

УДК 669.021:621.762

И. М. Мальцев

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ПОРОШКОВОГО ЭЛЕКТРОПРОКАТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предмет и метод: Рассмотрены свойства порошковых лент из порошков разных классов, полученных электропрокаткой с воздействием тока высокой плотности 10^8 - 10^9 А/м² на очаг формования.

Цель работы: Целью настоящего исследования является изучение свойств порошкового электропроката двух классов: порошковой системы Fe-Cr-Ni и композиций с порошками наполнителями – графитом, нитрида бора и стекла.

Результаты и области применения: Применение электропрокатки порошковых металлических и композиционных материалов создает более совершенные межчастичные контакты, чем при формовании прокаткой без электрического тока. Электромагнитное поле, электрический ток при электропрокатке ленточных порошковых материалов повышают временное сопротивление при растяжении (в 2 – 10 раз), твердость и снижают удельное электрическое сопротивление порошковых лент (в десятки раз) в сравнении с методами холодной прокатки.

Выводы: Повышение свойств порошковых прокатанных лент зависит от химического состава материала, его электрофизических свойств.

Ключевые слова: порошковые ленты, ток высокой плотности.

Введение

Методом прокатки и последующего спекания получают материалы разного химического состава и назначения. Прокаткой получают конструкционные, высокопористые листовые материалы, уплотнительные, сварочные, электротехнические и резистивные материалы. Выпуск этих материалов осуществляется в цехе пористого проката Выксунского металлургического завода [1]. При прокатке используют порошки чистых металлов, сплавов, механические смеси порошков и разнообразные наполнители, к которым относят порошки графита, нитрида бора, стекла и др. Основными трудностями формования прокаткой порошка являются: низкая формуемость неметаллических частиц, вырождение процесса прокатки из-за высокой текучести порошков, неравномерность плотности проката по ширине полосы. Эти проблемы решены в способе прокатки, где на очаг формования накладывается электромагнитное поле и между валками через порошок пропускается ток высокой плотности, обеспечивающий микросварку порошковых частиц, электропластический и пинч – эффекты. [2-5]. При электропрокатке используются порошки и композиции, которые формуют методом холодного формования прокаткой.

Целью настоящего исследования является изучение свойств порошкового электропроката двух классов: порошковой системы Fe-Cr-Ni и композиций с порошками наполнителями – графитом, нитрида бора и стекла. Первый класс порошковых материалов применяется как основа материала сварочных лент, второй – как триботехнический материал. Кроме того, они значительно различаются по электрофизическим свойствам (удельному электрическому сопротивлению), а это имеет важное значение в электрофизических технологиях.

Решение задачи

Изучению механизма консолидации частиц при электроспекании посвящено много работ, в частности [6–8]. Преимущественно рассматриваются условия неизотермического нагрева при постоянном или ступенчато возрастающем давлении в основном в процессе прессования порошков [9]. В варианте процесса электропрокатки не определено влияние температуры нагрева порошковой системы Fe-Cr-Ni на механизм консолидации частиц и свойства получаемого материала.

В данном исследовании изучено влияние температуры изотермического отжига на прочность и удельное электросопротивление сплавов, изготовленных электропрокаткой импульсным током высокой плотности (ЭИС). Выполнено сравнение свойств проката, полученного формованием порошковых смесей без тока и изготовленного электроимпульсным спеканием с последующим изотермическим нагревом. При изготовлении ЭИС лент из механических смесей порошковой системы Fe-Cr-Ni использовали режимы электрического тока, которые не приводили к значительным диффузионным изменениям в ЭИС прокате процессом спекания и рентгенографически не обнаруживались.

Пропорции компонентов в железохромоникелевых смесях (табл. 1) выбирали по структурной диаграмме литых хромоникелевых сталей [10], использованы также изотермические сечения тройной диаграммы Fe-Cr-Ni (рис. 1) [10].

Таблица 1

Содержание компонентов в порошковых смесях и аналог их фазового состава в литом состоянии

Марка	Содержание компонентов, %			Соотношение фазовых составляющих, %	
	Fe	Ni	Cr	Аустенит	Феррит
X18H9	73	9	18	100	-
X30H18	52	18	30	80	20
H30	70	30	-	100	-
X30	70	-	30	-	100

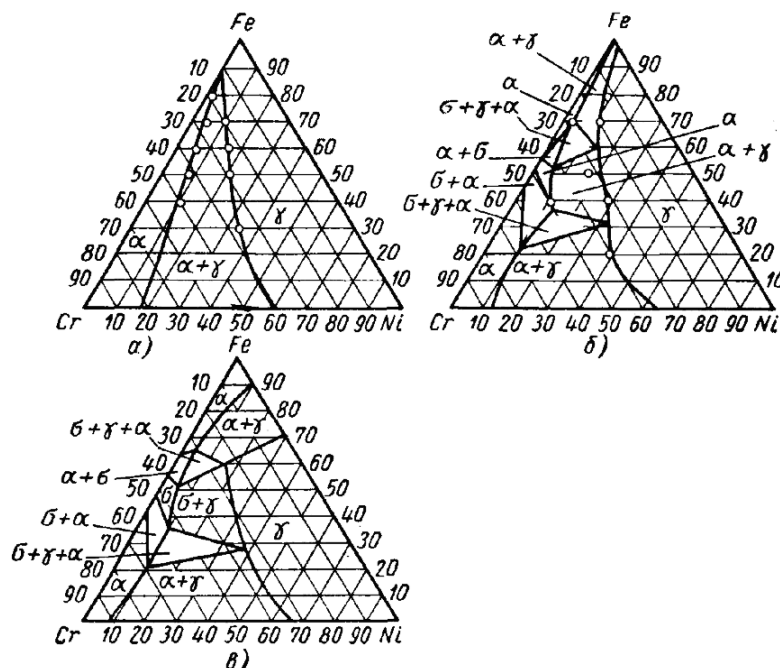


Рис. 1. Изотермические разрезы диаграммы состояния системы железо-хром-никель:
 а – при 1100 °С; б – при 800 °С; в – при 400 °С

