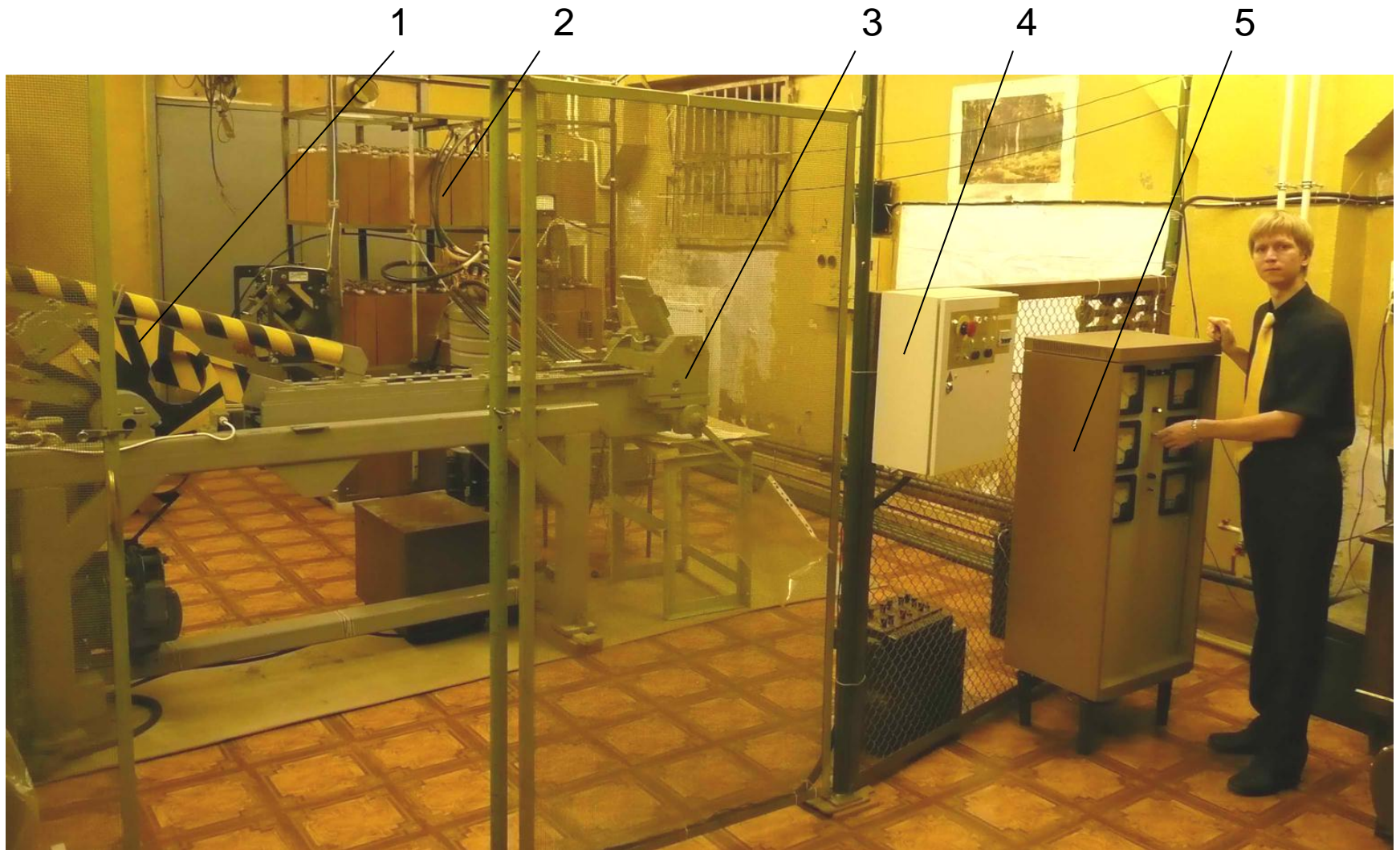
Прочность полученных по такой схеме брикетов на излом: $\sigma_{\perp} = 0,274 \pm 0,121$ (Н/мм²) и $\sigma_{\parallel} = 0,216 \pm 0,08$ (Н/мм²), не зависит от направления нагружения - $\sigma = 0,245 \pm 0,1$ МПа, и соответствует прочности (на разрыв) брикетов полученных по старой схеме: $\sigma = 0,19$ МПа,



В материале имеются выделенные направления (направление прессования и направление пропускания тока, которые могут совпадать или быть взаимно перпендикулярны) но его прочностные характеристики изотропны.

1 –Источник импульсного электрического тока, 2 – электроды, 3 – пресс, 4 - изоляторы, 5 – стружка, 6 –электроизолированная пресс-форма.

Модельный образец установки для брикетирования металлической стружки



1 - пресс, 2 – конденсаторная батарея, 3 – прессовальная камера, 4 – пульт управления прессом, 5 - пульт управления конденсаторной батареей.

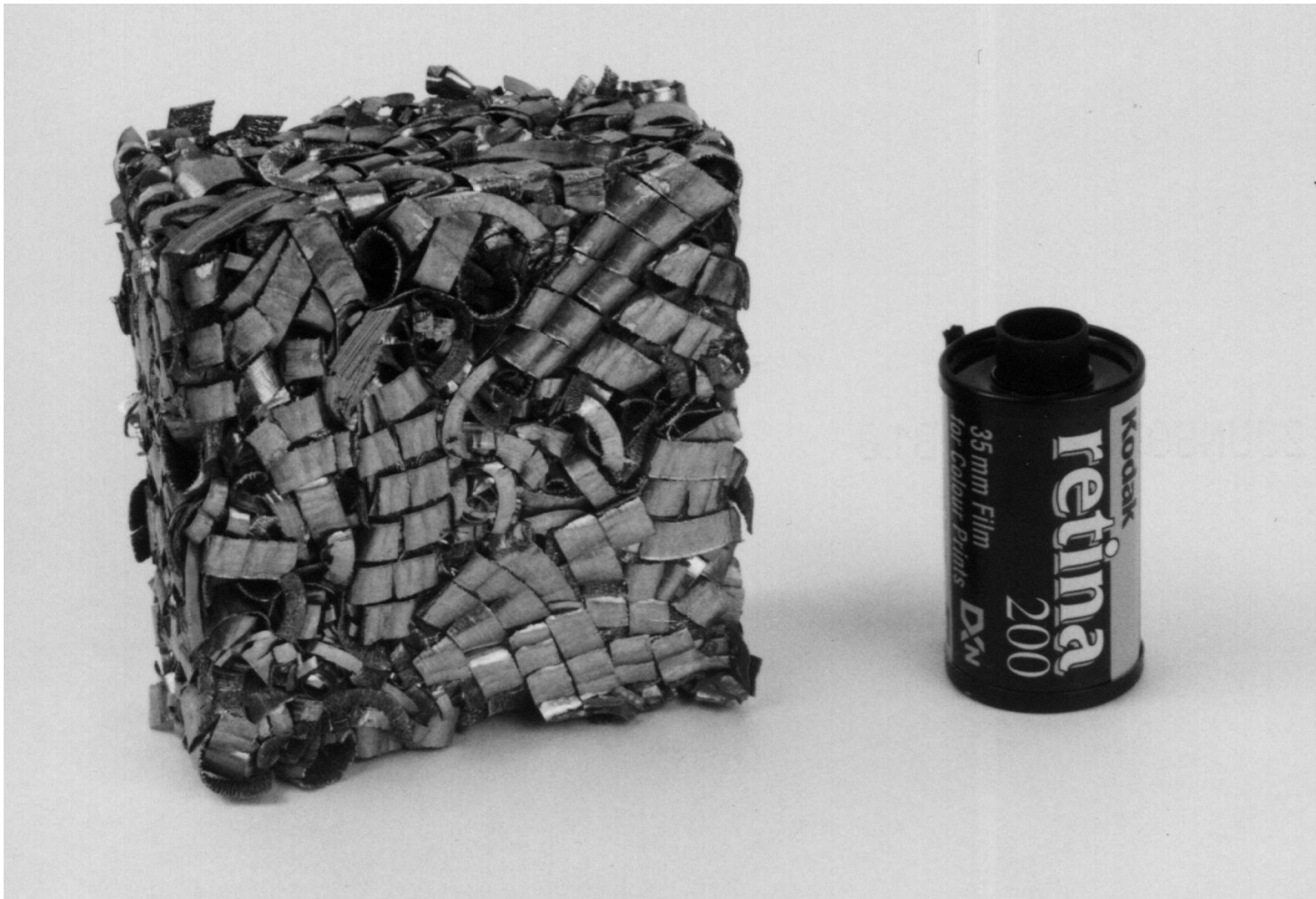
Фотография пробного
брикета полученного на
установке



