

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-11-36-41

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОКАТАНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© **Илья Михайлович Мальцев**Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия;
e-mail: maltcev@nntu.ru*Статья поступила 26 февраля 2018 г.*

Один из способов воздействия электромагнитного поля и электрического тока на очаг деформации металлических материалов (порошковых, композиционных и компактных) — электропрокатка. Представлены результаты исследования структуры и свойств электропрокатанных материалов: компактных металлов (меди, алюминия и титана), порошковых материалов системы Fe – Cr – Ni, порошковых композиций с наполнителями из частиц нитрида бора, стекла и графита с металлической матрицей из никеля и нихрома. Показано, что электропрокатка с наложением на очаг формирования тока высокой плотности ($10^8 - 10^9$ А/м²) значительно улучшает механические свойства материалов в отличие от обычной холодной прокатки. Исследовали металлические материалы в виде лент на специальной установке электропрокатки. Метод основан на пропускании тока высокой плотности через деформируемый материал между валами-электродами при температурах, не превышающих температуру начала рекристаллизации. Оценивали вклад воздействия тока высокой плотности и электрофизических параметров (теплоемкости, плотности, удельного электрического сопротивления, магнитной восприимчивости) на повышение механических свойств материалов при электропрокатке. Установили, что ток высокой плотности вызывает повышение прочности материалов, расширяет технологические возможности прокатки. Новые экспериментальные и теоретические данные проведенных исследований могут быть использованы при разработке технологии получения ленточных металлических материалов.

Ключевые слова: электропрокатка; механические свойства металлических материалов; ток высокой плотности.

STUDY OF THE MATERIALS SUBJECTED TO ELECTRIC ROLLING

© **Илья М. Мальцев**

Alekseev State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia; e-mail: maltcev@nntu.ru

Submitted February 26, 2018.

Electric rolling (ER) is one of the ways in which the electromagnetic field and electric current can affect the deformation zone of metallic materials (powder, composite and compact). The results of studying the structure and properties of ER materials: compact metals (copper, aluminum and titanium), powder materials of the system Fe – Cr – Ni, powder compositions containing the particles of boron nitride, glass and graphite (fillers) with a metal matrix of nickel and nichrome are presented. The capabilities of ER with imposition of high density current $10^8 - 10^9$ A/m² on the hot spot resulting in a significant improvement of the mechanical properties of the studied materials compared to conventional cold rolling are shown. Metallic materials made in the form of tapes were studied on a special installation for electric rolling. The method is based on imposing high-density current through a deformable material between the roll-electrodes at a temperature not exceeding the temperature of the recrystallization onset and assessing the contribution of the impact of high-density current and electrophysical parameters (heat capacity, density, electrical resistivity, and magnetic susceptibility) to an increase in the mechanical properties of materials upon electric rolling. The high density current is shown to increase in the strength of materials and expand the technological capabilities of rolling. New experimental and theoretical data of the study can be used in the developing the technology for producing metallic tape materials.

Keywords: electrical rolling; mechanical properties of metallic materials; high density current.

Один из способов воздействия электромагнитного поля и электрического тока на очаг деформации металлических материалов (порошковых,

композиционных и компактных) — электропрокатка. Особый интерес представляет метод электропрокатки, при котором реализуется так на-

