



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-1-5-11>

Научная статья

Research article



Получение и свойства проката из плакированных порошков НПГ-80 и Нибон-20

И. М. Мальцев[✉], Ю. А. ГетмановскийНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24[✉ Maltcev@nntu.ru](mailto:Maltcev@nntu.ru)

Аннотация. При изготовлении турбин применяются антифрикционные ленточные уплотнительные материалы (ЛУМ). Проведено изучение механизма роста толщины проката. Установлено, что внутренние оксиды частиц порошка, восстанавливающиеся при спекании и отжиге в водороде, вызывают изменение размеров лент и прессовок из плакированных порошков НПГ-80 и Нибон-20. Отличительной особенностью используемых в работе порошков является наличие вокруг частицы твердой смазки (графита или нитрида бора) оболочки из никеля. Показано, что повышение температуры спекания и времени нагрева до изотермической выдержки интенсифицирует рост лент и образцов. Проведенные исследования свидетельствуют о связи восстановительных процессов, протекающих в водороде при спекании и отжиге порошков НПГ-80 и Нибон-20, содержащих в своем составе твердую смазку, с ростом толщины ленты. Увеличение продолжительности нагрева до изотермической выдержки при температуре 1150 °С сопровождается ростом толщины проката. Спекание ЛУМ Нибон-20 по 1-му режиму (4 ч до 1150 °С) создает прирост толщины на 5–7 %, а по 2-му (9 ч до 1150 °С) – на 12–13 %. Для НПГ-80 увеличение толщины произошло на 3–7 и 8–11 % соответственно. Вследствие этого происходит снижение физико-механических свойств ЛУМ. Для спекания в атмосфере водорода листовых материалов из НПГ-80 и Нибон-20 предпочтительно использование более низких температур и более высоких скоростей нагрева. Возможно устранение роста толщины ЛУМ из плакированных порошков НПГ-80 и Нибон-20 применением спекания (нагрева) под давлением. Методом электропрокатки и последующей горячей прокатки получен ЛУМ из порошка Нибон-20 при отсутствии роста толщины материала.

Ключевые слова: турбины, уплотнительные материалы, прокатка, плакированные порошки, НПГ-80, Нибон-20, электропрокатка, отжиг, спекание, свойства

Для цитирования: Мальцев И.М., Гетмановский Ю.А. Получение и свойства проката из плакированных порошков НПГ-80 и Нибон-20. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2023;17(1):5–11.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-1-5-11>

Obtaining and properties of rolled products from clad powders NPG-80 and Nibon-20

I. M. Mal'tsev[✉], Yu. A. GetmanovskyNizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev
24 Minina Str., Nuzhny Novgorod 603950, Russian Federation[✉ Maltcev@nntu.ru](mailto:Maltcev@nntu.ru)

Abstract. Antifriction tape sealing materials (TSM) are used in the manufacture of turbines. This work studied the mechanism of the increase in thickness of rolled products. The study showed that internal oxides of powder particles, which are reduced during sintering and annealing in hydrogen, cause a change in the size of tapes and compacts from NPG-80 and Nibon-20 clad powders. The distinctive feature of powders used in the work is the presence of a nickel shell around the particle of the solid lubricant (graphite or boron nitride). It was shown that an increase in sintering temperature and heating time to isothermal holding intensifies the growth of the tapes and samples. The studies carried out point to a relationship between reduction processes occurring in hydrogen during heating, sintering, and annealing of NPG-80 and Nibon-20 powders with an increase in the

thickness of the tape containing the solid lubricant in its composition. An increase in the duration of heating to isothermal holding at 1150 °C is accompanied by an increase in the thickness of rolled stock. Sintering of TSM Nibon-20 in the first mode (4 h to 1150 °C) gives an increase in thickness by 5–7 %, whereas sintering in the second mode (9 h to 1150 °C) gives an increase of 12–13 %. For NPG-80, the increase in thickness is 3–7 % and 8–11 %, respectively. This leads to some decrease in the physical and mechanical properties of TSM. Lower temperatures and higher heating rates are recommended for the sintering of sheet materials from NPG-80 and Nibon-20 in the hydrogen atmosphere. The increase in thickness of TSM from clad powders NPG-80 and Nibon-20 can be avoided if the sintering (heating) is carried out under pressure. By the method of electric rolling and subsequent hot rolling TSM is obtained from Nibon-20.

