

На правах рукописи

САМУЙЛОВ СЕРГЕЙ ДМИТРИЕВИЧ

**Электрофизический метод брикетирования
металлической стружки**

Специальность 01.04.13. «Электрофизика, электрофизические
установки»

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2002

Работа выполнена в лаборатории магнитогидродинамических явлений Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник

Абрамова Клара Борисовна

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Титков Василий Васильевич

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Синани Альфред Борисович

Ведущая организация –

ЦНИИ Конструкционных материалов «Прометей»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «___» декабря 2002 г. в 14 часов, в аудитории 325 (Главное здание) на заседании диссертационного совета К 212.229.03 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Отзывы и замечания в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Электромеханический факультет, Диссертационный совет К 212.229.03

Автореферат разослан «___» _____ 2002 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

К. 212.229.03

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Гумерова Н.И.

Актуальность работы. Электрический ток большой плотности широко используется в качестве технологического инструмента. Новые результаты исследований на стыке электрофизики, физики плазмы и магнитной гидродинамики объяснили природу явлений возникающих в проводниках при пропускании по ним электрического тока большой плотности и обнаружили ряд новых явлений; они позволяют расширить возможности электрического тока как инструмента для решения современных технологических проблем. Одна из таких проблем - рациональная утилизация металлической стружки. При механической обработке заготовок 20 - 80% их веса переходит в стружку (т.е. до 30% выплавляемого металла). Перевозка и переработка стружки навалом ведет к большим затратам и потерям металла (до 50 %), при этом окружающая среда загрязняется стружкой и пылью, маслами и смазкой, продуктами окисления (угара) металла. Один из путей рациональной переработки стружки – брикетирование её в местах образования, перевозка и переработка брикетов. Существующая технология брикетирования недостаточно эффективна, использует тяжелое оборудование, не обеспечивает необходимого качества брикетов, фактически не позволяет брикетировать стружку ряда материалов, например: титановых сплавов, высокопрочных сталей, чугуна, и целый ряд других материалов. Проблема брикетирования стружки особенно актуальна для титановых сплавов, т.к. современная технология не позволяет эффективно использовать стружку этих дорогостоящих материалов.

Цель работы. Исследовать возможность использования электрического тока большой плотности в качестве технологического инструмента для решения проблемы брикетирования металлической стружки и разработать эффективный метод брикетирования, который позволит брикетировать стружку любых металлов и сплавов и в том числе высокопрочных реакционных металлов, в частности титановых сплавов.

Новизна работы. Для решения проблемы брикетирования используется нетрадиционный для данной сферы деятельности электрофизический подход. В качестве технологического инструмента используется импульсный элек-

трический ток большой плотности. В электрофизике процессы и явления связанные с протеканием импульсных токов большой плотности по композитным проводникам состоящим из металла и диэлектрика изучены мало, а та конкретная область к которой относится данная работа – формирование механической прочности композитной среды, состоящей из отдельных частиц металла, пространство между которыми заполнено диэлектриком, под действием коротких импульсов электрического тока большой плотности - до настоящего времени не изучалась.

Практическая ценность работы. Разработанная технология и оборудование позволяют более рационально и с меньшими затратами утилизировать ценное техногенное сырьё: металлическую стружку и другие подобные отходы, в т.ч. стружку титановых сплавов. Это открывает возможность ликвидации свалок и сохранных отвалов стружки, позволяет снизить загрязнение окружающей среды.

Положения выносимые на защиту.

1. Протекание короткого импульса тока большой плотности по смеси отдельных металлических частиц может приводить к формированию механически прочных образцов (брикетов).
2. Предложен и опробован новый метод брикетирования металлической стружки.
3. Брикетирование, в том числе реакционных металлов (титановых сплавов), может осуществляться без защитной среды на атмосферном воздухе.
4. Удельные энергозатраты на брикетирование титановой стружки по предлагаемой технологии такие же или существенно меньше, чем в других разрабатываемых методах брикетирования такой стружки.
5. Метод открывает возможность получения пористых брикетов.
6. Разработана, изготовлена и испытывается опытно-промышленная установка БТ-80 для брикетирования стружки титановых сплавов, получены пробные брикеты.