. Стружка титанового сплава 3М. Размер брикета: 175x64x50 мм; плотность 1,1 г/см³ (пористость 75%); масса 590 г.



- Фотография длиномерного брикета из стружки титанового сплава 3М. Размер брикета: диаметр 53 мм, высота 210 мм; плотность 1,1 г/см³ (пористость 75 %); масса 520 г.



- Фотография брикета из стружки титанового сплава 3М. Размер брикета: 70x70x30 мм; плотность 1,3 г/см³ (пористость 70%); масса 200 г.



Фотография конического брикета из деклассированной титановой стружки с выраженными цветами побежалости. Размер брикета: диаметры 55 и 65 мм, высота 80 мм; плотность 1,3 г/см³ (пористость 70%); масса 300 г. .



- Фотография брикета из деклассированной титановой стружки с выраженными цветами побежалости, смесь длинной витой и мелкой стружки. Размер: диаметр 85 мм, высота 95 мм; плотность 0,7 г/см³ (пористость 85 %); масса 310 г



- Пробный брикет из стружки меди (M0) Размер: диаметр 42 мм, высота 62 мм; плотность $1,4 \text{ г/см}^3$ (пористость 80 %); масса 120 г.

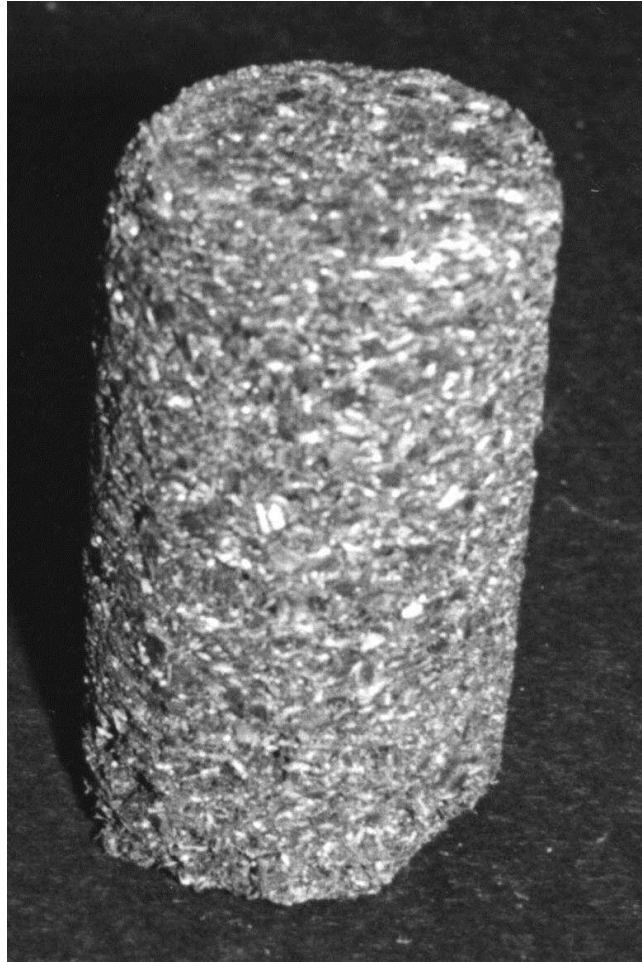


- Фотография брикета из латунной стружки Размер брикета: 175x66x28 мм; плотность 1,5 г/см³ (пористость 80%); масса 470 г.

•



Фотография брикета из стружки алюминиевого сплава. Размер брикета:
 $175 \times 66 \times 28$ мм; плотность $1,0 \text{ г/см}^3$ (пористость 60%); масса 340 г.



- Фотография брикета из чугунной стружки. Размер: диаметр 53 мм, высота 90 мм; плотность $2,8 \text{ г/см}^3$ (пористость 60 %); масса 500 г.



Брикет из стружки нержавеющей (высоколегированной) стали. Размер: диаметр 53 мм, высота 100 мм; плотность 1,5 г/см³ (пористость 80 %); масса 340 г.



- Фотография брикета из стального измельченного лома электроосветительной арматуры, куски $1 \times 20 \times 30$ мм. Размер: диаметр 53 мм, высота 100 мм; плотность $2,1 \text{ г/см}^3$ (пористость 70 %); масса 465 г