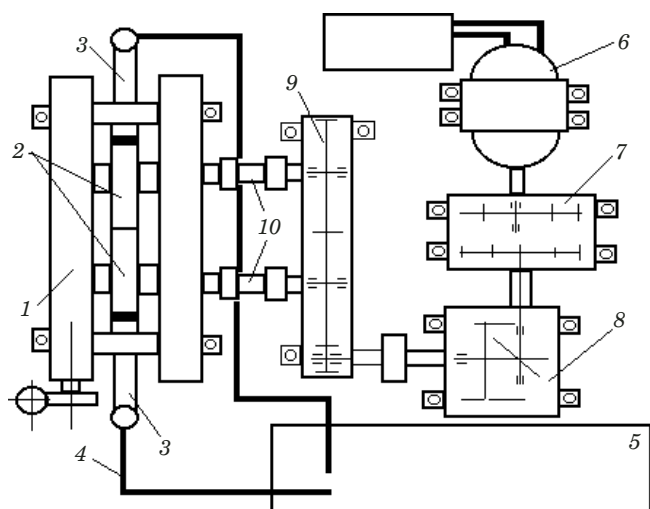


Рис. 1. Схема УЭИС (вид сверху): 1 — рабочая клеть прокатного стана; 2 — валки-электроды; 3 — контактные устройства; 4 — токопроводы; 5 — энергоблок; 6 — электродвигатель постоянного тока; 7 — понижающий червячный редуктор; 8 — четырехступенчатая коробка передач; 9 — раздаточная шестеренная коробка; 10 — карданные штанги

зываемый эффект электропластичности [1], возникающий при протекании тока высокой плотности ($10^8 - 10^9$ А/м²) через очаг деформации [2 – 6]. В этом случае прочностные свойства металлических материалов повышаются при незначительном снижении показателей пластичности.

Цель работы — исследование структуры и свойств металлических материалов после электропрокатки с применением тока высокой плотности.

Как известно, электроспекание в валках [7, 8] осуществляют с помощью пропускания от вала к валку регулируемого постоянного или переменного электрического тока. Использовали способ электропрокатки порошка, при котором применяется импульсный электрический ток.

Установка для электроимпульсного спекания (УЭИС) (рис. 1) позволяла одновременно со спеканием проводящего порошка при прокатке формировать материал валками-электродами. При этом высокая скорость нагрева давала возможность поднять амплитуду напряжения импульса тока между валками-электродами и уплотняемым порошком. С помощью УЭИС анализировали скоростные, временные, температурные и электрофизические факторы электропрокатки металлических и композиционных порошков.

Исследовали спекание электропроката неограниченной длины (толщина — 0,4 – 1,8, ширина — 10 мм). Скорость нагрева менялась от 10 до 800 град/с, скорость прокатки — от 0,31 до 2,6 рад/с. Максимальная мощность при спекании составляла 40 кВт.

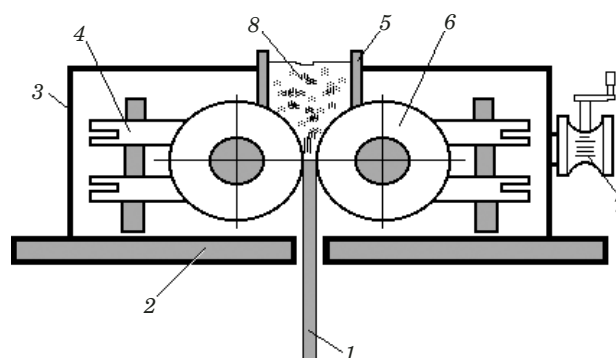


Рис. 2. Схема рабочей прокатной клетки УЭИС: 1 — спеченная лента; 2 — станина; 3 — герметичный металлический кожух; 4 — электрические контакты; 5 — бункер для порошка; 6 — валки-электроды; 7 — червячно-нажимное устройство регулирования зазора между валками; 8 — порошок

В рабочей клетке УЭИС (рис. 2) использовали горизонтальные валки-электроды диаметром 0,1 (или 0,2) м из закаленной стали ХВГ или 35ХГСА, а также бункер для гравитационной подачи порошка. Установленная на станине клеть содержала также нажимные червячно-винтовые устройства, размещенные напротив каждой из шеек одного из валков-электродов, для регулирования толщины ленты.

Специальные прокладки электроизолировали клеть от валков и контактных устройств. Контактное устройство состояло из скользящей пластины из материала МГ-2 или псевдосплава Мо – Си, прикрепленной к токопроводу из бескислородной меди, который устанавливали с пружиной в неподвижном корпусе. Каждое контактное устройство передавало ток до 10 кА. Эффективная плотность тока в водоохлаждаемых токопроводах, выполненных в виде труб из сплава АМГ-6, достигала 160 А/мм².