Смеси готовили из порошков железа, никеля и хрома фракции 005 (ГОСТ 3584 – 73), используя механическое смешение в смесителе в течение четырех часов. Смеси прокатывали на лабораторной установке электроимпульсного спекания порошка при прокатке с ЭИС и без тока. Скорость вращения валков - электродов диаметром 0,1 м была равна 0,31 рад/с, эффективная плотность тока – 10^8 А/м², длительность импульсов – 0,02 с, скважность – 0,5 [2-5], напряжение на валках-электродах – 1,5 В. Ток пропускали от валка к валку. Форма

импульса - синусоидальная кратная 2π , исключая намагничивание и действие эффекта Томпсона-Пельтье. Температура лент, вышедших из валков, определена контактным методом с помощью стандартного прибора вольтамперметра В7-27-А1, который обеспечивает измерение температуры в диапазоне от -30 до $+100^\circ\text{C}$ с погрешностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Стандартным термодатчиком служит бескорпусный транзистор 2Т331Б-1 ХМО 3360003ТУ. Температура лент через 20 с после их выхода из валков не превышала 380 К. Низкая температура электроспекания исключает появление жидкой фазы на межчастичных контактах. Тот же режим прокатки, но без тока, использовали для изготовления лент, полученных холодной прокаткой.

Предел прочности лент при растяжении определяли по стандартной методике (ГОСТ 1497–84), удельное электросопротивление – по методу двойного моста Томсона. Измерения проводили вдоль длины лент в направлении прокатки и поперек направления импульсов тока, которые проходили по толщине лент проката. Была определена также плотность порошковых лент, полученных с ЭИС и без тока (ГОСТ 18893 – 73), проведены рентгено - и металлографические исследования.

ЭИС - ленты имели в три – четыре раза большую прочность, чем обычные (табл. 2, рис. 2). Наибольшую прочность при растяжении (12 МПа) после спекания получили ленты состава Х18Н9. Выбранный режим ЭИС приводил к значительному снижению удельного электрического сопротивления, плотность оставалась на уровне обычного проката.

Таблица 2

Свойства железохромоникелевого проката

Марка	Условия получения	Толщина ленты, мм	Плотность, г/см ³	Удельное электросопротивление, 10^{-6} Ом · м
Х18Н9	Прокатка	$0,42 \pm 0,30$	$6,2 \pm 0,10$	1000,00
	ЭИС	$0,42 \pm 0,30$	$6,3 \pm 0,10$	1,00
Х30Н18	Прокатка	$0,54 \pm 0,02$	$5,9 \pm 0,10$	82,50
	ЭИС	$0,55 \pm 0,02$	$6,1 \pm 0,15$	3,77
Н30	Прокатка	$0,54 \pm 0,03$	$5,9 \pm 0,12$	90,80
	ЭИС	$0,55 \pm 0,03$	$6,0 \pm 0,09$	4,00
Х30	Прокатка	$0,62 \pm 0,03$	$5,4 \pm 0,10$	1000,00
	ЭИС	$0,61 \pm 0,03$	$5,5 \pm 0,10$	8,00

Полученные ЭИС и без тока способами прокатанные порошковые ленты подвергали изотермическому отжигу в вакууме ($1,33 \cdot 10^{-3}$ – $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па) при температурах 970, 1120, 1270 и 1420 К в течение одного часа. С повышением температуры отжига предел прочности при растяжении лент повышается (рис. 2), что объясняется происходящими в прокате процессами спекания.

Предел прочности при растяжении и удельное электросопротивление ЭИС - материалов разных составов и при разных температурах могут быть как выше, так и ниже, чем у обычных лент (рис. 2, рис. 3), что объясняется процессами гетеродиффузии, проходящими на межчастичных контактах при отжиге лент и изменением свойств самих контактов.

На примере двойных порошковых сплавов видно (рис. 2, в, г), что при увеличении температуры отжига значение удельного электрического сопротивления (ρ) ЭИС материалов монотонно увеличивается тогда, как для лент, полученных без тока, характерно его монотонное снижение и рост только при температурах выше (1270 К (Fe - Ni) и 1420 К (Fe - Cr)). Это связано с тем, что межчастичные контакты, созданные механическим давлением без тока, совершенствуются процессами спекания, а по мере развития диффузионных процессов, образуется сплав, у которого удельное электрическое сопротивление выше, чем у чистых металлов. Процессы на ранних стадиях электроспекания при прессовании металлических порошков рассмотрены в [6-7]. Процессы диффузии в порошковой системе Fe-Cr-Ni в [8]. Результаты насто-

ящего исследования совпадают с данными, полученными в работах [6-8]. Процесс ЭИС порошковой ленты перед печным отжигом создает условия для ускорения диффузионных процессов за счет образования более совершенных межчастичных контактов [9].

