

УДК 621.98.044.7

**А. М. Милюкова**, кандидат технических наук,  
**А. Н. Матяс, А. А. Лях, О. А. Толкачева**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,  
ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 267 60 10,  
+375 (017) 361 55 52, priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведены исследования физико-механических свойств магниевых сплавов (температура, твердость, шероховатость, остаточные макронапряжения) до и после магнитно-импульсной обработки при различных режимах. Показано, что магнитно-импульсное воздействие при определенных параметрах режимов позволяет улучшить физические и механические свойства исследуемых сплавов.

**Ключевые слова:** магнитные сплавы; магнитно-импульсная обработка; энергия; импульс; упрочнение; физические и механические свойства.

Рис. 7. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

**A. M. Miliukova**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**A. N. Matsias, A. A. Lyakh, O. A. Tolkachova**

State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 220084  
Minsk, the Republic of Belarus, 10 Academician Kuprevicha Str., +375 (17) 367 60 10, 375 (17) 361 55 52,  
priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

## STUDY OF THE MAGNESIUM ALLOYS PROPERTIES AFTER MAGNETIC PULSE PROCESSING

Physical and mechanical properties of magnesium alloys have been studied (temperature, hardness, roughness, residual stresses) before and after magnetic-pulse processing under various conditions. It is shown that the magnetic-pulse effect under certain optimal conditions can improve the physical and mechanical properties of the studied alloys.

**Key words:** magnesium alloys, magnetic-pulse processing; energy; impulse; hardening; physical and mechanical properties.

Fig. 7. Table 3. Ref.: 6 titles.

**Введение.** Целью работы является исследование воздействия сильного импульсного магнитного поля и определение его параметров, обеспечивающих улучшение физических и механических свойств образцов из магниевых сплавов AZ80 (Китай), МА 2-1 (Россия), изготовленных по различным технологиям.

Механические свойства металлических сплавов определяются химическим составом материала, твердостью, микротвердостью, структурными и фазовыми превращениями, величиной, знаком и глубиной остаточных макронапряжений, деформацией кристаллической решетки и др.

Учеными ФТИ НАН Беларуси (Минск) и БарГУ (Барановичи) успешно развивается инновационное научное направление — магнитно-импульсная упрочняющая обработка (далее — МИО) поверхностей изделий из стали и сплавов. При воздействии МИО на металлические сплавы устраняются дефекты в их кристаллической решетке, выравниваются внутренние макронапряжения, что снижает трещинообразование, измельчается и становится более однородной структура металла в поверхностном слое, что в итоге обеспечивает повышение прочности изделий и увеличивает срок их эксплуатации [1].

Экспериментальный и научный опыт применения сильного импульсного электромагнитного поля показал эффективное и подтвержденное повышение периода работоспособности различных изделий (инструментов), применяемых в дерево- и металлообрабатывающей, машиностроительной, авиаремонтной и пищевой отраслях промышленности как на предприятиях Республики Беларусь, так и за рубежом [2; 3].

Свойства поверхности металлических изделий улучшаются под воздействием электромагнитных импульсов вследствие поверхностных микродеформаций, уплотнения структуры вблизи поверхности, а также фазовых превращений «аустенит—мартенсит» в сталях, миграции примесей вблизи границ зерен, возникновения мелкодисперсной структуры на поверхности, связанного с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [3; 4]. Эти процессы появляются в связи с неоднородностью металлического сплава и локальным выделением теплоты вблизи границ зерен, а также в местах различных дефектов при протекании вихревых индукционных токов, возникающих в образце в электромагнитном поле [3].

Известно, что металлы с гексагональной решеткой обладают повышенным уровнем анизотропии свойств, а также низкой пластичностью при комнатной температуре. Авторы [5] указывают, что один из способов улучшить пластичность сплава магния в холодном состоянии — модифицировать его гексагональную кристаллическую решетку, уменьшив осевое отношение граней  $c/a$  либо полностью превратив его в структуру с кубической решеткой (например, ОЦК).

