

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

---

УДК 669.021:621.762

И.М. Мальцев, В.А. Скуднов

### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕТАЛЛУРГИИ ОБРАБОТКИ ТОКОМ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Определено влияние параметров технологии, электрофизических свойств на характеристики, параметры и результаты электрофизических технологий, основанных на обработке металлических материалов током высокой плотности  $10^8$ - $10^9$  А/м<sup>2</sup>.

Ключевые слова: металлургия, электрофизические технологии, ток высокой плотности

#### Введение

В настоящее время широкое распространение получают технологии машиностроения и металлургии, основанные на обработке проводящих металлических материалов током высокой плотности  $10^8$ - $10^9$  А/м<sup>2</sup> при деформировании, нагреве и формовании [1, 2].

К таким видам технологий принадлежат: скоростная электротермическая обработка (ЭО) сталей и сплавов; электропластическая деформация металлов и сплавов; электроспекание при формовании металлических порошковых и композиционных материалов.

Физические основы технологий состоят в воздействии тока высокой плотности ( $10^8$ - $10^9$ ) А/м<sup>2</sup> «электронного ветра» на дефекты кристаллической решетки при нагреве и деформации материалов и использовании следующих эффектов: Джоуля – Ленца, пинч-эффекта, электрокристаллизации, электропластического и др. при электрофизической обработке, повышающих свойства проводящих материалов.

Процессы ЭО различаются по видам электрофизических эффектов, реализуемым в каждом способе, но общими для них являются эффекты измельчения структуры, связанные с высокими скоростями нагрева (перегревом) и электрокристаллизацией, скин- и пинч-эффекты, действие «электронного ветра» в кристаллической решетке металла или сплава (электропластический эффект), дислокационные эффекты, воздействие электромагнитного поля на зерна и субструктуру металла, эффект Томпсона – Пельтье, магнитострикционный и магниторезистивный эффекты, эффекты Джоуля – Ленца и Герберта [3].

Особенностью процессов ЭО является то, что сам проводящий материал определяет параметры технологии и результаты такой обработки.

*Целью настоящей работы* является определение влияния параметров технологии, электрофизических свойств на характеристики, параметры и результаты электрофизических технологий, основанных на обработке металлических материалов током высокой плотности  $10^8$ - $10^9$  А/м<sup>2</sup>.

## Решение задачи

В начале были исследованы свойства компактных металлических металлов технической чистоты (меди, алюминия и титана) после электропластического деформирования прокаткой [4-5]. Было установлено, что с увеличением степени деформации происходит приращение пластичности и предельной удельной энергии деформации металлов за счет действия «электронного ветра» в условиях, когда температура процесса электропрокатки ниже  $0,1 T_{пл}$  (ниже температуры начала электрокристаллизации). Временное сопротивление при растяжении при этом также увеличивается, а твердость металлов снижается.

Для оценки влияния электрофизических свойств на процесс и результат ЭО применили показатель Джоулевой составляющей электрического тока  $F$ :

$$F = \frac{\rho}{C_m G}, \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $C_m$ ,  $G$  - удельные электрическое сопротивление, теплоемкость и плотность металлов. Показатель  $F$  отражает способность металла-проводника к нагреву при прохождении электрического тока.

Оказалось (табл. 1), что с его увеличением происходит приращение пластичности металла ( $\Delta\delta$ ), определяемой по относительному показателю

$$\Delta\delta = \frac{\delta_y - \delta_x}{\delta_y}, \quad (2)$$

где  $\delta_y$  и  $\delta_x$  – относительное удлинение электро- и холоднодеформированных металлов [4, 5].

Таблица 1

**Значения показателя Джоулевой составляющей тока  $F$  и  $\Delta\delta$  меди, алюминия и титана и коэффициент корреляции между ними**

Металл	$F$ , Ом м <sup>3</sup> град/Н	$\Delta\delta$ , %	Коэффициент корреляции
Медь М1	$0,0408 \cdot 10^{-14}$	0	0,712482
Алюминий А6	$0,108 \cdot 10^{-14}$	60	
Титан ВТ1-0	$2,240 \cdot 10^{-14}$	80	

Использование электропластического эффекта при деформации металлов позволяет в разы снизить температуру деформирования, повысить пластичность металла.