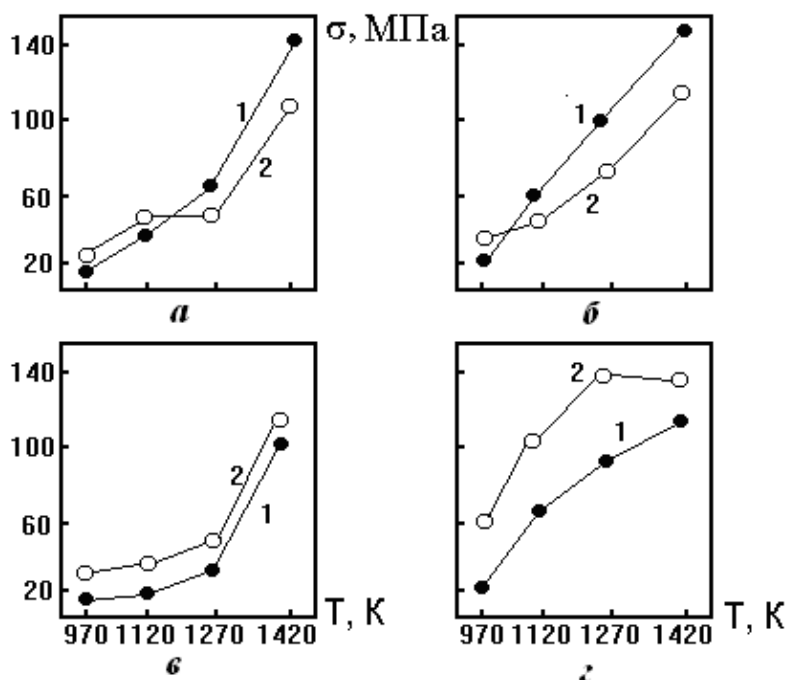


Рис. 2. Изменение предела прочности при растяжении порошковых материалов системы Fe-Cr-Ni в зависимости от температуры его изотермического отжига:
 1 – холодный прокат; 2 – ЭИС – прокатка;
 марок: а – X30H18; б – X18H9; в – X30; г – H30

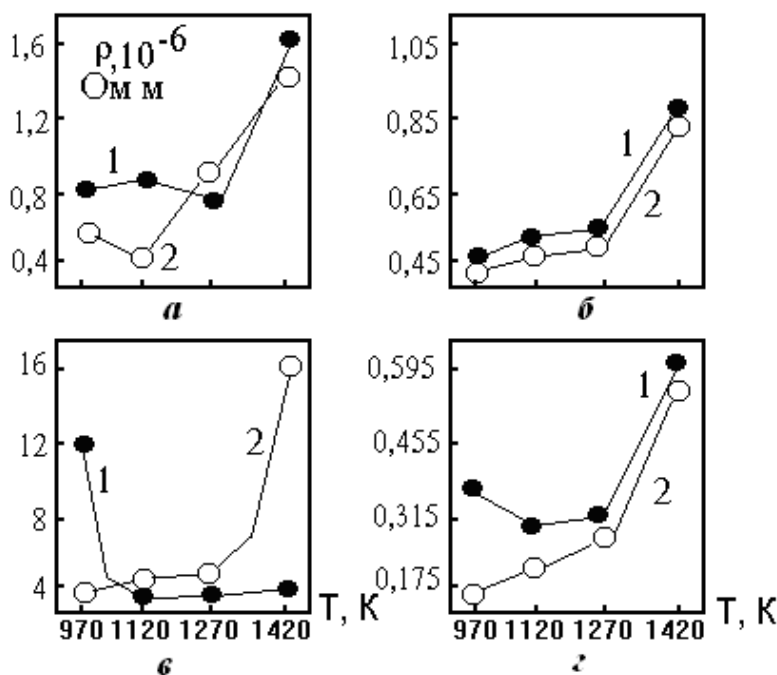


Рис. 3. Изменение удельного электросопротивления порошкового ленточного материала системы Fe-Cr-Ni в зависимости от температуры изотермического отжига:
 1 – холодный прокат; 2 – ЭИС – прокат;
 марок: а – X30H18; б – X18H9; в – X30; г – H30

Чтобы изучить вклад изотермического нагрева в формирование свойств ЭИС порошковых лент на свойства материала, использовали относительные показатели:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{\text{э}} - \sigma_x}{\sigma_x} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{э}} - \rho_x}{\rho_x} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{э}}$, $\rho_{\text{э}}$ и σ_x , ρ_x – предел прочности при растяжении и удельное электросопротивление ЭИС - проката и обычных лент после нагрева.

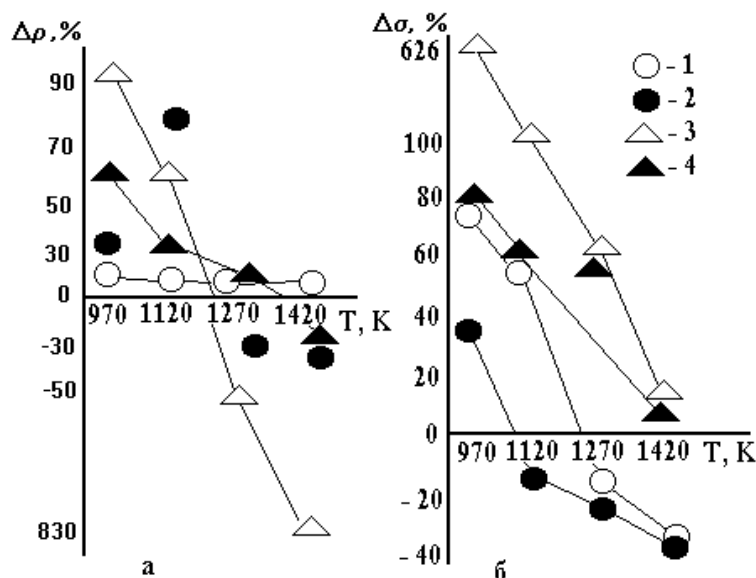


Рис. 4. Зависимость относительных показателей прочности и удельного электрического сопротивления от температуры изотермического отжига материалов порошковой системы Fe-Cr-Ni:

a – $\Delta\rho$; *б* – $\Delta\sigma$ проката марок 1 – X30H18; 2 – X18H9; 3 – X30; 4 – H30