В настоящее время магниевые сплавы широко применяют в машиностроении, авиастроении, ракетной технике, так как при малой объемной массе они имеют высокую удельную прочность, что позволяет снизить массу двигателей, агрегатов, корпусов и других узлов техники. Ценным свойством магниевых сплавов является то, что они хорошо поглощают механические вибрации. В зависимости от химического состава их разделяют на три основные группы [6]:

I — сплавы на основе системы Mg—Al—Zn (улучшенные прочность, пластичность, литейные свойства при комнатной температуре);

II — Mg—Zn—Zr (одни из наиболее прочных деформируемых сплавов);

III — Mg—PЗМ—Zr (дорогостоящие высокопрочные сплавы, включающие редкоземельные металлы (PЗМ)).

Высокопрочные магниевые сплавы содержат дорогостоящие редкоземельные металлы, что делает стоимость таких сплавов достаточно высокой. Для снижения их стоимости актуальным является поиск новых решений, в том числе технологических, включающих оптимизацию микроструктуры и, следовательно, физических свойств (прочность, вязкость и др.).

В данной работе предложено применить МИО на двух магниевых сплавах I группы AZ80, MA 2-1 и исследовать изменение физических свойств поверхности под воздействием различных параметров режимов магнитно-импульсных установок, отличающихся длительностью импульса обработки.

**Материалы и методы исследования.** К исследованию различных свойств поверхности предложено два магниевых сплава, различающихся химическим составом в процентном содержании элементов и технологией получения. Три группы образцов сплава AZ80 диаметром 20 мм и длиной 40 мм получены в Китайской Народной Республике интенсивной пластической деформацией (экструзией под углом) при температурах 300, 350 и 400 °С. Из них изготовлены образцы в виде таблеток толщиной 5 мм и диаметром 20 мм, которые маркированы тройной нумерацией (1.1.1, 2.1.1, 3.1.1 и т. д.) для проведения исследований. Образцы сплава MA 2-1 отрезаны от прутка диаметром 30 мм, полученного горячей прокаткой.

Химический состав исследуемых магниевых сплавов представлен в таблице 1.

Таблица 1. — Химический состав исследуемых магниевых сплавов

Марка	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Gd	Y
AZ80	91,85	8,16	0,42	0,03	0,01	0,005	0,001	0,001	0,01	0,01
MA 2-1	94,00	3,80...5,00	0,80...1,50	0,30...0,70	0,01	0,005	0,001	0,001	0,01	0,01

Образцы магниевых сплавов подвергнуты воздействию импульсного магнитного поля (далее — ИМП) при помощи высокоскоростного магнитно-импульсного оборудования (МИУ-3 — цилиндрический и плоский индукторы, МИП-18 — плоский индуктор) и экспериментальной магнитно-импульсной установки (далее — МИУ) с увеличенной длительностью импульса МИУ 20-21 (цилиндрический индуктор), характеристики которых представлены в таблице 2.

Таблица 2. — Основные технические характеристики МИУ

Характеристики	МИП-18	МИУ-3	МИУ 20-21
Максимальная запасаемая энергия воздействия, кДж	15,0	8,0	—
Максимальное рабочее напряжение, В	13 000	6 000	220
Емкость накопителя, мкФ	180	450	—
Мощность, потребляемая установкой от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц, не более, ВА	3 000	3 000	> 20 000
Напряжение импульса, до, В	12 000	6 000	300
Ток импульса, до, А	50 000	50 000	800
Частота импульса, до, Гц	10 000	10 000	100
Напряженность магнитного поля в индукторе, кА / м	< 17 000	< 17 000	900

Выбранное магнитно-импульсное оборудование при обработке образцов из магниевых сплавов обеспечивает необходимые значения основных переменных параметров процесса МИО: энергия импульса — 8 кДж, частота импульса — 6...8 кГц для МИУ-3 (МИП-18); энергия импульса — 1 кДж при частоте 5...100 Гц для МИУ 20-21, длительность обработки на различном оборудовании отличается и составляет 50...500 мкс на МИУ-3 (МИП-18); 0,1...5,0 с — на МИУ 20-21.

Образцы магниевых сплавов для осуществления МИО располагали в ИМП, создаваемом в индукторах (плоском или цилиндрическом), таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны исследуемой стороне образца и пронизывали ее. Геометрия ИМП не изменялась во всех экспериментах.