Keywords: turbines, sealing materials, rolling, clad powders, NPG-80, Nibon-20, electric rolling, annealing, sintering, properties

For citation: Mal'tsev I.M., Getmanovsky Yu.A. Obtaining and properties of rolled products from clad powders NPG-80 and Nibon-20. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(1):5–11. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-1-5-11>

Введение

При изготовлении турбин применяются антифрикционные ленточные уплотнительные материалы (ЛУМ). Ими закрывают зазор между турбинными лопатками и корпусом турбины. Ленты должны обладать специфичным комплексом свойств: срабатывать при врезании в них турбинной лопатки, иметь низкий коэффициент трения, обладать жаропрочностью и жаростойкостью. Для создания ЛУМ наиболее часто используются методы порошковой металлургии. Порошковые материалы для ЛУМ представляют собой композиции из матрицы на никелевой или хромовой основе с равномерно распределенными в ней включениями из твердых смазок (нитрид бора с гексагональной графитоподобной кристаллической решеткой – h BN, а также графит) и характеризуются определенным уровнем пористости.

Основной способ получения формовок из таких материалов – прессование и прокатка. В настоящее время промышленно освоена технология прокатки ленты из композиционных порошковых материалов в ПАО ВМЗ (г. Выкса, цех пористого проката) [1–8]. Промышленная технология ЛУМ включает шихтоприготовление, прокатку ленты, спекание и горячую прокатку с целью плакирования основного порошкового материала компактными жаропрочными подложками.

Особенностями технологии прокатки ЛУМ является ряд технологических препятствий: трудности формования высокотекучих порошковых композиций, ограничения по количеству введения неформующейся порошковой фазы (твердой смазки), возникновение пленки из слоя частиц твердых смазок на прокатных валках. Все эти факторы приводят к вырождению процесса формования прокаткой.

Проведено изучение механизма роста толщины проката. Было установлено, что внутренние оксиды частиц порошка, восстанавливающиеся при его спекании и отжиге в водороде, вызывают изменение размеров лент и прессовок из плакированных порошков НПГ-80 и Нибон-20. Показано, что увеличение температуры спекания и времени нагрева до изотермиче-

ской выдержки интенсифицирует рост лент и образцов. Исследованы особенности спекания и отжига ЛУМ и разработан новый метод формования порошковых композиций электропрокаткой для устранения технологических причин, препятствующих созданию нового поколения ЛУМ, содержащих до 80 % объемных частиц твердой смазки. Цель работы – получение материалов из плакированных порошков НПГ-80 и Нибон-20 методом прокатки, в том числе электро- и горячей прокатки.

Методика работы и эксперименты

Отличительной особенностью используемых в работе порошков является наличие вокруг частицы твердой смазки (графита или нитрида бора) оболочки из никеля толщиной 9–12 мкм (рис. 1). Листы из этих порошков, технологические свойства и состав которых приведены в табл. 1, получены прокаткой на валках диаметром 200 мм и спеканием по двум режимам в водороде: 1 – нагрев в течение 4 ч до $t = 1150$ °C, выдержка 2 ч при этой температуре, охлаждение с печью до 400 °C, а затем на воздухе; 2 – нагрев в течение 9 ч до $t = 1150$ °C, выдержка 2 ч, охлаждение с печью до 400 °C и далее на воздухе.



Рис. 1. Структура частиц фракции +0,100 мм порошка НПГ-80

Fig. 1. The structure of the +0.100 mm size particles of the NPG-80 powder

Таблица 1. Технологические свойства и фракционный состав порошков

Table 1. Technological properties and size range of powders

Марка порошка	Насыпная плотность, г/см ³	Плотность утряски, г/см ³	Фракционный состав, %, по размерам частиц, мм					
			–0,400 +0,200	–0,200 +0,160	–0,160 +0,100	–0,100 +0,063	–0,063 +0,050	–0,050
Нибон-20	1,02	1,35	0,20	0,20	2,50	9,80	4,20	82,0
НПП-80	1,39	1,76	–	9,74	18,98	21,84	12,01	42,4

Таблица 2. Влияние режима спекания на физико-механические свойства ленты

Table 2. Influence of the sintering mode on the physical and mechanical properties of the tape