Затем исследовалось влияние электрофизических свойств порошковых композиционных металлических материалов с диэлектрическим наполнителем на стационарность процесса формования прокаткой и механические свойства на примере нихромо - стеклянных композиций [6, 7] (табл. 2).

Таблица 2

**Влияние содержания диэлектрической фазы на физико-механические свойства нихромо-стеклянной композиции**

Состав или марка порошка	Толщина ленты, мм ± 3,5%	Плотность, кг/м <sup>3</sup> ±2,5%	Временное сопротивление при растяжении, МПа ±5,6%	Удельное электро-сопротивление, Ом * мм <sup>2</sup> /м	$F$ , Ом м <sup>3</sup> град Н
Стекло 10% + X20H80-2M 90%	<u>0,68</u> 0,63	<u>4200</u> 5380	<u>менее 1</u> 3,8	<u>596</u> 26	$1,46 \cdot 10^{-6}$
стекло 15% + X20H80-2M 85%	<u>0,61</u> 0,60	<u>4290</u> 4370	<u>менее 1</u> 22,0	<u>1000</u> 52	$7,76 \cdot 10^{-6}$
стекло 20% + X20H80-2M 80%	<u>0,60</u> 0,65	<u>3420</u> 4080	<u>менее 1</u> 8,0	<u>1000</u> 16	$4,51 \cdot 10^{-6}$

*Примечание.* В числителе – прокатка, в знаменателе – электроспекание порошка при прокатке.

Используя относительные показатели, аналогичные формуле (2), для плотности, твердости, удельного электрического сопротивления и временного сопротивления при растяжении определяли связь показателя Джоулевой составляющей электрического тока с содержанием диэлектрической неформующейся фазой [6-7]. Коэффициент корреляции равен 0,9602. Оказалось, что увеличение значения показателя  $F$  приводит к повышению твердости и временному сопротивлению при растяжении (табл. 2), в условиях, когда повышается доля неформующейся фазы. Для порошковых композиционных материалов можно создавать такую рецептуру материала, где регулируя значения  $F$ , можно достигать высоких показателей свойств материалов при электровоздействии на очаг формования порошка. Так, используя результаты исследований, разработали технологию и получили уплотнительный ленточный порошковый материал триботехнического назначения для авиационной техники [8].

Практика электроспекания порошков [9] показывает, что параметрами процесса ЭО являются напряжение и сила тока. Напряжение на валках-электродах определяется диэлектрическими свойствами порошковой системы [10-11].

Таблица 3

**Влияние разности потенциалов на физико-механические свойства ленты X18H10T и процесс электроимпульсного спекания**

Напряжение, В		Сила тока в первичной обмотке трансформатора, А	Свойства ленты			Процесс
На выходе трансформатора	На валках-электродах		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа	Удельное электрическое сопротивление, Ом м 10 <sup>-6</sup>	
Без тока			6310	4,2	63,0	Стационарный
3,15	0,5	40	6350	11	9,4	
7,8	1,5	90	6400	17	5,6	
20	6,2	100	Процесс прокатки и электроспекания вырожден – локальное проплавление			

В работах [12-13] было получено уравнение, которое позволяет рассчитывать напряжение на валках электродах по диэлектрическим свойствам порошковой системы:

$$V_m = [V_{\text{mim}} (2R (1 - \cos a_p + h_1))] / [\sum(P_i / r_i) / 100], \quad (3)$$

где  $V_m$  – разность потенциалов на валках-электродах, В;  $V_{\text{mim}}$  – напряжение разряда между соседними частицами, В;  $R$  – радиус валков-электродов, м;  $a_p$  – угол захвата порошка при прокатке, рад;  $h_1$  – величина зазора между валками-электродами, м;  $P_i$  – процентное содержание  $i$ -й фракции порошка;  $r_i$  – средний размер частиц  $i$ -й фракции порошка. Напряжение разряда между соседними частицами рассчитывается по экспериментальной методике определения электрической прочности порошка, находящегося без уплотнения [12].