Влияние параметров режимов МИО на механические и физические свойства поверхности образцов магниевых сплавов (температуру, твердость НВ, шероховатость  $Ra$ , суммарные макронапряжения 2-го рода, индукцию) исследовали по стандартным методикам на имеющемся исследовательском оборудовании. Твердость поверхности НВ измеряли на твердомере ТШ-2М (с погрешностью измерений 3 %). Внутренние остаточные макронапряжения 2-го рода и структурно-фазовый состав определяли методом рентгеновского структурного анализа с помощью дифрактометра GNR Explorer (Италия) при  $CuK\alpha$ -излучении, шаге съемки  $0,20^\circ$ , времени интеграции 3 с. Шероховатость поверхности  $Ra$  измеряли с помощью профилографа цехового с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем модели 296. Магнитную индукцию ИМП в индукторе, а также на поверхности образцов измеряли миллитесламетром марки ТП2-2У. Измерения температуры поверхности образцов после обработки измеряли мультиметром ALEX 9808+ с термопарой ТХА (ГОСТ 1790) с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ .

**Результаты исследования и их обсуждение.** Магнитно-импульсную упрочняющую обработку подготовленных образцов двух марок магниевых сплавов AZ80 и МА 2-1 проводили при семи различных технологических режимах (таблица 3). Образцы сплава AZ80, полученные при различных температурах экструзии, разбиты на три группы — № 1, 2, 3, которые были обработаны на трех МИУ в цилиндрическом и на плоском индукторах при режимах № 1—5 (см. таблицу 3).

Четвертую группу образцов из сплава МА 2-1 (МА1, МА2) подвергли МИО на МИУ-3 и МИП-18 при различных режимах 6 и 7 (см. таблицу 3).

Два экспериментальных технологических режима 4, 5 на МИУ 20-21 отличаются напряженностью магнитного поля и длительностью импульса. Плоские образцы в виде таблетки, маркированные номерами 1.6.1 (300 °С), 2.6.1 (350 °С), 3.6.1 (400 °С), обрабатывали при режиме 4: в цилиндрическом индукторе Ø70 мм при частоте 50 Гц с напряженностью магнитного поля  $0,45 \cdot 10^6$  А / м и током импульса, равным 300 А. Обработку проводили импульсами с длительностью 1,6 с в 3 цикла с выдержкой между циклами 10 мин.

Образцы с номерами 1.6.2 (300 °С), 2.6.2 (350 °С), 3.6.2 (400 °С) обрабатывали при режиме 5: в цилиндрическом индукторе Ø70 мм при частоте 100 Гц с напряженностью магнитного поля  $0,53 \cdot 10^6$  А / м и током импульса, равным 390 А, с длительностью импульса 1 с в 3 цикла с выдержкой между циклами 10 мин.

Измерение магнитной индукции на поверхности всех образцов показало, что до и после МИО по выбранным режимам она равнялась нулю, поскольку парамагнитные материалы практически не намагничиваются под воздействием внешнего магнитного поля.

Проведенный рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов показал, что сплавы в основном состоят из магния с гексагональной кристаллической решеткой; до и после МИО на всех МИУ их фазовый состав (рисунок 1) и форма решетки не изменились.

Результаты исследований суммарных остаточных макронапряжений 2-го рода образцов сплава AZ80, обработанных на всех МИУ, представлены на рисунке 2.

Величина суммарного остаточного макронапряжения 2-го рода на поверхности образцов сплава AZ80 несколько снизилась при МИО на режимах 1, 3, приведших к нагреву до 40 °С. При МИО образцов на режиме 2, повысившем температуру свыше 50 °С, макронапряжения увеличились. После МИО установлено значительное снижение до нуля и изменение знака суммарных макронапряжений на поверхности нескольких образцов с растягивающего на сжимающее, что способствует увеличению прочности деформированного магниевого сплава AZ80, за счет залечивания микротрещин снижается трещинообразование.