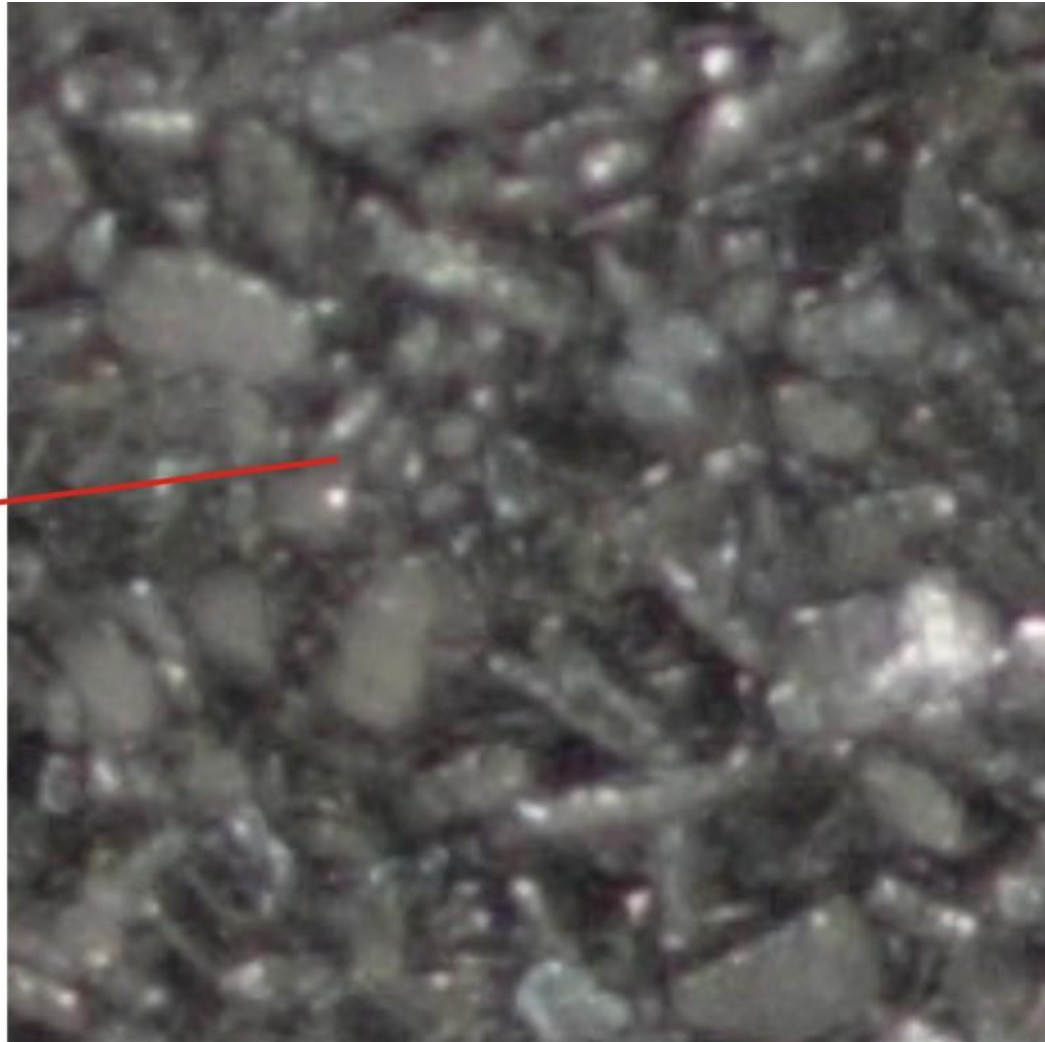
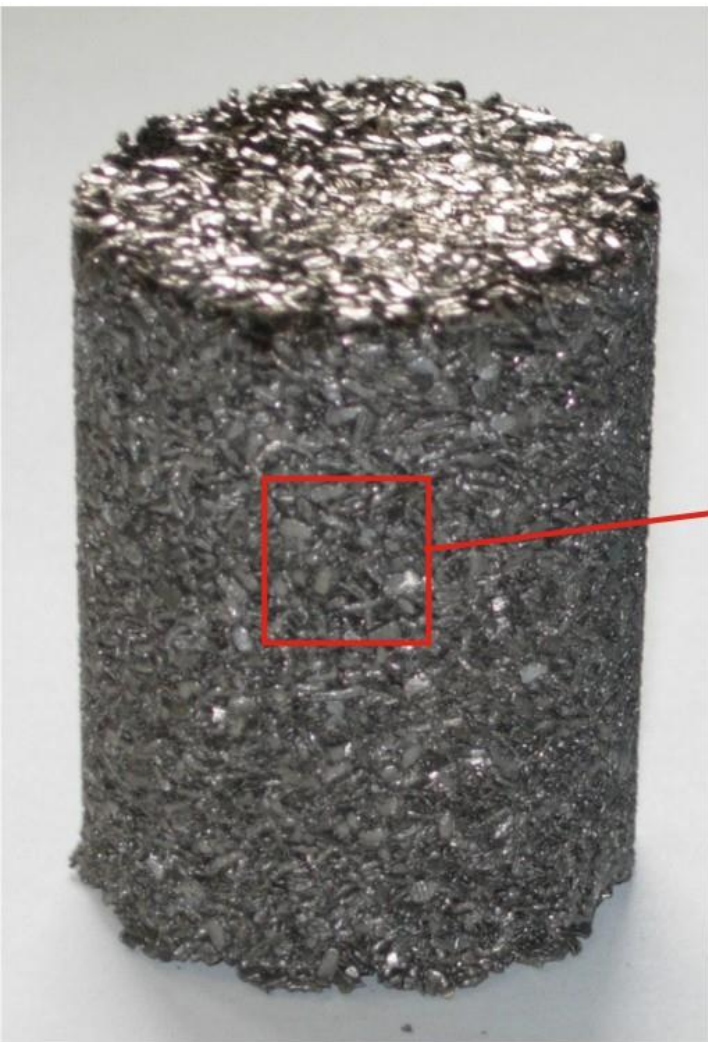
Фотография брикета из измельченного лома автоматных гильз, куски (1 – 4)х10х15 мм. Размер: диаметр 35 мм, высота 50 мм; масса 98 г, плотность 2,0 г/см³.



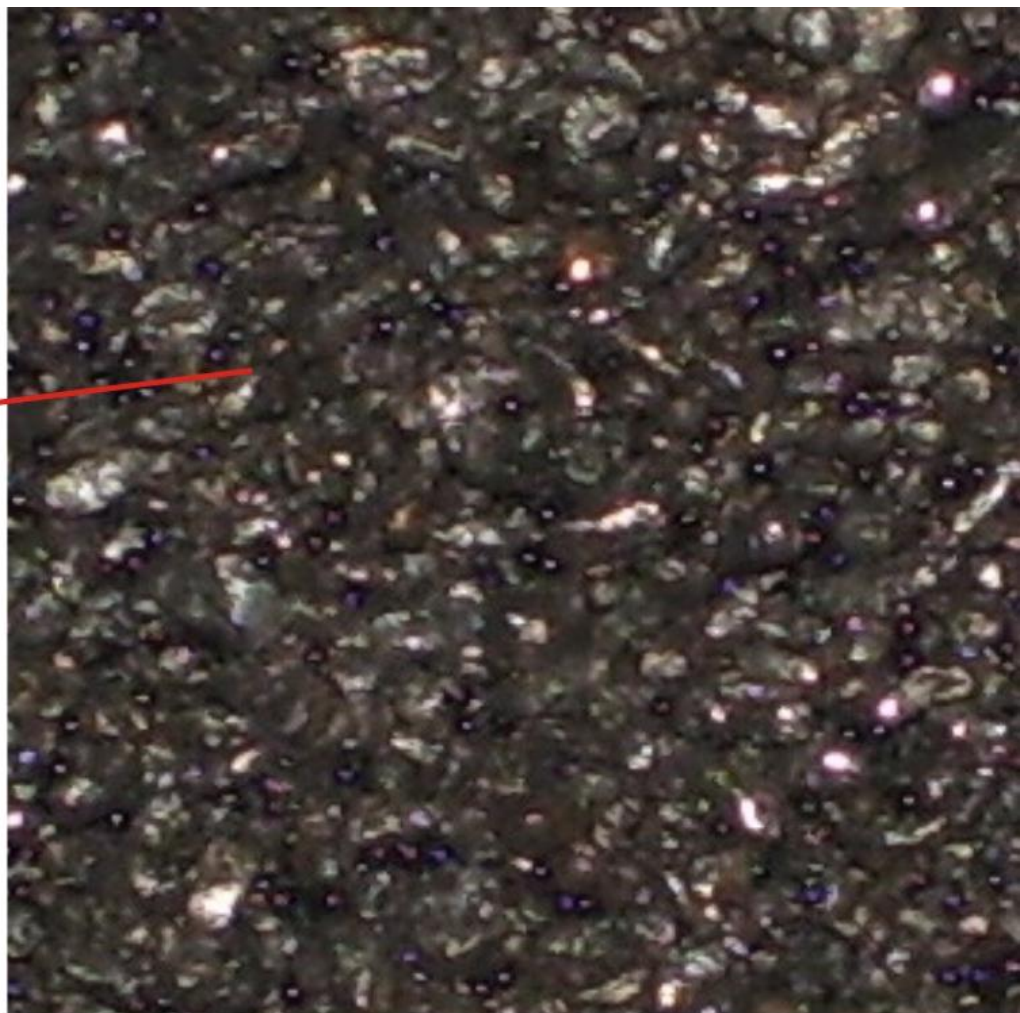
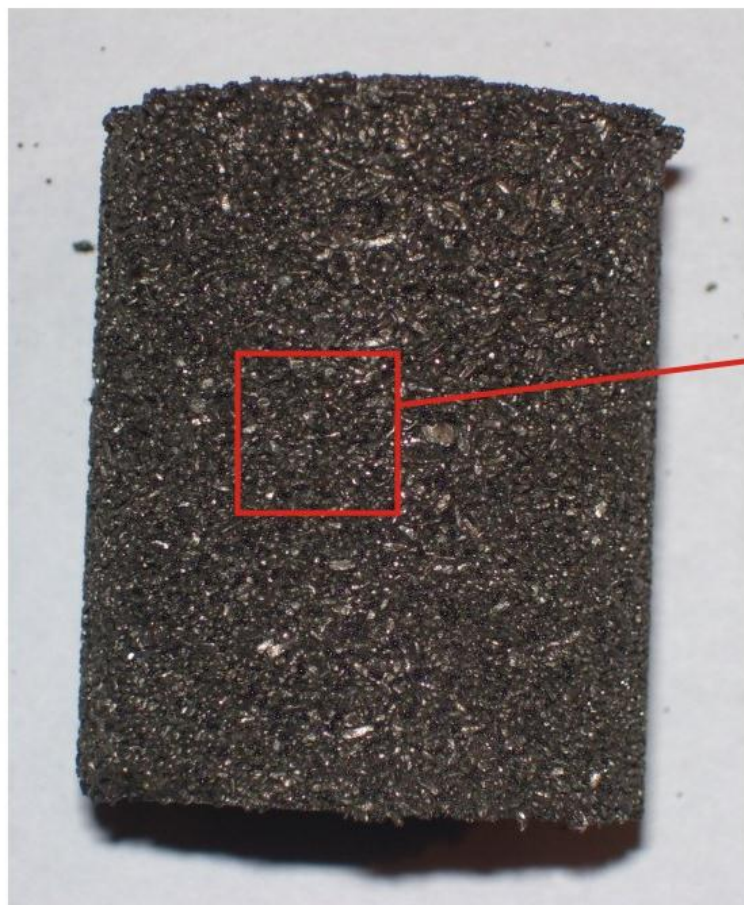
- Фотография фрагмента брикета из стружки высокопрочного титанового сплава BT20 с добавлением крупных кусков титана с размером: диаметр: 20 мм, длина: 48 мм, массой 68 г. Размер брикета: диаметр 50 мм, высота 90 мм; масса 215 г плотность 1,2 г/см³.