Апробация. Работа докладывалась на следующих конференциях:

1. IX Симпозиум по сильноточной электронике. 1992, Россия.
2. Международный конгресс «Инвестиционные проекты, строительство, экология», С.Петербург 17 - 19 апреля 1996 г.
3. Научно-техническая конференция, посвященная 65-летию отечественной металлургии легких сплавов. Москва, 21 октября 1998 г.
4. «The 9th World Conference of Titanium», 7-11 June 1999, Sant-Petersburg, Russia.
5. Четвёртая Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности.», 16-18 июня 1999 г. Санкт-Петербург, Россия, в рамках Третьего Петербургского Экономического форума.
6. Предлагаемая электрофизическая технология брикетирования экспонировалась на выставке «Высокие технологии, инновации, инвестиции.», которая проходила в рамках Второго Петербургского Экономического форума в июне 1998 г. Получен диплом выставки.
7. Семинары ФТИ.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 15 работах, список приведён в конце автореферата.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и 3^х приложений.

В главе 1 анализируется возможность использования электрического тока большой плотности как технологического инструмента, обосновывается актуальность проблемы брикетирования металлической стружки, проводится сравнительный анализ существующих и разрабатываемых методов брикетирования.

В главе 2 рассматривается предлагаемый электрофизический процесс брикетирования металлической стружки. Сущность метода состоит в том (рис.1.), что стружку прессуют при относительно небольшом давлении пресования, а затем подвергают специальной обработке импульсным электри-

ЧЕСКИМ ТОКОМ.

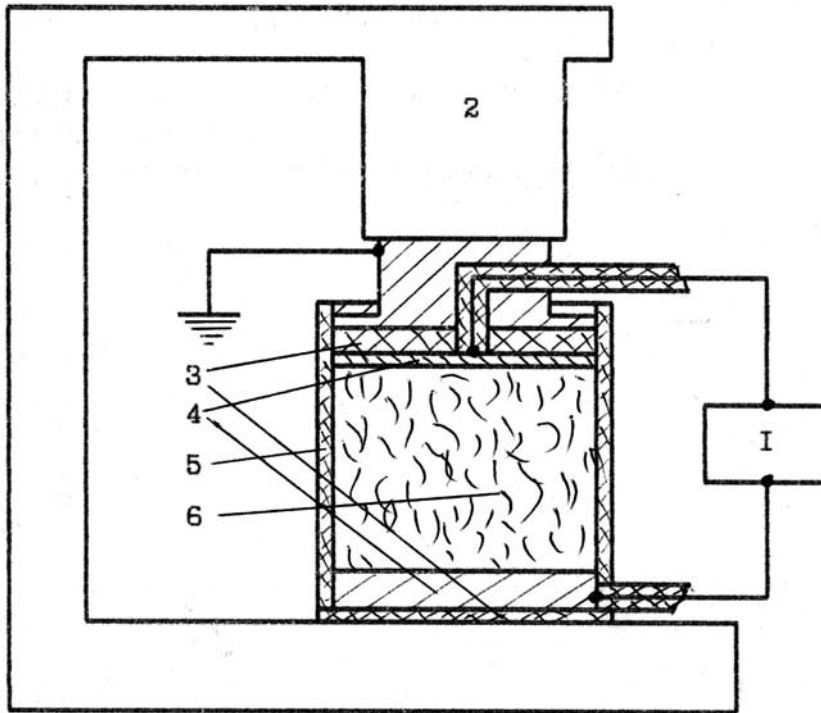


Рис. 1. Схема процесса брикетирования. 1 – источник импульсного электрического тока, 2 – пресс, 3 – изоляторы, 4 – пуансоны-электроды, 5 – электроизолированная прессформа, 6 – стружка