Таблица 3. — Технологические режимы МИО образцов магниевого сплава

Режим	Маркировка образца из сплава				Наименование магнитно-импульсного оборудования	Технологические характеристики		
	№ 1 (300 °С)	№ 2 (350 °С)	№ 3 (400 °С)	№ 4 (прокат)		Энергия импульса, кДж	Количество импульсов	Частота, Гц
1	1.1.1	2.1.1	3.1.1		МИУ-3, ЦИ 20	8	2	6 000
2	1.1.2	2.1.2	3.1.2		МИУ-3, ПИ 140	8	2	6 800
3	1.4.1	2.4.1	3.4.1		МИП-18, ПИ 140	8	2	8 000
4	1.6.1	2.6.1	3.6.1		МИУ 20-21, ЦИ 70	1	3 × 1,6 с	50
5	1.6.2	2.6.2	3.6.2		МИУ 20-21, ЦИ 70	1	3 × 1 с	100
6				МА1	МИУ-3, ПИ 140	6	1	6 800
7				МА2	МИП-18, ПИ 140	8	3	8 000

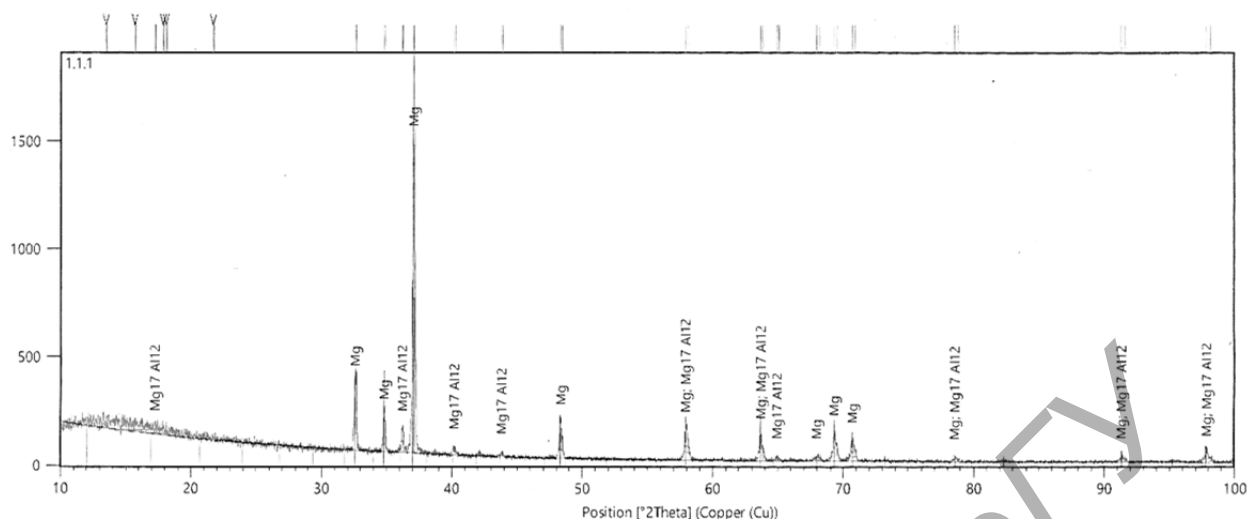


Рисунок 1. — Структурно-фазовый состав образца 1.1.1 магниевого сплава AZ80, полученного экструзией при 300 °С