Рост температуры нагрева приводит к снижению значений $\Delta\sigma$ и $\Delta\rho$ (рис. 4), причем кривые $\Delta\sigma$ располагаются в следующем порядке: по возрастанию приращения временного сопротивления при растяжении - аустенит – феррит с повышением температуры изотермического отжига (табл.1 Расположение кривых может быть связано с различной скоростью диффузионных процессов в порошковых системах Fe-Cr и Fe-Ni [8]. Известно также, что наложение магнитного поля на процесс прокатки порошкового железа повышает свойства проката [11]. Положение кривых $\Delta\sigma$ изменяется в сторону увеличения магнитной восприимчивости материалов от парамагнитной аустенитной структуры до ферромагнитной ферритной. Факторы магнитного поля оказывают действие на формирование межчастичных соединений при электропрокатке. Изменение знака величин $\Delta\rho$ и $\Delta\sigma$ на отрицательные значения показывает, что при температурах свыше 1100 К свойства ЭИС - материалов (и контактов) изменяются. Температура 1100 К для порошковых сплавов соответствует температуре, когда процессы спекания происходят и начинают развиваться наиболее интенсивно.

Рассчитывали показатель джоулевой составляющей электрического тока по формуле

$$F = \rho / (C_m \cdot G), \quad (3)$$

где ρ , C_m , G - удельные электрическое сопротивление, теплоемкость и плотность металлов. Показатель F отражает способность металла - проводника к нагреву при прохождении элек-

трического тока, получен из закона Джоуля - Ленца. Его размерность $\text{Ом} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{град/Н}$.

Для порошковых ленточных ЭИС лент составов Х30, Н30, Х30Н18 и Х18Н9 получили следующие значения: $1,98 \cdot 10^{-8}$; $7,73 \cdot 10^{-8}$; $8,33 \cdot 10^{-8}$; $1,81 \cdot 10^{-7}$ $\text{Ом} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{град/Н}$ соответственно. В расчетах использовали результаты табл. 2 и справочные данные. Видно, что существует связь показателя F приращением временного сопротивления при растяжении $\sigma_{\text{в}}^{\text{в}} \sigma_{\text{в}}^{\text{в}}$ от действия электрического тока высокой плотности.

Детально авторами изучено влияние ЭИС на структуру и фазовый состав лент марки Н30. Рентгенограммы снимали на дифрактометре УРС50И в железном K_{α} - излучении. После обычной прокатки и ЭИС на дифрактограммах присутствовали отражения от α -Fe и Ni (рис. 5). При этом угловые положения и интенсивность дифракционных максимумов были одинаковыми для обоих типов лент. С повышением температуры изотермического нагрева вид рентгенограмм изменяется. Это свидетельствует о том, что при нагреве происходит качественное изменение порошковых материалов, т.е. второе спекание. По мере повышения температуры интенсивность отражений α -Fe и Ni уменьшается, появляются новые отражения, угловые положения которых позволяют рассматривать их как отражение α -Fe и твердого раствора Ni в α -Fe. Отражения α -Fe обнаруживаются на дифрактограммах образцов, спеченных при 970 К. После нагрева до 1420 К углы, определяющие положение дифракционных максимумов, обозначенных как отражение α -Fe, соответствуют углам, рассчитанным для излучения K_{α} - Fe, исходя из справочных данных о межплоскостных расстояниях для γ -Fe [12].

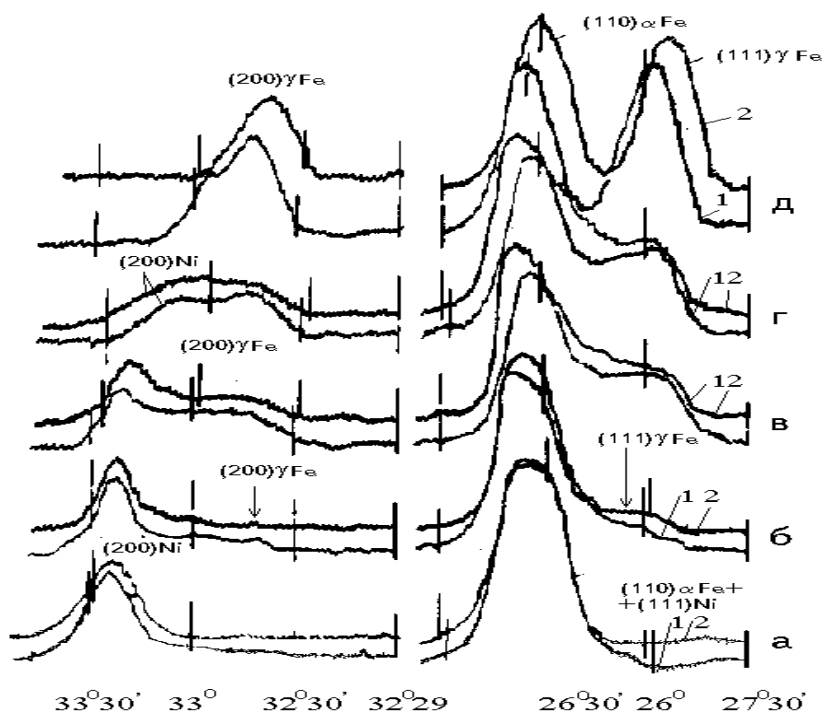


Рис. 5. Фрагменты дифрактограмм железоникелевых порошковых лент после прокатки с ЭИС и после дополнительного изотермического отжига в вакууме в течение одного часа:

a – с ЭИС (1) и без него (2); *б* – при 970 К; *в* – 1120 К; *г* – 1270 К; *д* – 1420 К

Металлографические исследования показали, что различий в форме пор и их числе после нагрева при 1120 и 1420 К не наблюдалось. Увеличение размера пор было наиболее выраженным в ЭИС - материале.