Прочность брикетов обеспечивается за счет электрической сварки контактов между частицами стружки, качественная расчётная модель процесса брикетирования позволяет оценить её по следующей формуле:

$$Q = Q_c + Q_i, \quad (1)$$

Где Q_c - сила, возникающая в образце в результате прессования:

$$Q_c \approx 0,5P S(\gamma_c/\gamma_m - 0,5) \quad (2)$$

сила сопротивления разрыву Q_i (возникает после пропускания тока):

$$Q_i = \frac{qM(a_M^3 - a_2^3)}{6a_o} \quad (3)$$

P - усилие прессования, S - площадь сечения образца, γ_c – плотность сжатой стружки, γ_m - плотность металла, q - предел прочности металла в зоне контакта, $N = (H/h)(\gamma_c/\gamma_m)^{1/3}$ число последовательных слоев стружки, в каждом из которых: $M = (S/s)(\gamma_c/\gamma_m)^{2/3}$ параллельных контактов, $a_M = \max\{a_1, 2a_o\}$,

$a_{1,2} = \left(\frac{E}{MN\gamma_m a_o e_{1,2}} \right)^{1/2}$ наибольший и наименьший контакты, которые сварены

при пропускании тока, $a_o = \frac{NS\rho_m}{MH\rho_c}$ - средний размер контакта существующе-

го в сжатом образце, H – длина образца, h – средняя толщина кусков проводника, s – средняя площадь куска проводника, приходящаяся на один контакт, E – энергия, вкладываемая в образец при пропускании импульса тока, e_1 , e_2 – удельная энергия необходимая соответственно для разогрева (увеличения пластичности материала) или плавления материала контакта.

На основе разработанной модели заданы основные параметры экспериментальной установки и модельных образцов, проводится сравнительная оценка энергозатрат на брикетирование стружки различными способами и на утилизацию стружки в целом.

В главе 3 описана экспериментальная установка и методика экспериментальных работ. Установка состоит из генератора импульсного тока (ГИТ, запасаемая энергия 200 кДж), ручного пресса и диагностической аппаратуры. Разработана методика получения брикетов и измерения осциллограмм тока и напряжения на образце, электрического сопротивления образца до и после пропускания тока, температуры образца после пропускания тока; максимальной нагрузки при разрыве образцов, оценки металлургической ценности брикетов, которая включает плавку во взвешенном в магнитном поле состоянии, либо вакуумно-дуговую плавку, химический анализ полученного металла.

В главе 4 описывается исследование возможности получения брикетов из стружки титановых сплавов, отходов различных металлов и сплавов (фотографии брикетов – рис. 2.),



Рис. 2.а. Фотография длинномерного брикета из стружки титанового сплава 3М. Размер брикета: диаметр 53 мм, высота 210 мм; плотность 1,1 г/см³ (пористость 75 %); масса 520 г

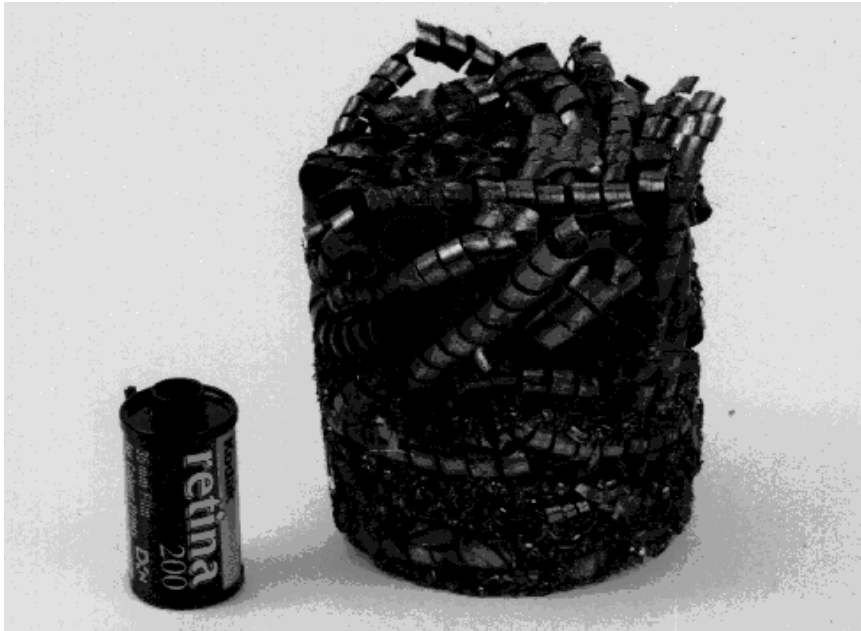


Рис. 2.б. Фотография брикета из деклассированной титановой стружки с выраженными цветами побежалости. Размер: диаметр 85 мм, высота 95 мм; плотность 0,7 г/см³ (пористость 85 %); масса 310 г