Режим спекания	Марка порошка	Плотность ленты, г/см ³	Пористость, %	σ_b , МПа	HB, МПа
1	НПП-80	3,90	30	3,80	24
	Нибон-20	3,84	31	2,90	–
2	НПП-80	3,60	35	2,50	15
	Нибон-20	3,26	42	2,66	–

Исследование свойств ленты после спекания показало, что увеличение продолжительности нагрева до изотермической выдержки при $t = 1150^\circ\text{C}$ сопровождается ростом толщины проката. Так, спекание ленты из порошка Нибон-20 по режиму 1 дает прирост толщины на 5–7 %, а по режиму 2 – на 12–13 %. Для НПП-80 увеличение толщины произошло на 3–7 и 8–11 % соответственно. Как следствие, наблюдается снижение физико-механических свойств ленты (табл. 2).

Изменение свойств материала происходит и в том случае, когда после спекания и последующей горячей

прокатки образцы подвергаются отжигу в водороде в течение 2 ч при $t = 950^\circ\text{C}$ (табл. 3). Отжиг, как и спекание, вызывает рост толщины ленты на 7 % у НПП-80 и на 10 % у Нибон-20. Повторный отжиг этих лент дает увеличение их толщины на 4–5 %. Наблюдаемые изменения геометрии лент приводят к снижению свойств уплотнительного антифрикционного материала вследствие повышения пористости. Для выявления причин, связанных с ростом толщины порошкового проката при спекании и отжиге, порошки восстанавливали 1 ч при $t = 300^\circ\text{C}$ в водороде. Свойства порошков после отжига приведены в табл. 4.

Таблица 3. Свойства порошковых лент после отжига

Table 3. Properties of the powder tapes after annealing

Материал	Вид обработки	σ_b , МПа	HB, МПа	Пористость, %	Плотность ленты, г/см ³
Нибон-20	Горячая прокатка	9,5	8,0	30	3,96
	Отжиг	4,5	4,0	56	2,50
НПП-80	Горячая прокатка	21,0	28,0	28	4,80
	Отжиг	18,0	17,0	30	4,60

Таблица 4. Технологические свойства порошков до и после отжига

Table 4. Technological properties of the powders before and after the annealing

Марка порошка	Состояние порошка	Фракционный состав, %, по размерам частиц, мм						Насыпная плотность, г/см ³	Плотность утряски, г/см ³
		–0,400 +0,200	–0,200 +0,160	–0,160 +0,100	–0,100 +0,063	–0,063 +0,050	–0,050		
Нибон-20	До отжига	0,6	0,2	2,5	9,8	4,2	82,0	1,02	1,35
	После отжига	2,6	0,2	7,3	17,0	16,5	56,4	0,89	1,02
НПП-80	До отжига	–	9,7	19,0	21,8	12,0	42,4	1,39	1,76
	После отжига	1,1	3,6	19,7	29,0	8,8	32,5	1,01	1,25

Исследование порошков показало, что при отжиге преимущественно изменяется содержание частиц мелких фракций (см. табл. 4). Кроме того, происходит уменьшение массы (на 5 %) отжигаемых в восстановительной среде (водороде) навесок порошка, что свидетельствует о значительной его окисленности в состоянии поставки. При изучении частиц порошков методом пробойного напряжения установлено, что оксиды расположены как внутри, так и снаружи никелевой оболочки. Методика определения пробойного напряжения порошковой засыпки и прибор для ее осуществления подробно представлены в работах [7; 8]. Средняя толщина оксидного слоя, выявленная экспериментально, составила $1,7 \cdot 10^{-5}$ мм, а толщина оболочки, определенная микроскопическим методом, имела средний размер $9 \cdot 10^{-3}$ мм. Измерение оксидного слоя оболочки порошков после восстановления показало, что при отжиге происходит резкое уменьшение его толщины до значения $1,06 \cdot 10^{-6}$ мм.

Изучение кинетики усадки при спекании на образцах из Нибон-20 разной плотности, спеченных в водороде при $t = 800, 900$ и 1000 °С, выявило, что повышение температуры спекания приводит к снижению их плотности (рис. 2).