Переход α -Fe в γ -Fe реализуется диффузионно, аналогично механизму спекания косвенным нагревом [9]. Повышение температуры изотермического нагрева приводит к превращению α -Fe в γ -Fe. В ферритных материалах (и контактах), обогащенных хромом, этого

превращения не происходит, так как хром является α -стабилизатором. В результате взаимной диффузии компонентов образуются одно- и двухфазные структуры. Если формируется γ -фаза, то межчастичные контакты, созданные при ЭИС, уничтожаются, а при образовании α -твердого раствора они сохраняются (рис. 4, рис. 5).

Например, при 1270 К начинает снижаться предел прочности при растяжении лент Н30 и увеличиваться их удельное электросопротивление, что обусловлено появлением γ -фазы (рис. 4). Разница в свойствах контактов, сформированных при прокатке с ЭИС и без него, уничтожается посредством диффузии. Очевидно, что различие исчезает, когда диффузионные процессы завершены. Ускорение диффузионных процессов (рис. 5, в, з) можно объяснить повышенной концентрацией вакансий. Однако значения $\Delta\sigma$ составов, в которых γ -фаза образуется в большом количестве (табл. 1), с повышением температуры переходят в отрицательную область, т.е. предел прочности при растяжении материала, полученного методом ЭИС, становится ниже, чем у обычного. Кроме того, в материалах со структурой аустенита различие в значениях σ_b с повышением температуры нагрева исчезает раньше, чем в материалах с α -фазой. Более того, в материалах Х30 и Н30 переход $\Delta\sigma$ в область отрицательных значений в данных условиях нагрева не отмечен (рис. 5 в, з).

Результаты эксперимента указывают на то, что в ЭИС-материале гетеродиффузионные процессы наиболее развиты. Это подтверждается также изменением удельного электрического сопротивления в материалах, обогащающихся γ -фазой (рис. 5, а, б).

Таким образом, с повышением температуры нагрева прочностные свойства материалов Fe – Cr – Ni, сформированные в процессе ЭИС, сохраняются или оказываются в 1,5–2 раза выше, чем у обычного проката, если ЭИС-спеченная структура содержит преимущественно α -фазу (более 50 %). Напротив, прочность становится на 20–40 % ниже, чем у традиционно полученных материалов, если в большом количестве появляется γ -фаза, что обусловлено гетеродиффузионным процессом, происходящим при нагреве.

Материалы, состоящие из наполнителя и металлической матрицы, применяются в качестве уплотнительных элементов компрессоров, абразивных и резистивных материалов. В качестве наполнителей используются неметаллические вещества: керамика, ситаллы, стекла, алмазы, а также твердые смазки – нитрид бора турбостратной (графитоподобной) модификации, графит. Содержание неметаллической фазы в таких материалах достигает 70–80 % объема проката. Наполнители, обладающие свойствами твердых смазок, уменьшают коэффициент трения порошка о поверхность валков и процесс прокатки прерывается.



Рис. 6. Структура частиц порошка НПГ-80. В центре частиц расположен графит, окруженный слоем никеля толщиной 9 мкм. Увеличение 130

Для исключения этого явления применяют плакированные порошки, где частицы твердых смазок покрыты оболочкой из металла, например, никеля. На рис. 6 показана струк-

тура частиц порошка частиц НПГ-80, аналогичное строение частиц имеет порошок Нибон-20, но в нем окружены никелевой оболочкой частицы нитрида бора.

Для таких материалов важным является получение прочного металлического каркаса с равномерно распределенным в нем частицами неметаллической фазы, а для уплотнительных материалов требуется и наличие остаточной пористости. Достичь этого традиционными методами (прессование, прокатка, экструзия) не удастся, так как смеси с наполнителями имеют низкое значение формуемости. Использование плакированных порошков при прокатке показало, что в процессе уплотнения возможно разрушение оболочек частиц твердой смазки, что отрицательно влияет на процесс формования прокаткой. Неметаллические частицы не образуют прочных механических контактов между собой даже при давлениях свыше 2 ГПа. Способом получения материалов из композиционной смеси металлических и неметаллических порошков является электроспекание под давлением. В электроспекании неметаллические наполнители являются диэлектриками [9].

Процесс получения электроспеченных порошковых материалов с диэлектрической фазой при прессовании рассмотрен в [13, 14]. Осталось неисследованным влияние электрофизических свойств порошковых материалов, особенностей формования композиционных смесей с неметаллическими наполнителями на процесс электропрокатки (ЭИС) и свойства получаемого проката.

В качестве материалов использовали смеси порошка X20H80-2M и технического стекла, также смешивали порошок X20H80 с порошком нитрида бора, использовали и плакированные никелем порошки НПГ-80 и Нибон-20. Порошки стекла получали размолотом в бегунах технического стекла марки № 29. В смесях с X20H80 применяли фракцию порошка стекла, прошедшую через сито 010 ГОСТ 3584-73 (табл. 3).