Фотография фрагмента композитного брикета из стружки стали Ст. 3 с добавкой кусков материала с малой электропроводностью (горной породы). Размер брикета: 200х60х60 мм; плотность 1,4 г/см³; масса 1 кг (400 г стружки и 600 г породы).



- Брикет из порошка титана (диаметр 35, высота 46,5 мм; масса 103 г, плотность 2,3 г/см³; пористость 50%; осыпь порошка 2,5 г, 2,4 %) справа увеличенное изображение его центральной части 1x1 см

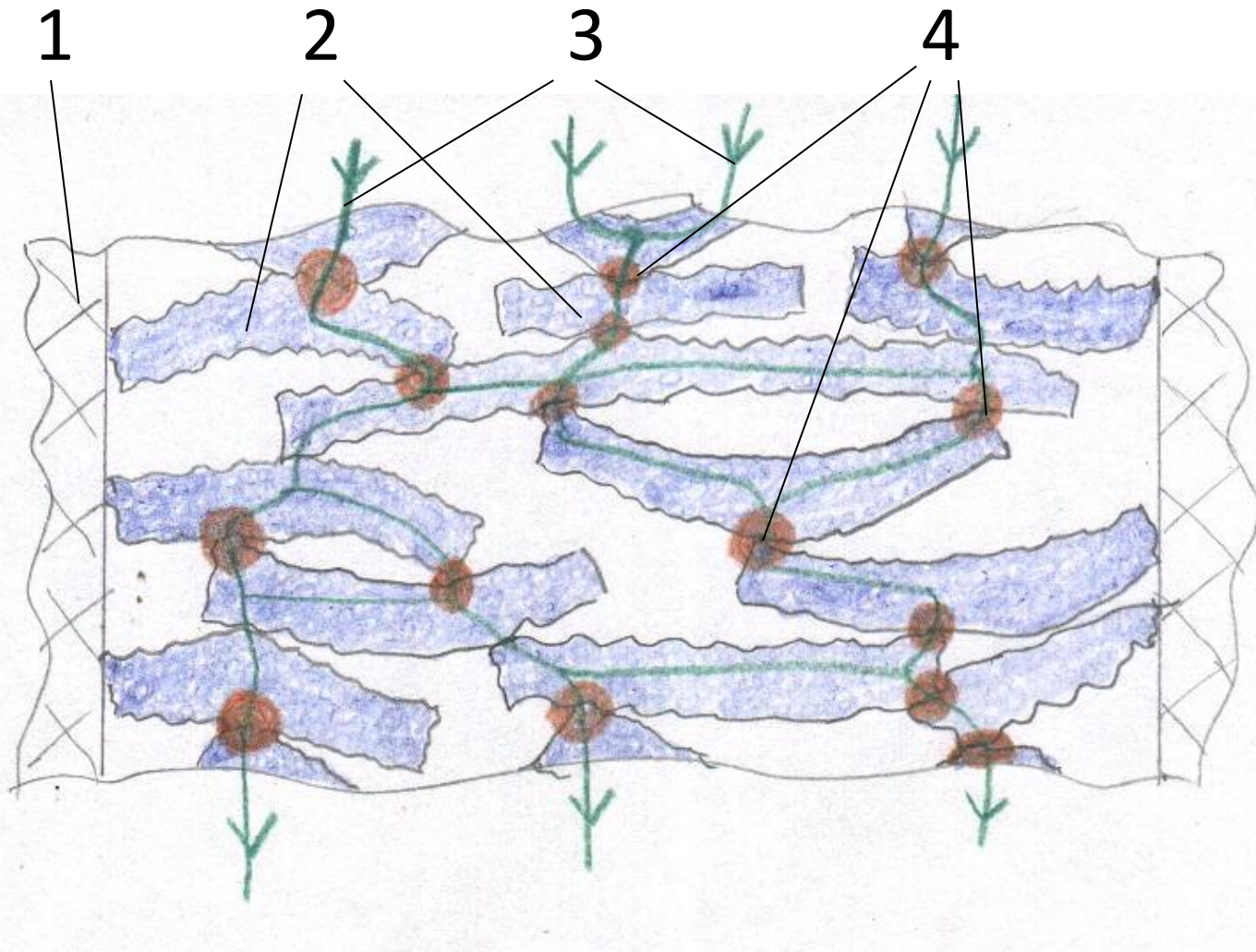


Композитный брикет из порошка титана и стеклообразных минеральных шариков. Диаметр брикета 35 мм, высота 40,5 мм; масса 109 г, плотность 2,8 г/см³; осыпь порошка 3,4 г (3,1 %); содержание шариков по насыпному объёму 20 %, по весу 16%, в объёме брикета стекло 9%, титан 55%, поры 36 %) справа увеличенное изображение центральной части образца 1x1 см

Упрощённая модель решётки контактов

1 – Прессформа. 2 – Куски стружки. 3 - Линии электрического тока. 4 – Контакты.