Энергоблок УЭИС (рис. 3) включал систему управления и автоматизации (СУА), а также устройство синхронизации (УС). В СУА с помощью тиристоров V1 и V2, включенных в первичную цепь силового трансформатора Tr, между валками-электродами создавалось рабочее напряжение определенной длительности, амплитуды и скважности.

Блок управления тиристорами — генератор импульсов, синхронизированных соответствующим устройством с моментами перехода через нуль фазных токов сети. Изменяя параметры импульсного тока, можно управлять мощностью, создаваемой в зоне уплотнения прокатываемого порошка, а следовательно, нагревом при больших скоростях. Напряжение вторичной цепи энергоблока варьировалось от 3,15 до 20,9 В, длительность импульса — от 0,02 до 0,26, длитель-

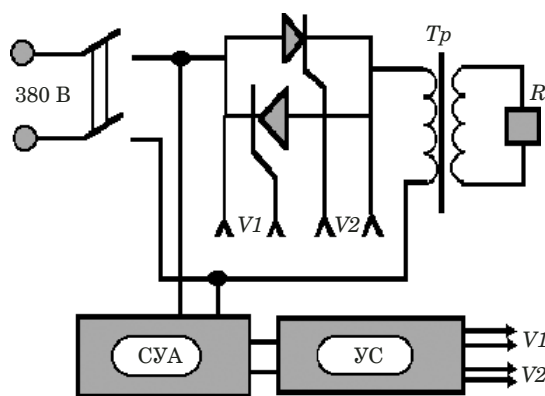


Рис. 3. Энергоблок УЭИС

ность паузы — от 0,02 до 0,4 с. Максимальный эффективный ток составлял 3,82 кА. Плотность тока, пропускаемого между валками-электродами, — 10^8 А/м².

Процесс электропрокатки металлических порошковых материалов включал следующие стадии: 1) поступление порошка в зону уплотнения вращающихся валков-электродов; 2) электровоздействие на деформируемый порошок; 3) выход готовой ленты и быстрое охлаждение на воздухе.

При одинаковых степенях деформации проводили как электро-, так и обычную холодную прокатку в валках-электродах. Технологические параметры прокатки соответствовали принятым методикам [2, 9 – 10]. Плотность тока выдерживали неизменной — $1,1 \cdot 10^8$ А/м². На готовых образцах измеряли пористость, плотность, твердость, временное сопротивление при растяжении, относительное удлинение, анализировали

макро- и микроструктуру, осуществляли рентгеновский анализ и резистометрию.

Исследовали порошковые системы Fe – Cr – Ni марок Х30Н18, Х18Н9, Х30, Н30 [3], композиционные металлические смеси с наполнителями, плакированные порошки «Нибон-200» и «НППГ-80», компактные металлы (Cu, Ti и Al). Выбор материалов определялся тем, что в порошковых системах Fe – Cr – Ni магнитные свойства меняются от ферромагнитных до парамагнитных. В компактных металлах — от диамагнитных до парамагнитных. При этом снижается электрическая проводимость по ряду Cu → Al → Ti. В композиционных материалах введение диэлектрической фазы (например, порошка стекла) в широком интервале варьирует удельное электрическое сопротивление.

На рис. 4 показаны зависимости предела прочности при растяжении и удельного электро-сопротивления порошковых лент, полученных холодной и электропрокаткой (ЭИС), от температуры отжига в вакууме. Видно, что ЭИС создает более прочные межчастичные контакты (прочность ЭИС-лент выше обычных). Это подтверждается и большим значением электрической проводимости.