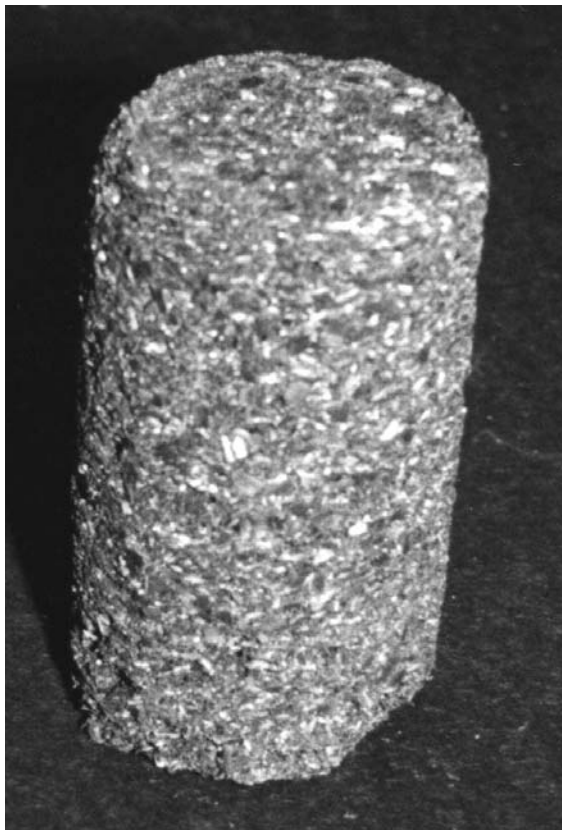


Рис. 2.в. Фотография брикета из чугуновой стружки. Размер: диаметр 53 мм, высота 90 мм; плотность 2,8 г/см³ (пористость 60 %); масса 500 г

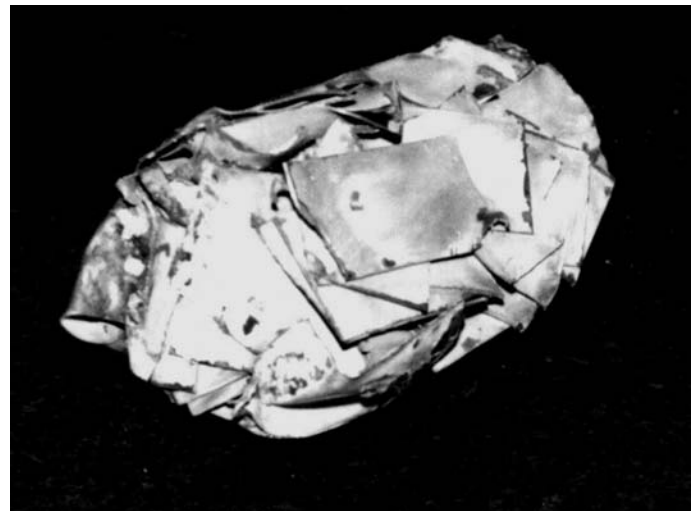


Рис. 2.г. Фотография брикета из стального измельченного лома электроосветительной арматуры, куски 1x20x30 мм. Размер: диаметр 53 мм, высота 100 мм; плотность 2,1 г/см³ (пористость 70 %); масса 465 г

влияние процесса брикетирования на качество получаемого металла и анализ возможности использования технологии в металлургии. Исследование харак-

теристик металла, выплавленного из брикетов, показало, что его качество соответствует предварительным расчетам. При увеличении доли брикетов в составе шихты на 1 % содержание кислорода в сплаве увеличилось на 0,008 %. При соблюдении технологии резания, брикетирования и переплава, загрязнение металла при использовании брикетов из стружки может быть ограничено до приемлемой величины.

В главе 5 описано экспериментальное исследование процесса формирования брикетов из отдельных металлических частиц, под воздействием коротких импульсов электрического тока.