•



Оценочный расчёт прочности образцов, создаваемой в результате их обработки импульсным электрическим током.

$$K = (V/v)(\gamma_c/\gamma_m) = N \cdot M; N = (H/h)(\gamma_c/\gamma_m)^{1/3}; M = (S/s)(\gamma_c/\gamma_m)^{2/3}; r = \rho_m/a; \parallel$$

$$a_o = \frac{NS\rho_m}{MH\rho_c} \parallel \quad \tau < \frac{a_o^2 c \gamma_m}{10\kappa}$$

$$e = \frac{1}{2} \int_0^\tau \frac{6u^2(t)}{\pi r(t) a^3 \gamma_m} dt \approx \frac{1}{NM a_o a^2 \gamma_m} \int_0^\tau \frac{U^2(t) dt}{R(t)} = \frac{E}{NM a_o a^2 \gamma_m} \parallel$$

$$u \approx U/N; R \approx \rho_m N / M a_o \parallel$$

$$a_{1,2} = \left(\frac{E}{MN \gamma_m a_o e_{1,2}} \right)^{1/2} \dots \dots \dots Q_i = \int_{a_2}^{a_1} M q a^2 f(a) da = \frac{qM (a_M^3 - a_2^3)}{6a_o} \parallel$$

$$Q_c \approx 0,5 P \cdot S (\gamma_c/\gamma_m \approx 0,5) \dots \dots \dots Q = Q_c + Q_i \parallel$$

Результаты испытаний на разрыв брикетов из стружки титанового сплава ЗМ при статическом одноосевом нагружении

U_{δ} B	E , $\kappaД$ $ж$	Группа 12 ($\gamma_c = 0,5 \text{ г/см}^3$, $W = 170 \text{ г}$, $P = 700 \text{ кПа}$)			Группа 16 ($\gamma_c = 0,75 \text{ г/см}^3$, $W = 200 \text{ г}$, $P = 1400 \text{ кПа}$)			Группа 18 ($\gamma_c = 0,8 \text{ г/см}^3$, $W = 250 \text{ г}$, $P = 1800 \text{ кПа}$)			Группа 25 ($\gamma_c = 1,1 \text{ г/см}^3$, $W = 250 \text{ г}$, $P = 6000 \text{ кПа}$)		
		Нагрузка при разрыве образцов			Нагрузка при разрыве образцов			Нагрузка при разрыве образцов			Нагрузка при разрыве образцов		
		Рас- чет, H	Опыт		Рас- чет, H	Опыт		Рас- чет, H	Опыт		Рас- чет, H	Опыт	
			H	$\kappaПа$		H	$\kappaПа$		H	$\kappaПа$		H	$\kappaПа$
250	0,48	-140	*										
300	0,68	-5	**										
500	1,9	110	35	16	-88	*		-1260	*				
1000	7,5	400	30	14	1290	170	77	-750	15	7	-710	**	
1500	17		190	86	1480	350	160	550	420	190	-134	5	2
2000	30	410	180	82	2010	450	200	2030	540	240	5200	360	160
2500	47	1500	310	140				3890	>1140	>510	8100	940	430
3000	68	1250	110	50	1520	>450	>200						
3500	92	1370	>260	>120									
4000	120	6	**										

U_{δ} – напряжение батареи, E - запасённая энергия, γ_c - плотность сжатой стружки,

P – давление прессования, W – масса брикета

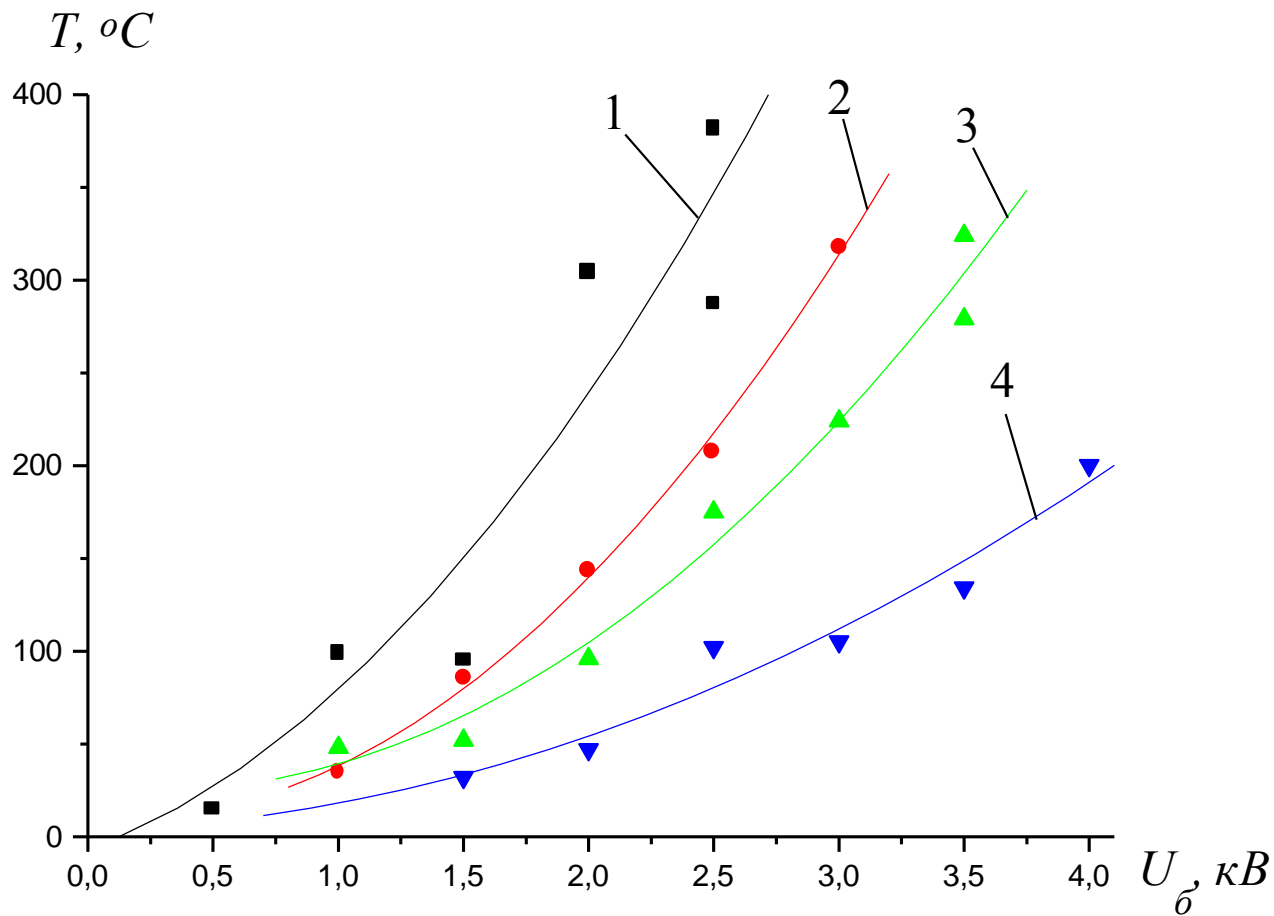
* - прочный образец не сформирован (извлекается стружка)

** - образец сформирован не по всему объёму (извлекаются куски и стружка)

Результаты испытаний на разрыв брикетов из стружки сталей при статическом одноосевом нагружении