Восстановительные реакции, протекающие внутри никелевой оболочки, вызывают образование влаги, а нагрев создает избыточное давление перегретых паров, приводящее к разбуханию частиц порошка и, следовательно, росту толщины образца ЛУМ. Указанные процессы интенсифицируются, если происходит уве-

личение продолжительности нагрева до температуры изотермического спекания, когда процесс термической консолидации частиц имеет приблизительно равную скорость с восстановительной реакцией (см. табл. 2). Повышение исходной плотности брикетов создает условия для более интенсивного уменьшения плотности с ростом температуры спекания (см. рис. 2). Это связано с тем, что образцы из плакированных частиц имеют большее давление газа внутри оболочки, если они изначально образуют более плотную металлическую матрицу, препятствующую при нагреве выходу газа из плакированной частицы. Снижается и сквозная пористость.

Осуществить рентгенофазовый анализ не удалось из-за технических трудностей получения образцов, уже содержащих 80 об.% твердой смазки (графита или нитрида бора). На основании проведенных исследований установлено, что при спекании в атмосфере водорода листовых материалов из порошков твердых смазок, плакированных никелем, с целью получения необходимых свойств предпочтительно применение более низких температур и более высоких скоростей нагрева.

Решение задачи

Устранение роста толщины ЛУМ из плакированных порошков НПГ-80 и Нибон-20 возможно применением спекания (нагрева) под давлением. Известны методы прокатки порошка, совмещенные с его разогревом в печи, установленной над горизонтально расположенными вальками. Здесь возникают трудности с однородным нагревом порошковой массы и поступлением ее в зоны формования. Используются также способы электроспекания в вальках переменным электрическим током с подведением его к валькам в разных конструктивных вариантах [2–4], но существуют проблемы, связанные со стационарностью процесса прокатки и электроспекания.

В НГТУ разработаны способ электроимпульсного спекания металлического порошка и установка для его осуществления [5]. Установка состоит из прокатного стана и генератора электрических импульсов. Импульсный электрический ток с регулируемой скважностью подводится к изолированным от прокатной клетки валькам-электродам. Электрический ток пропускают непосредственно между вальками. Для проведения процесса изготовления ЛУМ используются импульсные токи высокой плотности: 10^8 – 10^9 А/м².

Прокатка разнообразных порошков и композиций на установке электропрокатки позволила выявить особенности технологии формования и спекания новым методом. Установлена взаимосвязь размеров частиц, их упругих свойств и коэффициента обжата порошкового материала с видом процесса электро-

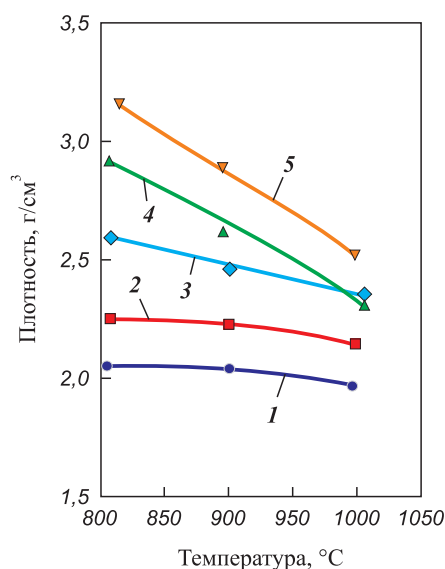


Рис. 2. Зависимость плотности брикетов из Нибон-20 от температуры спекания
Давление прессования, т/см²: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0; 5 – 2,5

Fig. 2. The dependence of the density of Nibon-20 pellets on the sintering temperature
Extrusion pressure, t/cm²: 1 – 0.5; 2 – 1.0; 3 – 1.5; 4 – 2.0; 5 – 2.5

прокатки. На основании математического моделирования температурного поля в системе частица–контакт–частица была разработана методика аналитических расчетов, позволяющая определять механизм (твердо- или жидкофазный) процесса электроспекания порошка при прокатке по известным ее параметрам, технологическим и электрофизическим свойствам порошков [6].

Методом электропрокатки получены экспериментальные ленточные материалы на основе порошков железа, коррозионно-стойких сталей, композиционных материалов [6].

Частицы твердой смазки нитрида бора в ЛУМ играют роль диэлектрических частиц, расположенных в токопроводящей металлической матрице материала, и оказывают влияние на электропрокатку. Свойства электропрокатанных порошковых материалов в большой степени зависят от способности к Джоулеву эффекту – с ростом последнего прочность межчастичных контактов и всего электропрокатанного материала повышается. При формировании металлического порошка прокаткой и другими способами формирования при воздействии на очаг деформации электрического тока и электромагнитного поля возникают электрофизические эффекты, упрочняющие материал и сам межчастичный контакт [7; 8]. Большую роль играют электрофизические свойства самого материала проводника, электропластический эффект и другие эффекты, на что серьезное внимание обращают зарубежные и отечественные исследователи [9–16].