Исследовались 4 группы образцов. Они отличались по плотности, до которой сжимался исходный материал. Первая группа «12» имела плотность $0,5 \text{ г/см}^3$ (12 % Ti, остальное воздух), которая близка к насыпной плотности стружки, следующие группы: «16» - $0,75 \text{ г/см}^3$ (16 % Ti), «18» - $0,8 \text{ г/см}^3$ (18 % Ti), «25» - $1,1 \text{ г/см}^3$ (25 % Ti). Величина пропускаемого через образец тока регулировалась путём изменения зарядного напряжения батареи U_0 .

Установлено что процесс брикетирования носит пороговый характер. При малом зарядном напряжении батареи (и соответственно при малом токе) формирования брикетов не происходит, при большем напряжении образуются брикеты с малой прочностью, при дальнейшем увеличении напряжения, прочность брикетов резко возрастает, при этом изменяется характер осциллограммы напряжения на образце (рис. 3), затем в широком диапазоне изменения величины пропускаемого тока прочность образцов растет медленно (Результаты измерения прочности Таблица 1.). Изменение характера осциллограмм указывает на то, что происходит переход от протекания тока по сплошной среде к протеканию значительной его части по отдельным каналам. При этом существенно возрастает индуктивность образца, рост индуктивности формирующихся каналов протекания тока лимитирует скорость процесса перераспределения тока.

Таким образом, формирование образцов из смеси отдельных металлических частиц и диэлектрика при пропускании по ним коротких импульсов

Таблица 1.

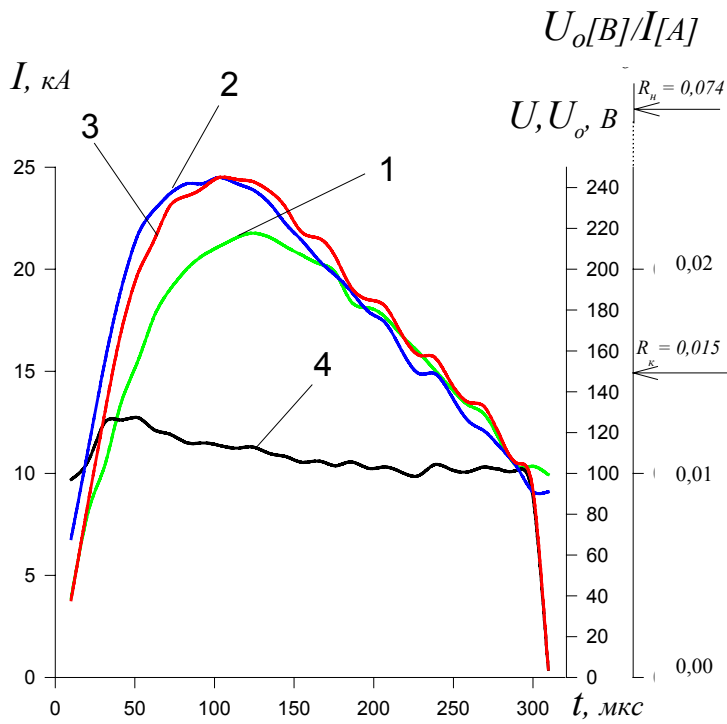
Результаты испытаний образцов на разрыв при статическом одноосевом нагружении.

U_0 , B	E , $кДж$	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	$кПа$		H	$кПа$		H	$кПа$		H	$кПа$
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_0 – 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)