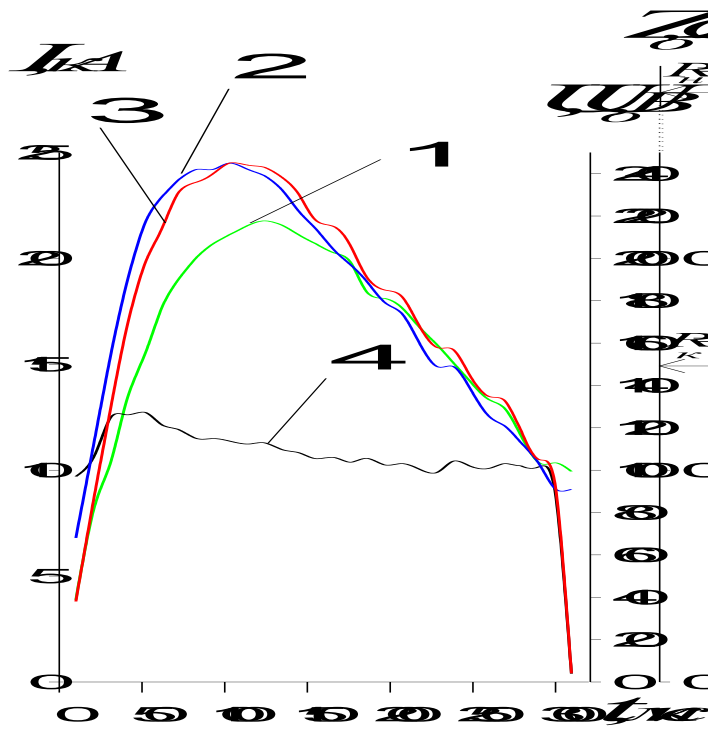
U_6 , В	E , кДж	Нагрузка при разрыве образцов / предел прочности				
		Сталь 3		Сталь 45	Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	
		$\gamma_c = 1.13 \text{ г/см}^3$	$\gamma_c = 1.26 \text{ г/см}^3$	$\gamma_c = 1.26 \text{ г/см}^3$	$\gamma_c = 2.12 \text{ г/см}^3$	$\gamma_c = 2.83 \text{ г/см}^3$
500	1,9	5 Н/2,27 кПа	5 Н/2,27 кПа	-	5 Н/2,27 кПа	15 Н/6,82 кПа
1000	7,5	15 Н/6,82 кПа	10 Н/4,5 кПа	5 Н/2,27 кПа	35 Н/15,9 кПа	100 Н/45,5 кПа
1500	17	15 Н/6,82 кПа	-	15 Н/6,82 кПа	>250 Н/113,6 кПа	>250 Н/113,6 кПа
2000	30	100 Н/45,5 кПа	105 Н/47,7 кПа	-		
2500	47	>250 Н/113,6 кПа	>250 Н/113,6 кПа	>200 Н/90,9 кПа	-	-

U_6 – напряжение батареи, E - запасённая энергия, γ_c - плотность сжатой стружки,

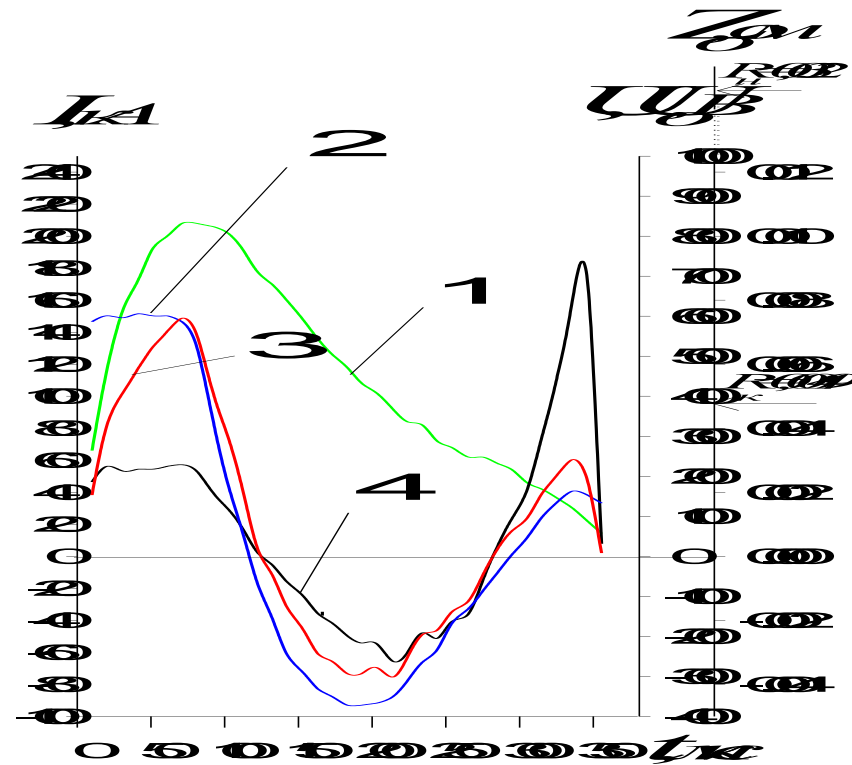


Зависимость температуры брикетов T от начального напряжения на конденсаторной батарее U_0 .

- 1 - плотность брикетов $0,5 \text{ г/см}^3$ (12% металла),
- 2 - плотность брикетов $0,75 \text{ г/см}^3$ (16% металла),
- 3 - плотность брикетов $0,8 \text{ г/см}^3$ (18% металла),
- 4 - плотность брикетов $1,1 \text{ г/см}^3$ (25% металла).