Таблица 3

Физико - механические свойства лент с диэлектрической фазой

Состав или марка порошка	Толщина ленты, мм ± 3,5%	Плотность, г/см ³ ±2,5%	Временное сопротивление ленты при растяжении, МПа ±5,6%	Удельное электро-сопротивление, Ом мм ² /м
Стекло 10% + X20H80-2M 90%	<u>0,68</u>	<u>4,20</u>	<u>менее 1</u>	<u>596</u>
	0,63	5,38	3,8	26
Стекло 15% + X20H80-2M 85%	<u>0,61</u>	<u>4,29</u>	<u>менее 1</u>	<u>1000</u>
	0,60	4,37	22,0	52
Стекло 20% + X20H80-2M 80%	<u>0,60</u>	<u>3,42</u>	<u>менее 1</u>	<u>1000</u>
	0,65	4,08	8,0	16
2% нитрида бора + 98% X20H80-2M	<u>0,38</u>	<u>6,36</u>	<u>8,5</u>	<u>0,14</u>
	0,36	6,43	18,2	0,09
НПГ – 80	<u>0,57</u>	<u>3,59</u>	<u>10</u>	<u>2,6</u>
	0,57	3,67	15	1,1
Нибон – 20	<u>0,45</u>	<u>3,40</u>	<u>4,0</u>	<u>18</u>
	0,45	3,75	4,4	6

Примечание: В числителе дана обычная прокатка; в знаменателе – ЭИС.

Композиции X20H80 с наполнителем (порошок стекла и/или нитрид бора) получали механическим смешиванием в течение четырех часов в баночном смесителе сухим способом. Проводили холодную без тока и ЭИС электропрокатку на стане и по режимам, показанным ранее в настоящей работе. Определяли толщину лент, плотность, временное сопротивление при растяжении и удельное электросопротивление. Для нихромостеклянных лент проводили измерение твердости лент шариком диаметром 1,5 мм по шкале НРТ № 15 ГОСТ 9012 - 59. Составы материалов, марки и свойства лент, полученных обычной и ЭИС прокаткой, приведены в табл. 3.

При прокатке без тока порошковых композиций (табл. 3) временное сопротивление лент было ниже, чем лент после электропрокатки. Увеличение содержания порошка стекла в композиции с порошком Х20Н80 до 20 % увеличивает временное сопротивление лент при растяжении, затем снижает. Электропрокатка (рис. 7, табл. 3) увеличивает прочность, незначительно (2-5%) плотность и значительно от 2 до 60 раз снижает удельное электросопротивление порошковых композиционных лент за счет образования совершенных межчастичных контактов. Показано (табл. 3), что повышение физико-механических свойств электропрокаткой в сравнении с методом без тока наиболее проявляется в нихромостеклянных материалах (временное сопротивление при растяжении больше в 20 раз) и незначительно (в 1,2 -1,4 раза) – в композиции с твердыми смазками (нитрид бора, графит).

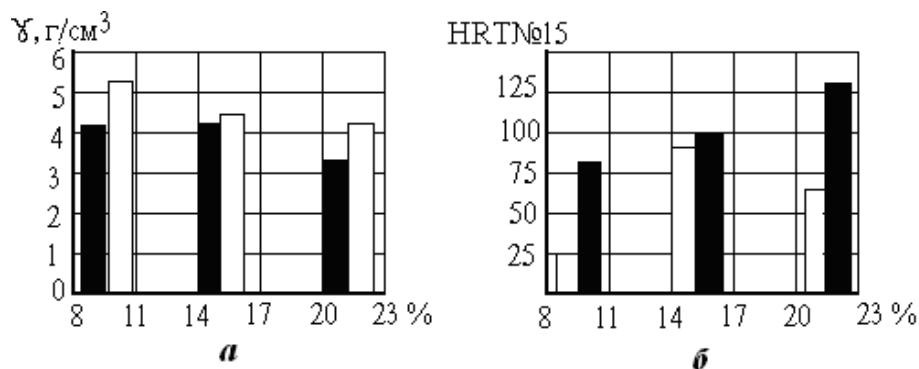


Рис. 7. Влияние содержания диэлектрической фазы:
а – на плотность; *б* – на твердость нихромостеклянных лент;
 ■ – ЭИС прокат; □ – прокат без тока

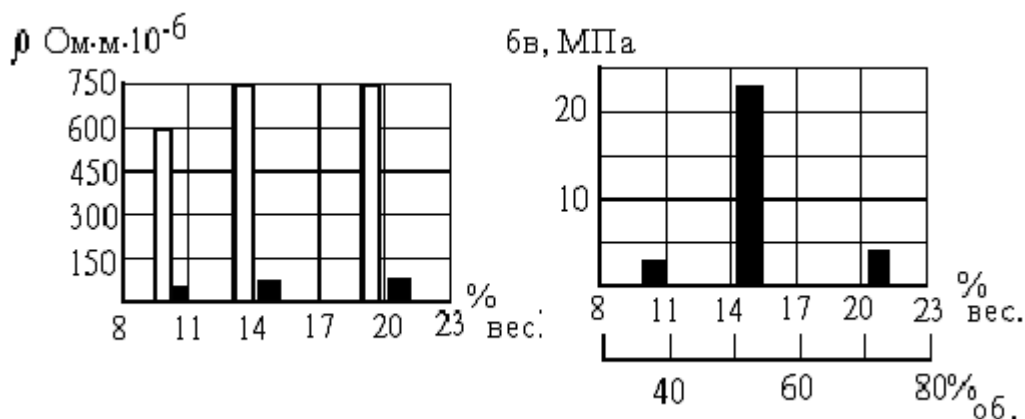


Рис. 8. Влияние содержания диэлектрической фазы:
а – на удельное электросопротивление; *б* – временное сопротивление при растяжении нихромостеклянных лент: ■ – ЭИС прокат; □ – без тока

Для изучения влияния содержания диэлектрической фазы и ЭИС на свойства нихромостеклянных лент были построены гистограммы рис. 8. Видно, что ЭИС ленты (прокат) обладают большей прочностью и меньшим удельным электросопротивлением. Резкое падение удельного электрического сопротивления по сравнению с результатами прокатки без тока является характерным признаком спекания. Кроме того, в лентах, полученных без тока, увеличение содержания наполнителя более 20% (весовых) приводит к значительному падению плотности и прекращению процесса прокатки в то время, как для ЭИС сохраняется стационарность процесса. Очевидно, что для таких смесей применение электроспекания увеличивает технологические возможности прокатки, в частности, повышает прочность лент, т.е. увеличивает формуемость.