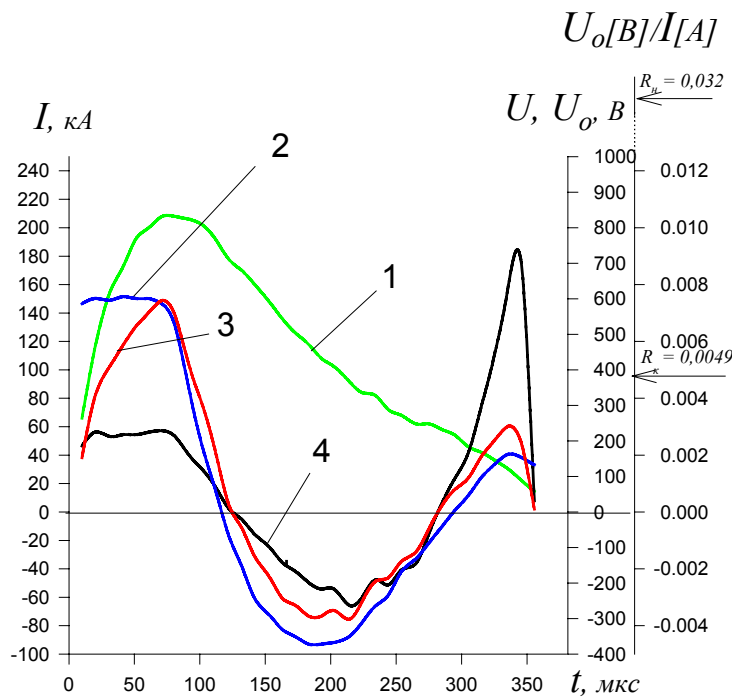


а)

Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на образце, результаты их обработки.

1 — Осциллограмма тока через образец I ,
 2 — Осциллограмма напряжения на образце U ,
 3 — Напряжение $U_o = U - L_{\text{внеш}} dI/dt$, которое отражает процессы происходящие внутри образца,
 4 — Величина U_o/I .

а) — плотность образца $0,5 \text{ г/см}^3$ («12»), Зарядное напряжение батареи $U_6 = 500 \text{ В}$. Прочность отсутствует, извлекаемая стружка рассыпается



б)

б. Тоже для плотности образца $0,5 \text{ г/см}^3$ («12») и зарядного напряжения батареи $U_6 = 2500 \text{ в}$. Сформирован прочный брикет, нагрузка при разрыве 31 кг

электрического тока большой плотности определяется процессами перераспределения тока по сечению образца.

В главе 6 описывается Опытно-промышленная установка для брикети-

рования БТ-80 (рис. 3.), промышленная технология брикетирования и испы-

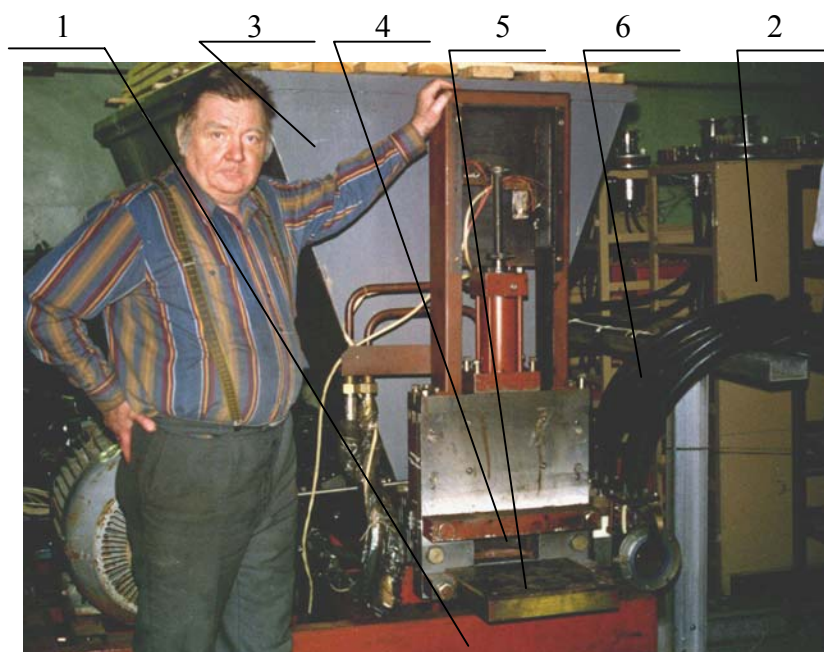


Рис. 3. Установка для брикетирования стружки титановых сплавов БТ-80. 1 - рама прессовального механизма, 2 - генератор импульсного электрического тока (ГИТ), 3 – бункер для стружки, 4 - правая прессовальная камера, 5 - приемный стол для готовых брикетов, 6 – коаксиальные кабели для подвода импульсного тока к камере

тания установки. Установка предназначена для отработки промышленной технологии брикетирования, оценки технико-экономических параметров процесса, может быть использована для организации опытного производства брикетов. При её проектировании предложена горизонтальная схема процесса брикетирования, которая позволяет сделать электроды неподвижными, жёстко закрепив их на торцах прессовальной камеры и, тем самым, открывает возможность создания удобного в эксплуатации малоиндуктивного токоподвода., такая схема позволяет уменьшить ход поршня пресса и одновременно увеличить электрическое сопротивление образца за счёт увеличения его длины (для более рационального использования энергии батареи).