Вклад изотермического нагрева в формирование свойств ЭИС-лент оценивали, используя относительные показатели:

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

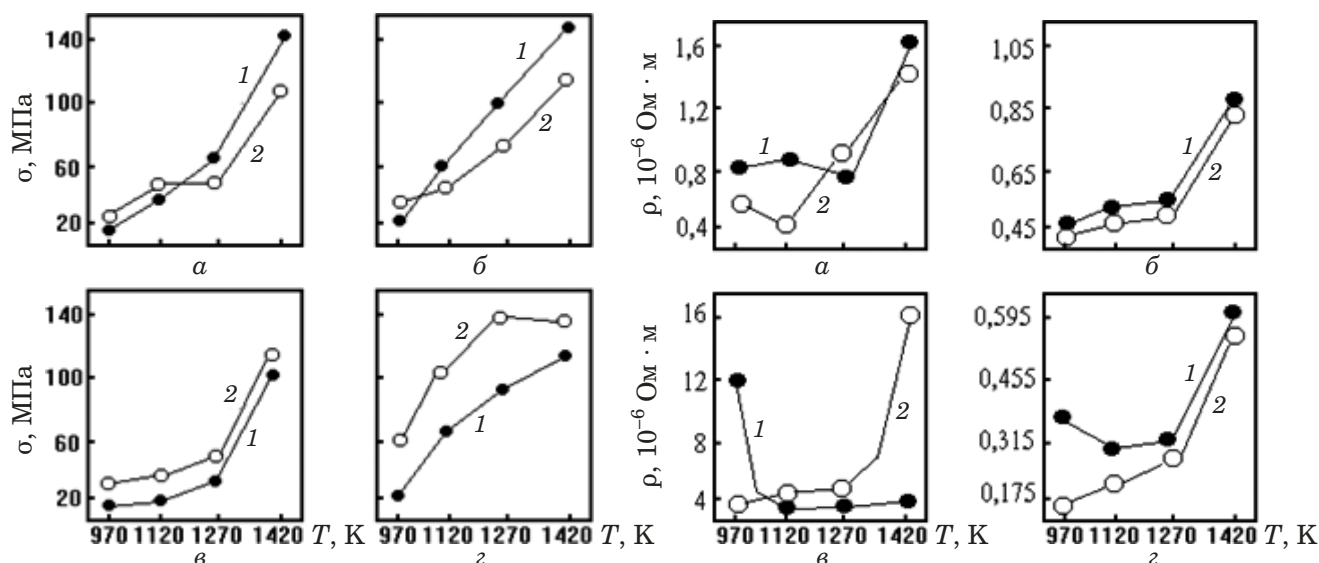


Рис. 4. Зависимости предела прочности при растяжении (σ) и удельного электро-сопротивления (ρ) порошковых материалов системы Fe – Cr – Ni марок Х30Н18 (а), Х18Н9 (б), Х30 (в), Н30 (г) от температуры изотермического отжига: 1 — холодный прокат; 2 — ЭИС-прокатка

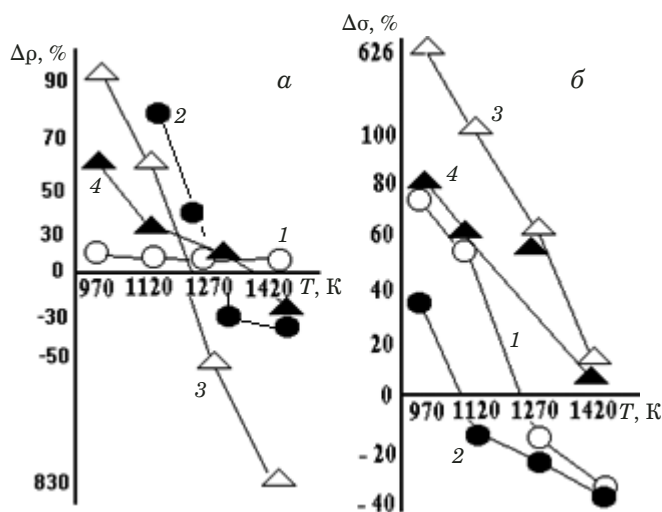


Рис. 5. Зависимости $\Delta\rho$ (а) и $\Delta\sigma$ (б) от температуры изотермического отжига материалов порошковой системы Fe – Cr – Ni марок X30H18 (1), X18H9 (2), X30 (3) и H30 (4)

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

где $\sigma_{\text{э}}$, $\rho_{\text{э}}$ и $\sigma_{\text{х}}$, $\rho_{\text{х}}$ — предел прочности при растяжении и удельное электросопротивление ЭИС-проката и обычных образцов после нагрева.