Возникновение импульсного электромагнитного поля и протекание тока через формируемый порошковый материал расширили возможности метода формирования прокаткой. Так, исчезло осыпание краев ленты при прокатке высокотекучих порошков, что благотворно сказалось на макростроении порошкового триботехнического уплотнительного материала. Особенно это было заметно на таких важных порош-

ках, как Нибон-20 и НПГ-80, композициях порошков нихрома и нитрида бора. Пинч-эффект, приводящий к сжатию проводящего порошкового тела, повышал плотность материала [7] – это позволило получать порошковый прокат с большей прочностью межчастичного контакта [12].

В условиях формирования при прессовании с низким давлением (100 МПа) и одновременным пропусканием через прессовку из порошка Нибон-20 тока высокой плотности был получен уплотнительный порошковый материал с пористостью всего 3 %. С помощью электропрокатки могут быть изготовлены и другие ленточные материалы. Результаты исследований в области электрокомпактирования металлических порошковых материалов показывают упрочнение металлических материалов при воздействии электромагнитного поля [13–20]. Токи высокой плотности применяются в современных технологиях обработки металлических материалов [21–23].

С использованием традиционных элементов технологии и привлечением электропрокатки был разработан новый вариант технологии получения прокатанного ЛУМ из порошка Нибон-20. Порошок прокатывали на установке электропрокатки [5] в валках диаметром 0,2 м и шириной 0,02 м с наложением на очаг формирования электротока. Готовые ленты отвечали по свойствам прокату, прошедшему спекание в печах при температуре 900 °С. Полученные ленты разрезали и укладывали в пакеты из фольги никеля НП-2 толщиной 0,3 мм. Полученную сборку подвергали горячей прокатке на установке конструкции НГТУ при температуре 850 °С при степени деформации 20–25 % в среде водорода. Внешний вид плакированных никелем уплотнительных материалов показан на рис. 3.

По физико-механическим свойствам полученный материал соответствует требованиям к уплотнительным элементам турбин, например для ЛУМ на основе нихрома с твердой смазкой из нитрида

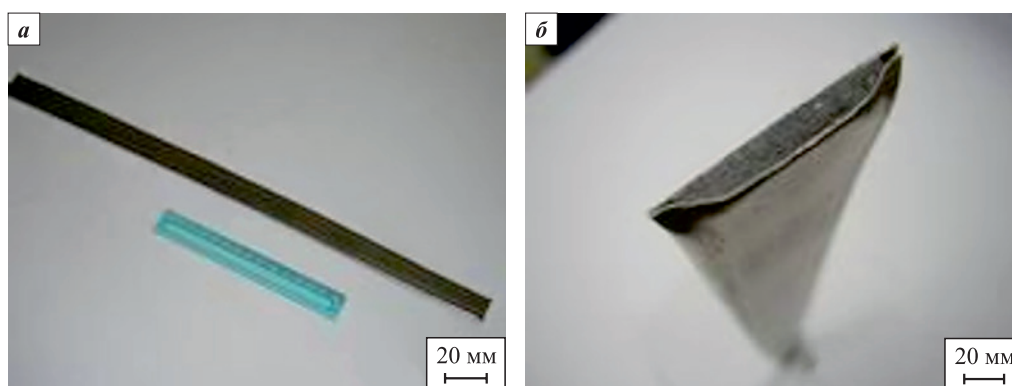


Рис. 3. Внешний вид элемента ЛУМ, плакированного никелем, из порошка Нибон-20
a – внешний вид ленты, *б* – ее торцевой срез

Fig. 3. Nickel-clad TSM element from Nibon-20 powder
a – the exterior of the tape, *b* – its cross-section



Рис. 4. Микроструктура ЛУМ из порошка НПГ-80 после электропрокатки и последующей горячей прокатки
Белая структура – никель, темная – графит

Fig. 4. The microstructure of TSM from NPG-80 powder after electric rolling and subsequent hot rolling
White substance – nickel, dark – graphite

бора. Так, исследуемый материал из Нибон-20 имеет прочность при растяжении 130–135 МПа, твердость 80–86 МПа, относительную плотность 94–95 %, толщину слоя уплотнительного материала 2,00–2,22 мм. Достоинством такого материала является высокое содержание неформующейся фазы (нитрида бора), которая в ЛУМ достигает 80 об. %, что сегодня не имеет аналогов.