Подробное изучение полученных закономерностей невозможно без оценки электро-, тепло- и физико-механических характеристик диэлектрической фазы и материалов с ними. В смесях из нерастворимых компонентов соблюдается правило аддитивности [15]:

$$A_k = [V_m \cdot A_m + V_n \cdot A_n] \cdot K, \quad (4)$$

где A_k - свойство композиционной смеси; V_m и V_n - доли матричного материала и наполнителя (диэлектрической фазы); A_m и A_n - свойства матричного материала и наполнителя (диэлектрической фазы); K - коэффициент, учитывающий совершенство структуры (пористость и распределение компонентов). Для проведения ориентировочных расчетов в настоящей работе принимали $K=1$ [15].

В табл. 4 и табл. 5 представлены физико-механические свойства матричных материалов, взятые из справочной литературы [10, 16], а в табл. 6 приведены расчетные значения тепло- и электрофизических свойств композиционных материалов, вычисленные по данным табл. 4 и табл. 5, и значения показателя F (джоулевой составляющей электрического тока), рассчитанного по формуле (3).

Таблица 4

Физико-механические свойства наполнителей (диэлектрической фазы) композиционных порошковых смесей

Материал	Кристаллическое состояние	Плотность, г/см ³	Теплоемкость, Дж/кг · град	Удельное электросопротивление, Ом·м	Температура плавления, К	Нм, МПа
Нитрид Бора	Графитоподобное	2,25	720	10	2700	70
Графит	Графит	2,25	670	15	3400	180
Техническое стекло, №29	Аморфное	2,20	670	$2 \cdot 10^{13}$	1300	$3 \cdot 10^4$

Таблица 5

Физико - механические свойства нихрома и никеля технической чистоты

Материал	Плотность, г/см ³	Теплоемкость, Дж/кг · град	Удельное электросопротивление, Ом · м · 10 ⁻⁸	T _{пл} , К	Нм, МПа
Нихром	7,9	440	100	1650	1800
Никель	8,8	456	7,24	1730	1750

Данные табл. 6 показывают, что введение диэлектрической фазы увеличивает аддитивные свойства композиции, что имеет корреляцию с изменением свойств ЭИС лент, например, с твердостью и плотностью (рис. 2). Также обнаруживается корреляция показателя F со свойствами нихромостеклянных материалов при изменении содержания диэлектрической фазы (см. табл. 1). Однако для материала из смеси нихрома (98%) с нитридом бора (2%), лента из плакированных порошков НПГ - 80 и Нибон - 20 (табл. 3 и табл. 6) повышение прочностных свойств после ЭИС только в 1,1 - 1,2 раза. Более того, для Нибон - 20 разница в удельном электросопротивлении проката без тока и ЭИС проката незначительна (в два раза), во временном сопротивлении составляет несколько процентов и находится в пределах погрешности эксперимента. У него низкое значение F (табл. 6), но большое содержание диэлектрической фазы, высокое удельное электросопротивление и нанесен слой никеля на поверхность частиц VN.

Таблица 6

Расчетные значения аддитивных свойств порошковых композиционных материалов с диэлектрической фазой и значения показателя F

Материал	Плотность, г/см ³	Удельное электро-сопротивление, Ом · м	Теплоем-кость, Дж/кг · град	$\frac{F, \text{ Ом} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{град}}{\text{Н}}$
Стекло 10% + X20H80-2M 90%	7,3	5	468	$1,46 \cdot 10^{-6}$
Стекло 15% + X20H80-2M 85%	7,0	26	482	$7,76 \cdot 10^{-6}$
Стекло 20% + X20H80-2M 80%	6,7	15	496	$4,51 \cdot 10^{-6}$
BN 2% + X20H80-2M 98%	7,8	1,4	445	$4,07 \cdot 10^{-7}$
НПГ - 80	5,6	2,0	500	$7,14 \cdot 10^{-7}$
Нибон - 20	5,6	16	500	$5,71 \cdot 10^{-7}$

На примере нихромостеклянных материалов видно, что прочностные характеристики достигают наибольшего значения, когда F максимально. Иную закономерность в изменении свойств ЭИС материалов имеют смеси, где с повышением содержания наполнителя снижается F . В данном случае наблюдается наименьший нагрев за счет действия эффекта Джоуля-Ленца в межчастичных контактах и самом порошковом материале. Например, Нибон - 20 имеет невысокое значение F и вследствие того незначительное изменение свойств при формовании с током.

Для изучения закономерностей влияния содержания диэлектрической фазы на твердость и плотность порошковых композиционных ленточных материалов применяли относительные показатели:

$$\Delta HR = [(HR_э - HR_п) / HR_п] \cdot 100 \%, \quad (5)$$

$$\Delta \gamma = [(\gamma_э - \gamma_п) / \gamma_п] \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где $HR_э$ и $HR_п$, $\gamma_э$ и $\gamma_п$ - твердость, плотность ЭИС и проката без тока соответственно.

Таблица 7

Изменение относительных показателей твердости и плотности в нихромостеклянных порошковых лентах

Состав или марка порошка	$\Delta HR, \%$	$\Delta \gamma, \%$
Стекло 10% + X20H80-2M 90%	200	25
Стекло 15% + X20H80-2M 85%	40	3
Стекло 20% + X20H80-2M 80%	120	18

В табл. 7 показаны зависимости ΔHR , $\Delta \gamma$, временного сопротивления (σ_b), удельного электросопротивления (ρ) и показателя F от содержания диэлектрической фазы в нихромостеклянных лентах.