На рис. 5 показана зависимость относительных показателей от температуры изотермического отжига.

Видно, что прохождение электрического тока высокой плотности через очаг формирования повышает физико-механические показатели материалов. Кривые $\Delta\sigma$ сдвигаются в сторону увеличения магнитной восприимчивости (от парамагнитной аустенитной структуры до ферромагнитной ферритной). Вместе с тем влияние магнитного поля на формирование межчастичных соединений сохраняется в материалах и после отжига. Изменение знака $\Delta\rho$ и $\Delta\sigma$ на отрицательные значения свидетельствует, что при температурах свыше 1100 К (при которых процессы спекания

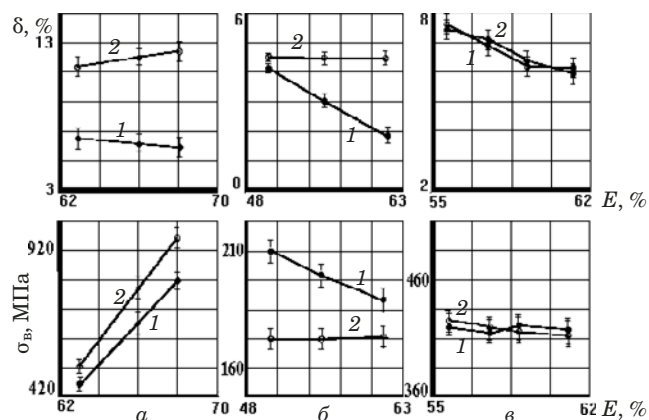


Рис. 6. Влияние степени деформации E на δ и $\sigma_{\text{в}}$ холодно-деформированных (1) и электропрокатанных (2) прутков ВТ1-0 (а), А6 (б), М1 (в)

развиваются наиболее интенсивно) свойства ЭИС-материалов (и контактов) меняются.

Показатель джоулевой составляющей электрического тока F рассчитывали по формуле

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

где ρ , C_m , G — удельные электрическое сопротивление, теплоемкость и плотность материала.

Показатель F отражает способность металла-проводника к нагреву при прохождении электрического тока. Для порошковых ЭИС-образцов марок X30, H30, X30H18 и X18H9 получили следующие значения F , Ом · м³ · град/Н: $1,98 \cdot 10^{-8}$; $7,73 \cdot 10^{-8}$; $8,33 \cdot 10^{-8}$; $1,81 \cdot 10^{-7}$ соответственно.

При исследовании влияния электрофизических свойств порошковых материалов, особенностей формирования композиционных смесей с неметаллическими наполнителями на процесс ЭИС и показатели получаемого проката [3, 5] использовали смеси порошка X20H80-2М с техническим стеклом и нитридом бора, а также плакированные никелем смеси «НППГ-80» и «Нибон-20» (табл. 1). Видно, что прочностные характери-

Таблица 1. Физико-механические параметры и расчетные значения F композиционных материалов с диэлектрической фазой (числитель — обычная прокатка, знаменатель — ЭИС, в скобках — погрешность)