Разработана технологическая документация для стадии опытного производства. В ходе испытаний получены пробные брикеты (рис. 4.).

В заключении сформулированы результаты работы и выводы.

1. Протекание короткого импульса тока большой плотности по смеси отдельных металлических частиц может приводить к формированию механически прочных образцов (брикетов). Это положение обосновано с помощью простой модели и подтверждено экспериментально. Длительность импульса тока, в зависимости от размеров контактов не более $10^{-2} - 10^{-3}$ с,

плотность тока в контактах достигает величины 10^6 A/cm^2 , а прочность брикетов 500 кПа .



Рис. 4. Фотография пробного брикета полученного на Опытно-промышленной установке БТ-80

2. Предложен и опробован новый метод брикетирования металлической стружки. Его отличие от существующих способов брикетирования в том, что прочность брикетов обеспечивается за счет импульсной электрической сварки контактов между частицами стружки. Показано что могут быть получены прочные брикеты различной плотности из ряда материалов: стружки титановых, алюминиевых, медных сплавов, сталей и чугуна, стального измельченного лома, металлокорда автомобильных шин и т.п.

3. Брикетирование, в том числе реакционных металлов (титановых сплавов), может осуществляться без защитной среды на атмосферном воздухе. Показано что при электрофизическом брикетировании не происходит значительного (более 200°) разогрева и окисления металла (металл пригоден для дальнейшего использования).

4. Удельные энергозатраты на брикетирование титановой стружки по предлагаемой технологии такие же или существенно меньше, чем в других разрабатываемых методах брикетирования такой стружки. Этот факт подтвержден расчётами и измерениями, выполненными в ходе экспериментальных работ.

5. Метод открывает возможность получения пористых брикетов. Пористость полученных брикетов лежит в диапазоне 90 – 60%.

6. Разработана, изготовлена и испытывается опытно-промышленная установка БТ-80 для брикетирования стружки титановых сплавов, получены пробные брикеты.

Объём диссертации 150 страниц, в т.ч. 26 рисунков, 4 таблицы.

Список литературы 101 наименование.

Приложение 1. Схемы и чертежи установки БТ-80, 6 л.

Приложение 2. Проект Технологического регламента на период испытаний и опытной эксплуатации установки БТ-80, 17 стр.

Приложение 3. Протокол предварительных испытаний установки БТ-80, 4 стр.

Тематика работы соответствует “Федеральной целевой научно-технической программе”, утвержденной Постановлением Правительства РФ № 1414 от 23 ноября 1996 г.; “Перечню критических технологий Федерального уровня”, утвержденному Председателем Правительственной комиссии по научно-технической политике В.С. Черномырдиным 01 июля 1996 г. (Раздел 2. “Производственные технологии”, п. 2.8. - “Технологии глубокой переработки горнорудного и техногенного сырья с использованием нетрадиционных методов” и раздел 7 - “Экология и рациональное природопользование”, п-7.5. - “Технология реабилитации окружающей среды от техногенных воздействий”); а также программам международного научно-технического сотрудничества.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях.

1. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д. Использование импульсного электрического тока большой плотности в качестве технологического инструмента. IX Симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов. 1992, Россия, с. 336, 337.

2. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Бочаров Ю.Н., Шнеерсон Г.А. Электрический ток большой плотности и сильные магнитные поля - технологический инструмент для металлургии легких сплавов. Научно-техническая конференция, посвященная 65-летию отечественной металлургии легких сплавов. Мо-

сква, 21 октября 1998г. Программа № 3-11 с. 8. Опубликовано: Технология лёгких сплавов 1999 № 1 – 2, с. 195 – 198.

3. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Филин Ю.А. Способ брикетирования металлической стружки, Патент РФ № 2063304 от 10 июня 1994., БИ № 19, 1996 г.