Наибольшее удельное электросопротивление, временное сопротивление при растяжении (табл. 3) и наименьшее приращение плотности, твердости достигается (табл. 7) при максимальном значении показателя F . Изменение F с ростом содержания диэлектрической фазы не имеет линейной зависимости в нихромостеклянных порошковых материалах. Падение F приводит к снижению временного сопротивления при растяжении σ_b ленточного порошкового материала даже при росте плотности $\Delta \gamma$ ЭИС проката (табл. 3 и 7).



а



б

Рис. 9. Внешний вид элемента ленточного уплотнительного материала (ЛУМ) из порошка Нибон-20, плакированного никелем:

а – внешний вид ленты; б - торцевой срез уплотнительной плакированной ленты

Применение ЭИС при прокатке позволяет получать ленты с долей неформующейся фазы, достигающей 80% объема материала. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новой технологии электроспекания при прокатке абразивносодержащих и уплотнительных материалов, например, для триботехнических порошковых композиционных материалов [17]. На рис. 9 показан уплотнительный материал из порошка Нибон-20, полученный методом ЭИС при прокатке с последующей горячей прокаткой лент в пакете-оболочке из никелевых листов.

Выводы

Результаты настоящего исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Применение электропрокатки порошковых металлических и композиционных материалов создает более совершенные межчастичные контакты, чем при формировании прокаткой без электрического тока.
2. Электромагнитное поле, электрический ток при электропрокатке ленточных порошковых материалов повышают временное сопротивление при растяжении (в 2–10 раз), твердость и снижают удельное электрическое сопротивление порошковых лент (в десятки раз) в сравнении с методами холодной прокатки. Повышение свойств порошковых прокатанных лент зависит от химического состава материала, его электрофизических свойств.

Библиографический список

1. Производство порошкового проката / под ред. В.К. Сорокина. – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2002. – 296 с.
2. Мальцев, И.М. Установка для электроимпульсного спекания проводящих порошков при прокатке / И.М. Мальцев, В.Г. Петриков // Порошковая металлургия. 1993. №3. С. 103–106.
3. А. с. SU 1748943 Способ электроимпульсного спекания металлического порошка и установка для его осуществления / В.Г. Петриков, И.М. Мальцев, Л.А. Пырялов. – 1993.
4. 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.
5. 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.
6. Андрушик, Л.О. О движущих силах и кинетике диффузионных процессов при спекании металлических порошков / Л.О. Андрушик [и др.] // Металлофизика. 1987. №2. С. 32–37.
7. Андрушик, Л.О. Формирование межчастичных соединений при электроконтактном спекании металлических порошков / Л.О. Андрушик [и др.] // Металлофизика. 1981. №13. №10. С. 110–121.

8. **Анцифиров, В.Н.** Взаимная диффузия и гомогенизация в порошковых материалах / В.Н. Анцифиров, С.Н. Лещенко, П.Г. Курилов. – М.: Metallurgy, 1986.
9. **Райченко, А.И.** Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А.И. Райченко. – М.: Metallurgy, 1987. – 128 с.
10. **Материалы в машиностроении: справочник.** – М.: Metallurgy, 1986. Т. 3.
11. **Виноградов, Г.А.** Прокатка металлических порошков / Г.А. Виноградов [и др.]. – М.: Metallurgy, 1987. – 128 с.
12. **Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия** / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Metallurgy, 1982. – 623 с.
13. **Байденко, А.А.** Влияние удельных энергозатрат при электроразрядном спекании на структуру и свойства композиции медь – олово – абразив / А.А. Байденко [и др.] // Порошковая металлургия. 1986. № 4. С. 67–70.
14. **Райченко, А.И.** Влияние концентрации абразивной составляющей на механические свойства и структуру инструментального материала, изготовленного электроразрядным спеканием / А.И. Райченко [и др.] // Порошковая металлургия. 1985. №2. С. 77–80.
15. **Карпинос, Д.М.** Композиционные материалы / Д.М. Карпинос. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 683 с.
16. **Косолапова, Т.Я.** Свойства, получения и применения тугоплавких соединений: справочник / Т.Я. Косолапова. – М.: Metallurgy, 1986. – 628 с.
17. **Мальцев, И.М.** Электроимпульсноспекенный при прокатке порошковой композиции антифрикционный уплотнительный материал // *Материаловедение*. 2005. № 6. С. 53–55.

*Дата поступления
в редакци 22.01.2015*

I.M. Mal'tsev

METAL SCIENCE OF ELECTRICAL ROLLING OF A METAL POWDER IN ROLL ELECTRODES WITH A HIGH-DENSITY CURRENT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The aim of this research is to investigate properties of powder electrical rolling of two classes: Fe-Cr-Ni powder system and compositions with powder fillers - black lead, boron nitride and glass.

Design/methodology/approach: The study considers the properties of powder tapes from powders of different classes, derived by electrical rolling with the impact of high-density current of 10^8 - 10^9 A/m² on the forming focus.

Observations and application field: Application of electrical rolling of powdered metal and composite materials creates better interparticle contacts than at rolling without current. The electromagnetic field, current at electrical rolling of powder materials increase ultimate resistance strength (in 2–10 times), hardness and reduce electrical resistance of powder tapes (in ten times) in comparison with the cold rolling method.

Findings: Increasing properties of powder rolling tapes depends on a chemical composition of the material and its electrophysical properties.

Key words: powder rolling, high-density current.