Выражение (3) подтверждено экспериментально. В табл. 3 показаны результаты эксперимента [13].

Экспериментальные результаты табл. 3 показывают, что превышение напряжения  $V_m$  (3) приводит к вырождению процесса прокатки и электроспекания из-за образования локального проплавления – электрического пробоя порошковой ленты.

Сила электрического тока при электропрокатке и электроспекании определяет процессы на межчастичных контактах, при ЭО порошковых материалов создаются межчастичные контакты, свойственные только этим видам технологии [14]. Очаг формования порошка при электроспекании при прокатке имеет сложное строение [15]. Существуют две области между валками-электродами, где порошок находится в уплотненном состоянии (с плотностью, равной плотности сформованной ленты – сечение  $h_1$ ) и в свободно насыпанном состоянии – сечение  $a_{\text{пр}}$ . Образуются две зоны, имеющие разную электрическую проводимость. Эта раз-

ность определяет перепад температур между двумя зонами электроспекания при прокатке. Данная разность температур позволяет определить механизм электроспекания [16] – твердо- или жидкофазный, по которому происходит образование материала при электроспекании при прокатке. В [16] получено выражение для расчета разности температур ( $T_{hl-анп}$ ), которое подтверждено экспериментально:

$$T_{hl-анп} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} K^{-1} = \frac{R_1}{R_2} K^{-1} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} Q, \quad (4)$$

где  $\sigma_1, R_1$  и  $\sigma_2, R_2$  – удельные электропроводность, электросопротивление в сечениях  $h_1$  и  $a_{пр}$  (угла захвата порошка) соответственно,  $K$  – коэффициент обжатия;  $Q$  – относительная плотность ленты.

Анализ уравнения (4) показывает, что с ростом относительной плотности, уменьшением коэффициента обжатия, степени падения электросопротивления в порошковом проводящим ток столбе увеличивается перепад температур в очаге деформации при прокатке с током.

Результаты исследования были применены при электропрокатке порошка Нибон-20, а методом электроспекания при прессовании был получен особо плотный материал из этого порошка [17].

Обширную область исследований процессов ЭО составляет электротермическая обработка металлов и сплавов. Здесь основным эффектом, используемым при электротермической обработке, является эффект Джоуля – Ленца. Практический и теоретический интерес представляет использование при ЭО скин- и пинч-эффектов [18], проведение обработки с высокими скоростями нагрева (до 200 К/с) [19].

Высокие скорости нагрева, применение токов высокой плотности при электротермической обработке позволяют получать за короткое технологическое время металлические материалы с дисперсной субструктурой, проводить технологические операции закалки и отпуска [20-21]. Основным эффектом измельчения структуры является эффект электрокристаллизации, проявляющийся в расщеплении границ зерен ферромагнетиков при нагреве в сильных электромагнитных полях.

При электротермической обработке сталей электрофизические свойства материалов определяют результат технологии. Исследования [22-24] показали, что стабильность свойств, в частности твердости, определяется относительной магнитной проницаемостью. В табл. 4 показаны результаты электротермической обработки сталей 25, 50ХФА и 65Г, полученные в работах [20,22].

Таблица 4

**Коэффициент корреляции относительной ошибки эксперимента твердости в зависимости от содержания углерода, коэрцитивной силы и относительной магнитной проницаемости**

Твердость и относительная ошибка эксперимента			Содержание углерода в стали, % (массовое)	Коэрцитивная сила, Э	Относительная магнитная проницаемость	
Время электрообработки сталей до температуры закалки стали					справочные данные	для тока $10^8-10^9$ А/м <sup>2</sup>
3 с	4 с	5 с		3 с	3 с	3 с
31(4,92)	48(13,68)	47(2,12)	0,25 (сталь 25)	30	100	3000
59(4,01)	61(1,54)	70(1,74)	0,5 (сталь 50ХФА)	34	98	2870
42(1,79)	64(0,49)	64(0,36)	0,65 (сталь 65Г)	42	95	2750
Коэффициент корреляции						
-0,926	-0,953	-0,896		-0,972	0,899	0,966