Состав, марка порошка	Толщина ленты, мм ($\pm 3,5\%$)	Плотность, г/см ³ ($\pm 2,5\%$)	Временное сопротивление ленты при растяжении, МПа ($\pm 5,6\%$)	Удельное электро-сопротивление, Ом · мм ² /м	Показатель F , Ом · м ³ · град/Н
Стекло 10 % + X20H80-2М 90 %	0,68/0,63	4,20/5,38	Менее 1/3,8	596/26	$1,46 \cdot 10^{-6}$
Стекло 15 % + X20H80-2М 85 %	0,61/0,60	4,29/4,37	Менее 1/22,0	1000/52	$7,76 \cdot 10^{-6}$
Стекло 20 % + X20H80-2М 80 %	0,60/0,65	3,42/4,08	Менее 1/8,0	1000/16	$4,51 \cdot 10^{-6}$
Нитрид бора 2 % + X20H80-2М 98 %	0,38/0,36	6,36/6,43	8,5/18,2	0,14/0,09	$4,07 \cdot 10^{-7}$
«НППГ-80»	0,57/0,57	3,59/3,67	10/15	2,6/1,1	$7,14 \cdot 10^{-7}$
«Нибон-20»	0,45/0,45	3,40/3,75	4,0/4,4	18/6	$5,71 \cdot 10^{-7}$

ки достигают наибольшего значения, когда F максимально.

Иную закономерность в изменении показателей ЭИС-материалов демонстрируют смеси, у которых с повышением содержания наполнителя снижается F . В этом случае наблюдается наименьший нагрев в межчастичных контактах и самом материале. Так, «Нибон-20» имеет невысокое значение F и вследствие этого незначительное изменение временного сопротивления при растяжении при электропрокатке (см. табл. 1).

Далее электропрокатывали компактные прутки металлов технической чистоты: М1 (медь), А6 (алюминий), ВТ1-0 (титан) (табл. 2). Прокатку осуществляли с током высокой плотности в очаге деформации [1, 6].

На рис. 6 показано влияние степени деформации (E) на временное сопротивление при растяжении (σ_B) и относительное удлинение (δ) холодно-деформированных и электропрокатанных металлических прутков [6]. Видно, что электропрокатка с током высокой плотности повышает прочностные свойства и незначительно, в сравнении с холодной прокаткой, снижает относительное удлинение (пластичность).

Вклад электрофизических свойств в изменение механических параметров при электропрокатке металлов оценивали по показателю F (табл. 3). Установили, что увеличение F вызывает повышение относительного удлинения металла и рост магнитной восприимчивости (от диамагнитной у меди до парамагнитной у титана).

Таблица 2. Температура и время охлаждения образцов после прокатки с разной степенью деформации (числитель — ЭИС; знаменатель — обычная прокатка)

Металл	Степень деформации, %	Температура нагрева, К	Время охлаждения до комнатной температуры (297 К), с
М1 (медь)	78	310/310	15/15
	61	310/310	15/15
А6 (алюминий)	61	327/308	50/40
	49	301/297	55/35
ВТ1-0 (титан)	68	323/311	71/51
	63	319/314	72/53

Таблица 3. Значения показателя F и $\Delta\delta$ и коэффициента корреляции между ними

Металл	F , Ом · м ³ · град/Н	$\Delta\delta$, %	Коэффициент корреляции
М1 (медь)	$0,0408 \cdot 10^{-14}$	0	0,712482
А6 (алюминий)	$0,108 \cdot 10^{-14}$	60	
ВТ1-0 (титан)	$2,240 \cdot 10^{-14}$	80	

Величину $\Delta\delta$ рассчитывали по относительно-му показателю (аналогично (1) и (2)), используя экспериментальные данные. Отметим, что предельная удельная энергия деформации металлов при электропрокатке также повышается [6].