а

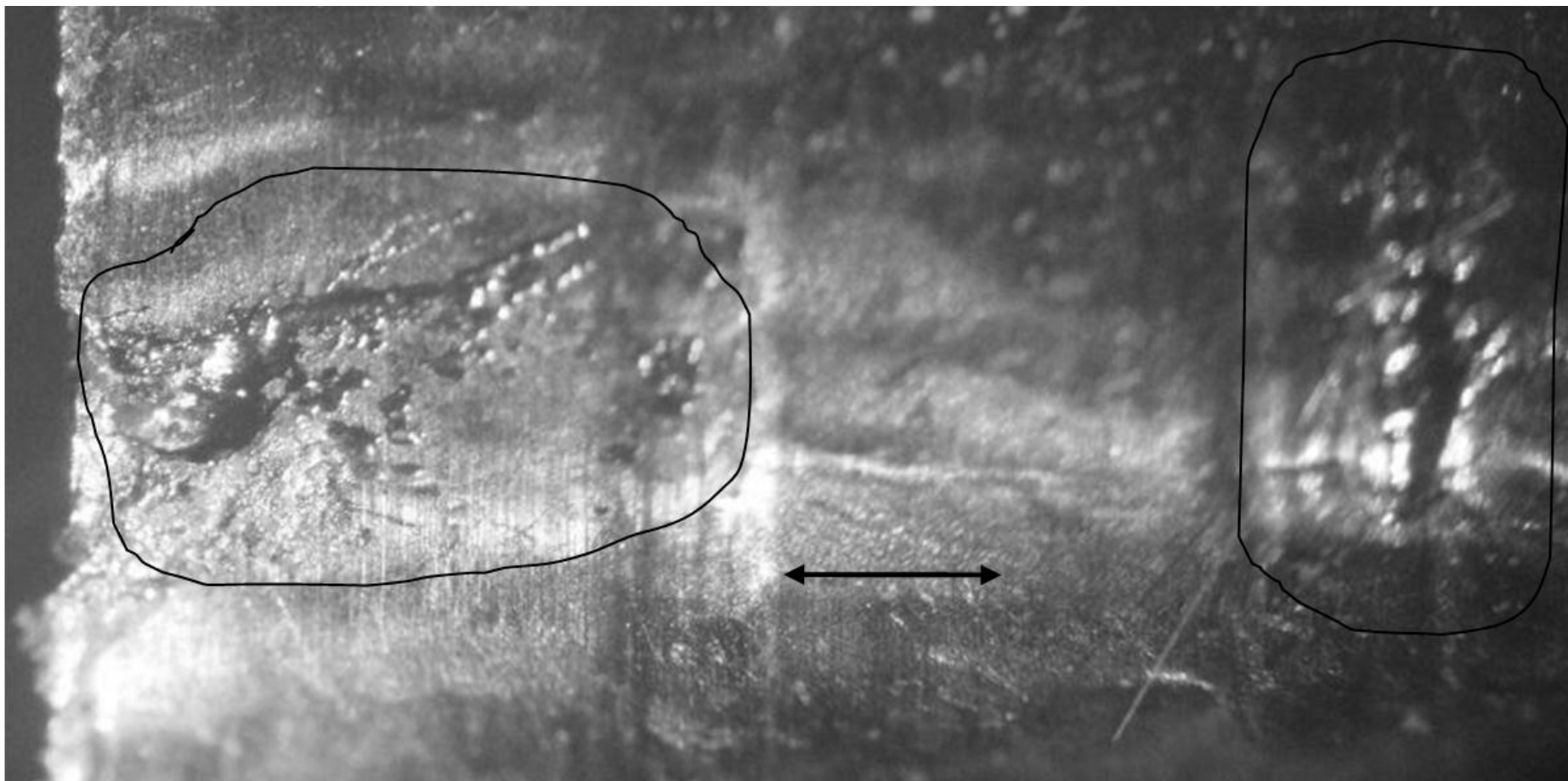


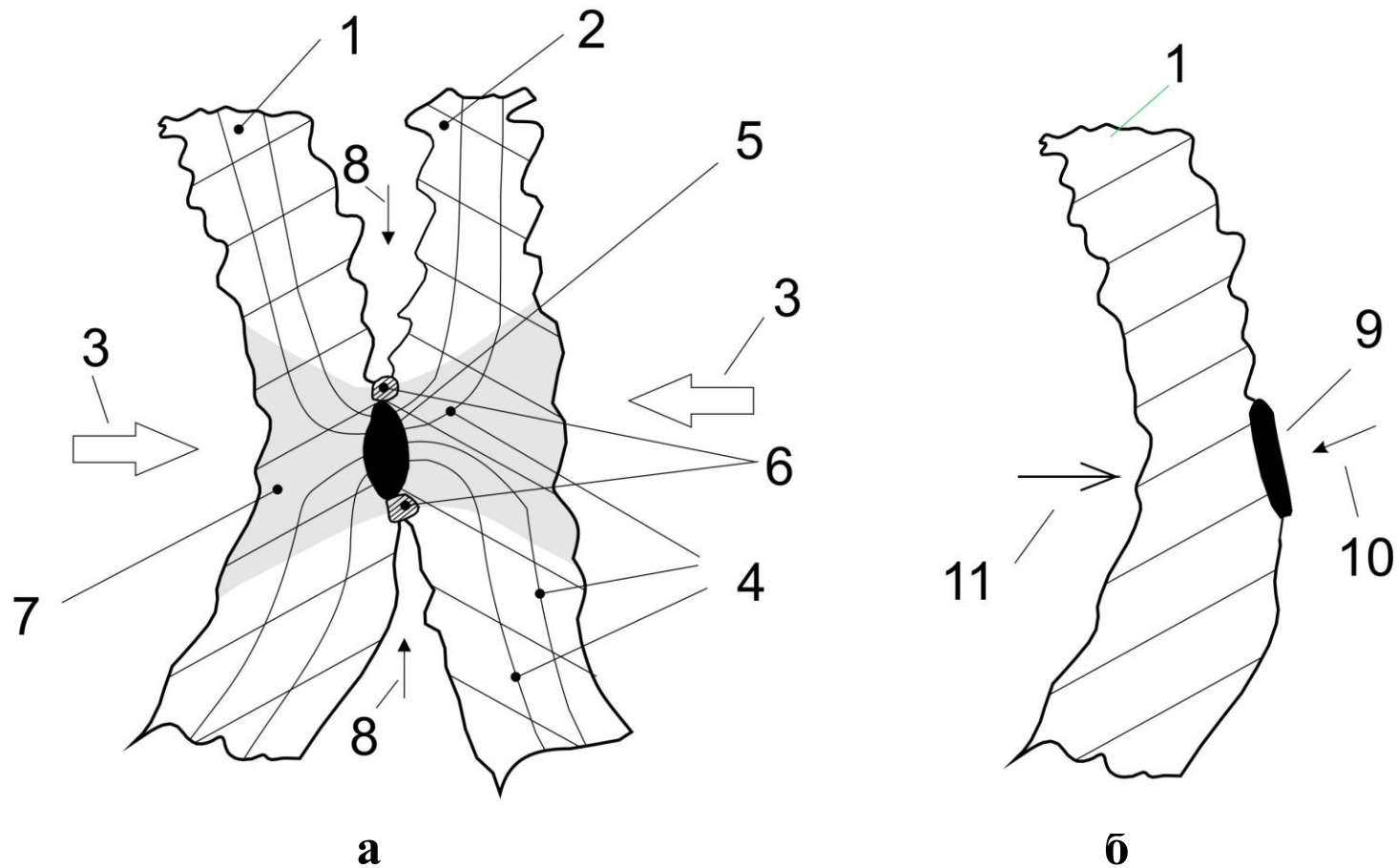
б

- Осциллограммы тока и напряжения на образце,
- а) Плотность образца 0,5 г/см³ («12»), Зарядное напряжение батареи $U_b = 500$ В. Прочность отсутствует, извлекаемая стружка рассыпается.
- б) Плотность образца 0,5 г/см³ («12»), зарядное напряжение батареи $U_b = 2500$ В. Сформирован прочный брикет, нагрузка при разрыве 310 Н.
- 1 — Осциллограмма тока через образец I ,
- 2 — Осциллограмма напряжения на образце U ,
- 3 — Напряжение $U_o = U - L \frac{dI}{dt}$, которое отражает процессы происходящие внутри образца,
- 4 — Величина U_o/I .

Характерный внешний вид контактов.

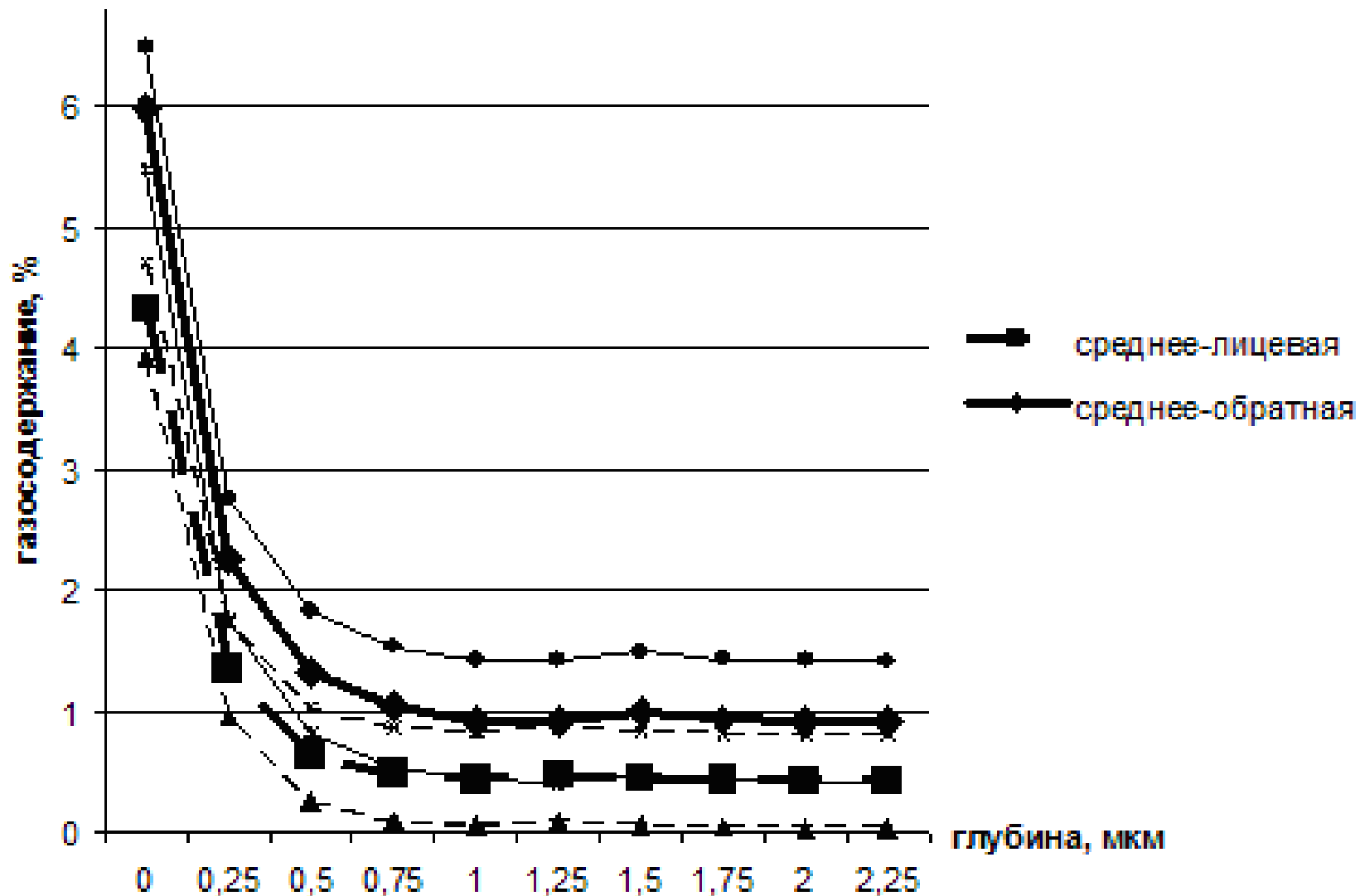
Линиями выделены зоны контактов, стрелкой обозначен отрезок 1 мм.