Известно, что изменение (возрастание или уменьшение) относительной ошибки эксперимента указывает на действие стороннего фактора. В первых двух случаях (табл. 4) коэффициент корреляции отрицательный, то есть на изменение относительной ошибки не дейст-

вует карбидная фаза и факторы намагничивания образцов (эффект Герберта), так как измерение твердости провели после СЭТО и без охлаждения в магнитном поле. В случае относительной магнитной проницаемости коэффициент корреляции положителен и приближается к единице. Вычислили коэффициент Джоулевой составляющей электрического тока  $F$  для сталей 25, 50ХФА, 65 Г. Получили значения  $0,287 \cdot 10^{-14}$ ,  $0,610 \cdot 10^{-14}$ ,  $0,775 \cdot 10^{-14}$  (Ом · м<sup>3</sup> · град/Н) соответственно. Определили его корреляцию с изменением относительной ошибки эксперимента (табл. 4) для сталей 25, 50ХФА, 65Г. Коэффициент корреляции равен  $-0,97769$ . Установили, что коэффициент  $F$  влияет на стабильность значений твердости при СЭТО. Все это указывает на то, что электрическое поле при электротермической обработке оказывает влияние на поведение твердости после закалки. Единственным сейчас известным эффектом влияния электрического поля на нагретый ферромагнетик является эффект электрокристаллизации. Очевидно, что в настоящем эксперименте наблюдается его проявление. Это также подтверждается тем, что уменьшается размер блоков субструктуры сталей, в сравнении с печной закалкой [24]. Изменение относительной ошибки эксперимента связано с разбросом значений твердости или стабильностью значений твердости. Изменением относительной магнитной проницаемостью сталей (химическим составом) возможно управлять стабильностью твердости. Так, в инструментальных сталях, содержащих большую долю карбидной фазы, стабильность твердости высокая, в сравнении с нелегированными сталями [23].

### Вывод

Таблица 5

#### Связь электрофизических свойств металлических материалов с процессами и результатами обработки током высокой плотности

Характеристики материала или электрофизической технологии после обработки электрическим током	Показатель материала или электрофизической технологии	Вид электрофизической технологии
Пластичность, прочность (приращение временного сопротивления при растяжении и относительного удлинения), предельная удельная энергия деформации металлов	Показатель Джоулевой составляющей электрического тока (удельное электросопротивление, теплоемкость и плотность), магнитная восприимчивость	Электропластическая деформация компактных металлов
Механизм электроспекания порошков (твёрдо- или жидкофазный)	Электропроводность порошковых материалов	Электропрокатка металлических порошков в валках-электродах
Стационарность процесса формирования порошка с током	Диэлектрическая проницаемость порошковой системы	
Прочность, твердость, содержание не формирующейся фазы в порошковых композиционных материалах	Показатель Джоулевой составляющей электрического тока (удельное электросопротивление, теплоемкость и плотность)	Электропрокатка и электроспекание металлических порошковых композиционных материалов
Стабильность значений твердости и временного сопротивления при растяжении	Относительная магнитная проницаемость, коэрцитивная сила. Показатель Джоулевой составляющей электрического тока (удельное электросопротивление, теплоемкость и плотность)	Электротермическая обработка сталей

Теоретическое и экспериментальное исследование влияния тока высокой плотности, электрофизических параметров электрофизических технологий показало, что электрофизические параметры материала определяют структуру и свойства металлических материалов

разных классов и механизмы реализации электрофизических способов. Результаты настоящего исследования обобщены в табл. 5.

Используя результаты работ [1-25], разработаны электрофизические технологии и установлены закономерности изменения структуры и свойств металлических материалов разных классов при воздействии температуры, давления, электромагнитного поля и тока высокой плотности:

1. Основные параметры технологии получения электропрокаткой металлических порошковых и композиционных материалов для изготовления сварочных, резистивных и уплотнительных лент современных машин и аппаратов, позволяющих осуществлять процессы формования прокаткой высокотекучих, неформующихся металлических порошков, а также проводить прокатку материалов с высокой долей наполнителей до 80%<sub>об</sub>.