На рис. 4 показана структура ЛУМ из НПГ-80. Здесь металлическая никелевая матрица толщиной 5–20 мкм имеет текстуру, направленную вдоль прокатки.

Закключение

Показано, что внутренние оксиды частиц порошка, восстанавливающиеся при спекании и отжиге в водороде, вызывают изменение размеров лент и прессовок из плакированных порошков НПГ-80 и Нибон -20. Увеличение температуры печного спекания и времени нагрева до изотермической выдержки интенсифицирует рост лент и образцов. Свойства ЛУМ, содержащих твердую смазку, зависят от режима прокатки и спекания.

Применение электропрокатки для плакированных порошков Нибон-20 и НПГ-80 позволяет формировать композиции, имеющие до 80 об. % твердой смазки, лента из которых пригодна для последующей горячей прокатки в пакетах. С помощью такой технологии возможно изготовление ЛУМ с высоким содержанием графита или нитрида бора.

Список литературы / References

1. Сорокин В.К. Производство порошкового проката. М.: Металлургиздат, 2002. 296 с.
2. Олевский Е.А., Александрова Е.В., Ильина А.М., Новоселов А.Н., Пельве К.Ю., Григорьев Е.Г. Электроконсолидация порошковых материалов. I. Методы

низковольтной и высоковольтной консолидации. *Физика и химия обработки материалов*. 2013;(2):53–64.

3. Олевский Е.А., Александрова Е.В., Ильина А.М., Новоселов А.Н., Пельве К.Ю., Григорьев Е.Г. Электроконсолидация порошковых материалов. II. Консолидированные материалы и моделирование процессов консолидации. *Физика и химия обработки материалов*. 2013;(4):45–68.
4. Olevsky E.A., Aleksandrova E.V., Ilyina A.M., Novoselov A.N., Pelve K.Yu., Grigoriev E.G. Electroconsolidation of powder materials. I. Methods of low and high-voltage consolidation. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2013;(2):53–64. (In Russ.).
5. Olevsky E.A., Aleksandrova E.V., Ilyina A.M., Novoselov A.N., Pelve K.Yu., Grigoriev E.G. Electroconsolidation of powder materials. II. Consolidated materials and simulation of the processes of consolidation. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2013;(4):45–68. (In Russ.).
6. Olevsky E.A., Aleksandrova E.V., Ilyina A.M., Dudina D.V., Novoselov A.N., Pelve K.Y., Grigoryev E.G. Outside mainstream electronic databases: Review of studies conducted in the USSR and post-soviet countries on electric current-assisted consolidation of powder materials. *Materials*. 2013;6(10):4375–4440. <https://doi.org/10.3390/ma6104375>
7. Mal'tsev I.M., Petrikov V.G. Installation for electric pulsed sintering of conducting powders during rolling. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1993;32(3):277–279. <https://doi.org/10.1007/BF00559764>
8. Мальцев И.М. Свойства порошкового электропроката. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011;(9):30–38.
9. Mal'tsev I.M. Properties of powdered electric rolling. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2011;(9): 30–38. (In Russ.).
10. Mal'tsev I.M. The effect of the electromagnetic field and skin and pinch effects on electrorolling metal powder materials under high-density pulse currents. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2009;50(2):142–146. <https://doi.org/10.3103/S1067821209020138>
11. Mal'tsev I.M. Electrical rolling of a metal powder in roll electrodes with a high-density current. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2010;51(4):342–346. <https://doi.org/10.3103/S1067821210040152>
12. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *Journal of Materials Research*. 2010;25(7):1215–1224. <https://doi.org/10.1557/JMR.2010.0170>
13. Nguyen-Tran H.D., Oh H.S., Hong S.T., Han H.N., Cao J., Ahn S.H., Chun D.M. A review of electrically-assisted manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2015;2(4):365–376. <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0045-4>
14. Xiang S., Xinfang Z. Dislocation structure evolution under electroplastic effect. *Materials Science and Engineering: A*. 2019;761:138026. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138026>
15. Мальцев И.М. Исследование электропрокатанных материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика мате-*