Таким образом, при электропрокатке металлических порошковых, композиционных и компактных материалов электрофизические характеристики обрабатываемого материала определяют свойства готового проката. Изменение прочностных и пластических свойств материалов зависит от величины показателя джоулевой составляющей электрического тока F . Его увеличение вызывает рост временного сопротивления при растяжении, относительного удлинения и предельной удельной энергии деформации. Показатель F можно использовать в качестве критерия при выборе эффективных режимов электрофизической обработки и химического состава материалов. Магнитная восприимчивость электропрокатанных материалов оказывает влияние на результат технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Ю. В., Троицкий, Ю. С., Авраамов Ю. В. и др. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы — М.: МГИУ, 2001. — 844 с.
2. Мальцев И. М. Влияние электромагнитного поля, скин- и пинч-эффектов при электропрокатке с импульсными токами высокой плотности порошковых металлических материалов / Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. № 3. С. 5 – 9.
3. Мальцев И. М. Материаловедение порошкового электропроката / Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2015. № 3(110). С. 255 – 267.
4. Мальцев И. М. Особенности строения температурного поля в межчастичном пространстве при электропрокатке металлических порошков / Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 3. С. 24 – 28.
5. Мальцев И. М. Свойства порошкового электропроката / Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 9. С. 30 – 38.
6. Мальцев И. М. Электропластическая прокатка металлов с током высокой плотности / Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2008. № 3. С. 34 – 38.
7. Мальцев И. М., Петриков В. Г. Установка для электроимпульсного спекания проводящих порошков при прокатке / Порошковая металлургия. 1993. № 3. С. 103 – 104.
8. Олевский Е. А., Александрова Е. В., Ильина А. М. и др. Электроконсолидация порошковых материалов. II. Консолидированные материалы и моделирование процессов консолидации / Физика и химия обработки материалов. 2013. № 4. С. 45 – 68.
9. Мальцев И. М. Исследование скоростной электротермической обработки металлов током высокой плотности / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. № 11. Т. 71. С. 35 – 38.
10. Long P., Wen H., Bangping G. Non-uniform carbon segregation induced by electric current pulse under residual stresses / Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 226. P. 247 – 254.

REFERENCES

1. **Baranov Yu. V., Troitsky O. A., Avraamov Yu. S., et al.** Physical principles of electropulse and electroplastic treatments and new materials. — Moscow: MGIU, 2001. — 844 p. [in Russian].
2. **Mal'tsev I. M.** Influence of the electromagnetic field, skin and pinch effects in electrical rolling with pulse currents of high density of sintered metallic materials / *Izv. Vuzov. Poroshk. Metallurg. Funkts. Pokr.* 2008. N 3. P. 5 – 9 [in Russian].
3. **Mal'tsev I. M.** Material science of sintered electrical rolling / *Tr. NGTU im. R. E. Alekseeva.* 2015. N 3(110). P. 255 – 267 [in Russian].
4. **Mal'tsev I. M.** Features of structure of the temperature field in interparticle space during electrical rolling of metal powders / *Zagotovit. Proizv. Mashinostr.* 2012. N 3. P. 24 – 28 [in Russian].
5. **Mal'tsev I. M.** Properties of sintered electrical rolling / *Zagotovit. Proizv. Mashinostr.* 2011. N 9. P. 30 – 38 [in Russian].
6. **Mal'tsev I. M.** Electroplastic rolling of metals with high-density current / *Izv. Vuzov. Poroshk. Metallurg. Funkts. Pokr.* 2008. N 3. P. 34 – 38 [in Russian].
7. **Mal'tsev I. M., Petrikov V. G.** The installation for electropulse sintering of conducting powders during rolling / *Poroshk. Metallurg.* 1993. N 3. P. 103 – 104 [in Russian].
8. **Olevsky E. A., Alexandrova E. V., Ilina A. M., et al.** Electro-consolidation of sintered materials. II. Consolidated materials and modeling of consolidation processes / *Fiz. Khim. Obrab. Mater.* 2013. N 4. P. 45 – 68 [in Russian].
9. **Mal'tsev I. M.** Research of high-speed electrothermal processing of metals by high density current / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2005. Vol. 71. N 11. P. 35 – 38 [in Russian].
10. **Long P., Wen H., Bangping G.** Non-uniform carbon segregation induced by electric current pulse under residual stresses / *Journal of Materials Processing Technology.* 2015. Vol. 226. P. 247 – 254.