2. Основные параметры скоростной электротермической обработки током высокой плотности компактных сталей разных классов, алюминиевых и титановых сплавов. Время аустенизации при скоростной электротермической обработке сталей может составлять всего 3–5 с. Стабильность свойств (твердости) в технологии термической обработки, включающей обработку током высокой плотности, связана с электрофизическими эффектами в металлическом материале. Увеличение содержания углерода, карбидной фазы в сталях увеличивает стабильность свойств (твердости) сталей. Применение электрического тока высокой плотности при термической обработке сталей вызывает появление в изделии напряжений сжатия, препятствующих распространению трещин.

3. Установлено, что изменение прочностных и пластических свойств металлических материалов разных классов зависит от величины показателя Джоулевой составляющей электрического тока, его увеличение вызывает рост временного сопротивления при растяжении, относительного удлинения и величины предельной удельной энергии деформации. Показатель Джоулевой составляющей электрического тока является критерием при выборе эффективных режимов электрофизической технологии, химического состава обрабатываемых материалов.

4. Получены основные уравнения расчета процесса электропрокатки металлических порошковых и композиционных материалов, позволяющие осуществлять процесс в стационарном режиме без проявления макродефектов материалов, а также определять механизм электропрокатки металлического порошка жидко- или твердофазный.

5. Установлено, что при протекании тока высокой плотности через металлический материал, на его структуру и свойства оказывает влияние пинч- эффект, который определяет макростроение ферромагнитных порошковых и композиционных материалов при электропрокатке, а его применение в технологии вызывает благоприятное воздействие на повышение плотности формуемых прокатанных металлических порошковых и композиционных материалов и определяет их макростроение.

6. Установлено, что протекание тока высокой плотности через межчастичные контакты в порошковых металлических материалах при формовании электропрокаткой создает специфичные контактные участки, отличающиеся по электропроводности от контактов, созданных прокаткой порошков без тока. Возникновение этих контактов ускоряет диффузионные процессы сплавообразования в порошковых ленточных материалах.

7. Установлено, что в диамагнитных материалах (алюминиевых сплавах) стабильность свойств (твердости) после электротермической обработки током высокой плотности определяется процессами старения сплава, и что эта стабильность возрастает со временем, достигая значений твердости исходного материала.

8. Разработаны основные элементы установок технологии электрофизических процессов электротермической обработки сталей разных классов, алюминиевых и титановых сплавов, электропрокатки порошковых и композиционных материалов для изготовления и обработки листовых, проволочных и ленточных изделий.