- риалов. 2018;84(11):36–41.
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-11-36-41>
 Mal'tsev I.M. Research of electrorolled materials. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2018; 84(11):36–41. (In Russ.).
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-11-36-41>
13. Pan L, He W., Gu B. Effects of electric current pulses on mechanical properties and microstructures of as-quenched medium carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;662:404–411.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.031>
 14. Tyler J., Grimm, Laine Mears. Electrically assisted pulse forming using closed-loop force control. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;71:528–540.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.029>
 15. Morsi K., El-Desouky A., Johnson B., Mar A., Lanka S. Spark plasma extrusion (SPE): Prospects and potential. *Scripta Materialia*. 2009;61(4):395–398.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.04.026>
 16. Desouky A.El., Moon K.S., Kassegne S.K., Morsi K. Green Compact temperature evolution during current-activated tip-based sintering (CATS) of nickel. *Metals*. 2013;3(2):178–187.
<https://doi.org/10.3390/met3020178>
 17. Zhylytsov A., Kondratenko I., Vasyuk V. Linear electro-mechanical transducer in the systems of welded joints of electrodynamic processing. In: *Handbook of research on energy-saving technologies for environmentally-friendly agricultural development*. IGI Global, 2020. P. 32.
<https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9420-8.ch016>
 18. Fais A., Actis Grande M., Forno I. Influence of processing parameters on the mechanical properties of Electro-Sinter-Forged iron based powders. *Materials & Design*. 2016;93:458–466.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.142>
 19. Deng H., Dong J., Boi F., Saunders T., Hu C., Grasso S. Magnetic field generated during electric current-assisted sintering: from health and safety issues to Lorentz force effects. *Metals*. 2020;10(12):1653.
<https://doi.org/10.3390/met10121653>
 20. Wang Q., Ma Z., Wang X., Zhai Z. Study on the electromagnetic stress of the crack tip on a current-carrying metal plate. *Shenyang Jianzhu Gongcheng Xueyuan Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2010;26(3):571–574.
 21. Stolyarov V., Rubanik V. Cold rolling electrostimulation of hard-deform alloys. *Key Engineering Materials*. 2022;910:308–313. <https://doi.org/10.4028/p-fcq55e>
 22. Pan L., He W., Gu B. Non-uniform carbon segregation induced by electric current pulse under residual stresses. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;226: 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.017>
 23. Sorokova S.N., Knyazeva A.G., Pobol A.I., Goranskyi G.G. Mathematical modeling of pulsed electro contact sintering of carbide powder composition. *Advanced Materials Research*. 2014;1040:495–499.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.495>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Илья Михайлович Мальцев – к.т.н, доцент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева

ORCID: 0000-00023464-9372

E-mail: Maltcev@nntu.ru

Юрий Андреевич Гетмановский – ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», НГТУ им. Р.Е. Алексеева

ORCID: 0000-0002-4338-3414

E-mail: getmanovskij@yandex.ru

Il'ya M. Mal'tsev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof. of the Department "Materials science, technologies of materials and heat treatment of metals" of Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU) n.a. R.E. Alekseev

ORCID: 0000-00023464-9372

E-mail: Maltcev@nntu.ru

Yurii A. Getmanovsky – Assistant of the Department "Materials science, technologies of materials and heat treatment of metals" of NNSTU n.a. R.E. Alekseev

ORCID: 0000-0002-4338-3414

E-mail: getmanovskij@yandex.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

И. М. Мальцев – руководство исследованием, постановка основной концепции, постановка целей и задач исследования, формулирование выводов, проведение расчетов, тестирование образцов, анализ результатов исследования, написание и корректировка текста.

Ю. А. Гетмановский – подготовка, проведение и руководство экспериментами, ресурсное обеспечение, обработка результатов исследований.

I. M. Mal'tsev – research guidance, basic concept statement, statement of research goals and objectives, drawing conclusions, calculations conducting, samples testing, research results analysis, text writing and correction.

Yu. A. Getmanovsky – preparation, conducting and management of experiments, resources provision, research results processing.

Статья поступила 23.03.2022 г.
 Доработана 29.04.2022 г.
 Принята к публикации 11.05.2022 г.

Received 23.03.2022
 Revised 29.04.2022
 Accepted 11.05.2022