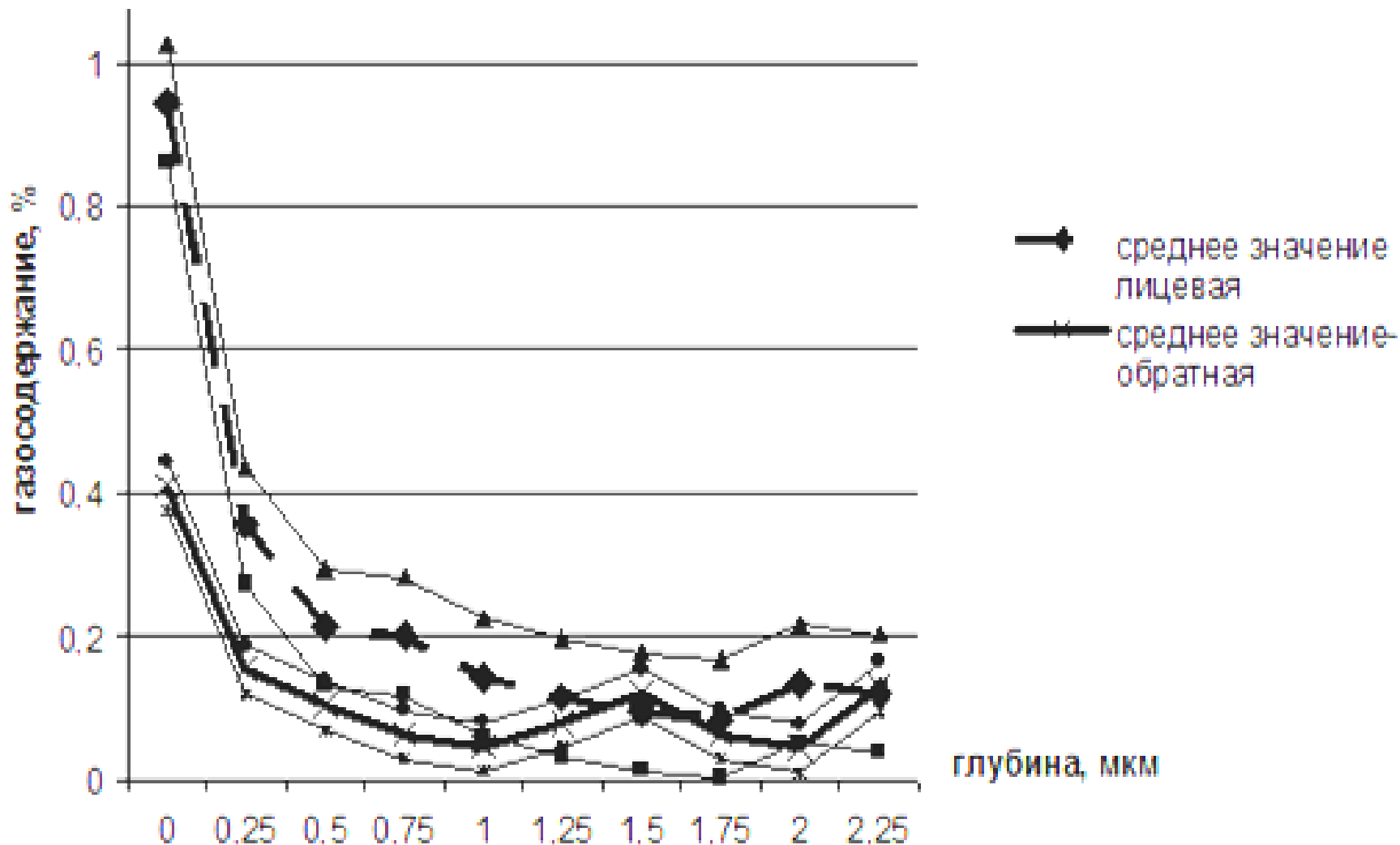
Условная схема места контакта (зоны электрической сварки).

а) В момент сварки, б) после разрушения контакта. 1, 2 – свариваемые фрагменты стружки; 3 – направление действия силы сжатия контакта; 4 – линии электрического тока; 5 – зона нагреваемая в процессе прохождения импульса тока; 6 – вал окисла, окружающий зону сварки; 7 - зона нагреваемая до высоких температур после прохождения импульса тока за счёт теплопроводности; 8 – канал поступления атмосферного воздуха; 9 – видимое место контакта; 10 – место измерения газонасыщения – лицевая сторона; 11 – место измерения газонасыщения – обратная сторона.



- Среднее содержание кислорода в металле с лицевой (10) и обратной (11) стороны в зоне точек сварки.

• Сплав 3М, контакты из центральной области брикета, тонкими линиями показано среднеквадратичное отклонение



Среднее содержание азота в металле с лицевой (10) и обратной (11) стороны в зоне точек сварки.

- Сплав Ti-10V-2Fe-3Al, контакты из периферийной области брикета, тонкими линиями показано среднеквадратичное отклонение.

Возможности использования брикетов

1) В качестве шихты для переплавки

2) В качестве полуфабрикатов

Заготовки, например
для штамповки

Лигатура

Брикеты из смеси стружки
разных металлов

Брикеты как
контейнер

3) В качестве материалов и изделий

Фильтры
или носители

Электрорезистивные
материалы

Вибро звуко и
радиопоглощающие
материалы

Конструкционные
и отделочные материалы
в т.ч. противопожарные

Сравнение технологий с типичными аналогами.

Наименование оборудования	Проект. Установки	Брикет-пресс MP-800
Цена установки тыс. руб.	3000	3600
Производительность (сталь), кг/час	300	300
Давление прессования кг/см ²	50	1800-2300
Коэффициент уплотнения стружки	6	7-10
Форма брикетов	параллелепипед	цилиндр
Удельные энергозатраты, кВт час/т	15	60
Возможность получения пористых изделий и лигатур	+	-
Возможность удаления краски масел и СОЖ из готовых брикетов	+	-
Получение брикетов по размеру загрузочного окна печи	+	-

Только наша установка брикетировывает следующие материалы:

- Реакционные материалы (титан и т.п.).
- Высокопрочные стали и сплавы
- Измельченную листовую обрезь
- Измельченный окрашенный легковесный лом