## Библиографический список

1. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю.В. Баранов [и др.]. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
2. Электрофизические процессы металлургии: учеб. пособие / И.М. Мальцев; Нижегород. гос. техн. ун-т. Нижний Новгород, 2003. – 59 с.
3. **Мальцев, И.М.** Эффекты в металлических материалах во время электрофизической обработки // *Материаловедение и металлургия: межвуз. сб. ст.* / НГТУ. – Н. Новгород, 2005. Т. 50. С. 148-151.
4. **Мальцев, И. М.** Механические свойства металлов после электроимпульсной прокатки // *Вопросы материаловедения.* 2005. № 4(44). С. 5–11.
5. **Мальцев, И. М.** Изменение свойств металлов технической чистоты после электроимпульсного деформирования при прокатке // *Материаловедение.* 2000. № 5. С. 45–49.
6. **Мальцев, И.М.** Влияние содержания диэлектрической фазы на свойства порошковых материалов электроспеченных при прокатке // *Материаловедение.* 2001. № 9. С 39–43.
7. **Мальцев, И.М.** Электропрокатка порошковых материалов с диэлектрической фазой // *Порошковая металлургия.* 2003. № 5/6. С. 10–15.
8. **Мальцев, И.М.** Электроимпульсноспеченный при прокатке порошковой композиции антифрикционный уплотнительный материал // *Материаловедение.* 2005. № 6. С. 53–55
9. **Райченко, А.И.** Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А.И. Райченко. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.
10. А. с. 1748943 СССР МКИЗ В 22 F 3/14. Способ электроимпульсного спекания металлического порошка и установка для его осуществления / В.Г. Петриков, И.М. Мальцев, Л.А. Пырялов. № 142263 – 76; заявл.28.02.90; опубл. 23.7.92. Бюл. № 27.
11. **Мальцев, И. М.** Установка для электроимпульсного спекания порошка при прокатке / И.М. Мальцев, В.Г. Петриков // *Порошковая металлургия* 1993. № 3. С. 113–116.
12. **Мальцев, И.М.** Влияние электрического напряжения на валках-электродах на процесс электропрокатки металлических порошков // *Материаловедение и металлургия: сб. научн. тр.* / НГТУ. – Н. Новгород, 2004. Т. 42. С. 251–256.
13. **Мальцев, И.М.** Электропрокатка металлического порошка в валках-электродах // *Порошковая металлургия.* 2005. № 5/6. С. 21–27.
14. **Мальцев, И.М.** Влияние изотермического отжига на свойства порошкового проката сплавов системы Fe - Cr - Ni. / И.М. Мальцев, В.Г. Петриков // *Порошковая металлургия.* 1994. № 1. С. 79–84.
15. **Мальцев, И.М.** Электроимпульсный нагрев порошка в очаге деформации при прокатке/ И.М. Мальцев, В.Г. Петриков // *Порошковая металлургия.* 1993. № 6. С. 38–41.
16. **Мальцев, И.М.** Моделирование температурного поля в контакте двух металлических частиц при прокатке с электрокондуктивным нагревом // *Порошковая металлургия.* 2000. № 5/6. С. 5–17.
17. **Мальцев, И.М.** Установка электроимпульсного спекания порошка под давлением / И.М. Мальцев, В.А. Баранов // *Порошковая металлургия.* 2000. № 1/2. С. 125–128.
18. **Мальцев, И.М.** Исследование скоростной электротермической обработки металлов током высокой плотности // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2005. № 11. Т. 71. С. 35–38.
19. **Мальцев, И.М.** Изменение стабильности и свойств алюминиевых сплавов после скоростной электротермической обработки током высокой плотности // *Материаловедение,* 2004. №9. С. 34–36.
20. **Мальцев, И. М.** Изменение стабильности свойств доэвтектоидных конструкционных сталей скоростной электротермической обработкой // *Материаловедение.* 2003. №2. С. 49–52.
21. **Мальцев, И.М.** Нагрев импульсными токами пружинной стали / И.М. Мальцев, Л.А. Ошурина, Н.В. Суворов // *Вопросы материаловедения.* 2004. № 1 (37). С. 18–23.
22. **Мальцев, И.М.** Скоростная электротермическая обработка током высокой плотности доэвтектоидных конструкционных сталей // *Вопросы материаловедения.* 2004. № 4 (40). С. 24-31.
23. **Мальцев, И.М.** Обработка инструментальных сталей токами высокой плотности при нагреве под термическую обработку / И.М. Мальцев [и др.] // *Вопросы материаловедения,* 2006. № 3 (47). С. 6–15.

24. **Мальцев, И. М.** Скоростная электрозакалка стали 30ХГСА / И.М. Мальцев, С.В. Кондратьев, Л. А. Ошурина // Технология металлов. 2007. № 3. С. 9–13.
25. **Мальцев, И.М.** Влияние электромагнитного поля скин- и пинч-эффектов при электропрокатке с импульсными токами высокой плотности порошковых металлических материалов // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. № 3. С. 5–9.
26. **Мальцев, И.М.** Электропрокатка металлического порошка в валках-электродах с током высокой плотности // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2009. № 4. – С. 15–19.

*Дата поступления  
в редакцию 21.01.2010*

**I.M. Malsev, V.A. Skudnov**

### **ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES BASED ON TREATMENT OF METAL MATERIALS BY CURRENT OF HIGH DENSITY**

Influence of technology parameters, electrophysical features has been defined on characteristics, parameters and results of electrophysical technologies based on treatment of metal materials by current of high density  $10^8$ - $10^9$  A/m<sup>2</sup>.

*Key words:* electrophysical features, treatment of metal materials, current of high density