4. Оглоблин Б.Г, Дорф-Горский И.А., Ельчанинов А.А., Бочаров А.Ф., Иванов В.И., Абрамова К.Б, Самуйлов С.Д. Устройство для брикетирования титановой стружки патент № 2173236, от 19.12.95, БИ № 25, 10.09.2001.

5. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д. Электроимпульсное брикетирование титановой стружки. Научно-техническая конференция, посвященная 65-летию отечественной металлургии легких сплавов. Москва, 21 октября 1998г. Программа № 3-12 с. 8. Опубликовано: Технология лёгких сплавов 1999 № 1 – 2, с. 198 – 202.

6. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Филин Ю.А. Брикетирование титановой стружки под воздействием коротких импульсов электрического тока, *Цветные металлы*, 1998, № 12, с. 70 – 74.

7. Абрамова К.Б., Бочаров Ю.Н., Самуйлов С.Д., Щербаков И.П. Формирование брикетов из отдельных металлических частиц и диэлектрика, под воздействием коротких импульсов электрического тока большой плотности. ЖТФ, 2001, т. 71, в. 4, с 122 - 127.

8. Самуйлов С.Д., Абрамова К.Б. Один из способов использования отходов высокопрочных металлов. Международный конгресс «Инвестиционные проекты, строительство, экология», С.Петербург 17 - 19 апреля 1996 г. Программа работы круглого стола «Экологические проекты» стр. 2.

9. Abramova K.B., Samujlov S.D., Filin Yu.A. Technology of titanium shavings briquetting. The 9th World Conference of Titanium, 7-11 June 1999, Saint-Petersburg, Russia, Abstract booklet, S8-49. Опубликовано: “Titanium’99: Science and Technology” Proceeding of the Ninth World Conference on Titanium. Central Research Institute of Structural Materials (CRISM) “PROMETEY”. Saint-Petersburg, Russia, 11 June 1999. Edited by I.V. Gorynin, academician, professor,

S.S. Ushkov professor, CRISM "PROMETEY", Russia, 2000, V 3, p 1311 - 1320.

10. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Антипов В.В., Русаков Н.И., Бочаров Ю.Н. Технология и оборудование для брикетирования металлической стружки. Доклады Четвёртой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности.», 16-18 июня 1999 г. Санкт-Петербург, Россия, под ред. Н.И. Иванова, Санкт-Петербург 1999, т. 2, с. 57 – 64.

11. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Пухонто И.Я., Филин Ю.А., Антипов В.В., Зыкин Е.Г. Проект Технологического регламента 1612-00-0001ИЭ. 00-98 на период испытаний и опытной эксплуатации установки БТ-80. –СПб.: ЦКБ Машиностроения 1998, 17 с.

12. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Пухонто И.Я., Филин Ю.А., Антипов В.В., Зыкин Е.Г. ТУ 1612-00-0001ИЭ. 02-98, ВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ на технологические помещения для размещения Опытного производства брикетов на установке БТ-80. –СПб.: ЦКБ Машиностроения, 1998, 6 с.

13. Самуйлов С.Д., Пухонто И.Я., Филин Ю.А. ТУ 1612-00-0001ИЭ. 03-98, ВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ на стружку металлическую титановую для брикетирования по МГД технологии на установке БТ-80. –СПб.: ЦКБ Машиностроения, 1998, 8 с.

14. Самуйлов С.Д., Пухонто И.Я., Филин Ю.А. ТУ 1612-00-0001ИЭ. 04-98, ВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ на брикеты из титановой стружки, изготовленные по МГД технологии на установке БТ-80, для использования в составе шихты в металлургическом производстве. –СПб.: ЦКБ Машиностроения, 1998, 9 с.

15. Абрамова К.Б., Самуйлов С.Д., Пухонто И.Я., Филин Ю.А., Антипов В.В., Зыкин Е.Г. Инструкция 1612-00-0001ИЭ.05-98, Опытная установка для брикетирования металлической (титановой) стружки БТ-80. ОПИСАНИЕ И ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ, (на период испытаний и опытной эксплуатации).–СПб.: ЦКБ Машиностроения, 1998, 9 с.