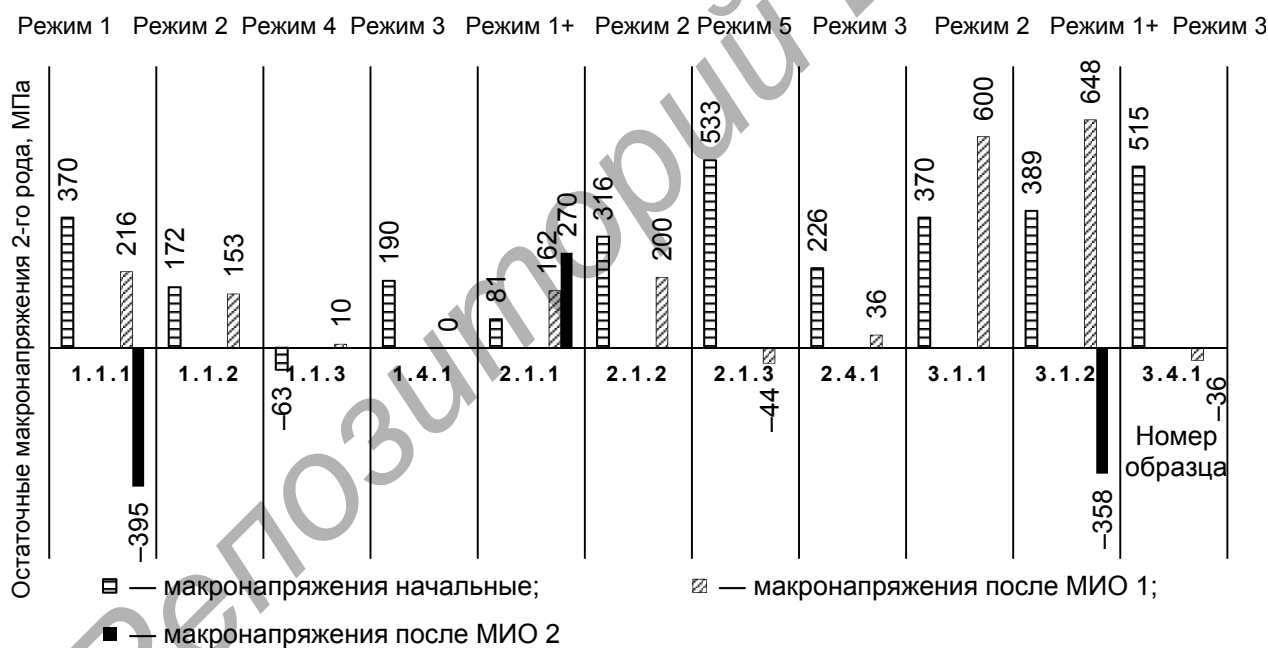


Рисунок 2. — Суммарное остаточное макронапряжение 2-го рода образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО при режимах 1—5

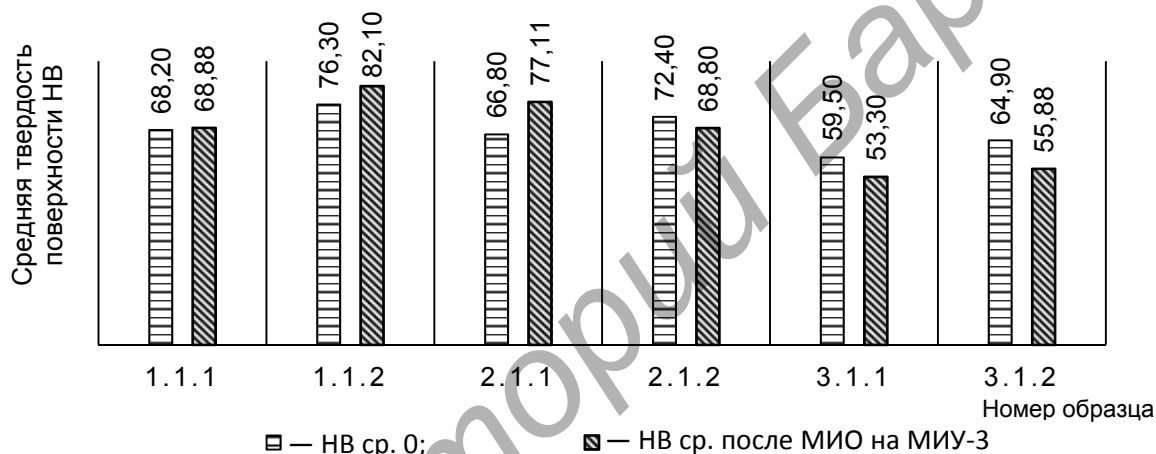
Так, МИО образцов сплава МА 2-1 (МА1) на установке МИУ-3 с плоским индуктором при режиме 6 разогревает поверхность образцов магниевого сплава незначительно (до 26 °С). На поверхности этих образцов обнаружено изменение знака суммарных макронапряжений с растягивающего на сжимающее, что способствует увеличению прочности материала. МИО образца МА2 на установке МИП-18 (режим 7) при высоких токах в индукторной системе при повышении энергии и длительности воздействия сильнее разогревает образец магниевого сплава (до 34 °С), при этом величина растягивающего макронапряжения на поверхности образцов незначительно увеличилась.

Количественно эффект влияния ИМП на определенное свойство характеризовался относительным изменением среднего значения в процентах, которое было измерено и рассчитано до и после МИО.

МИО образцов сплава МА 2-1 на МИУ-3 при режиме 6 способствует повышению среднего значения твердости НВ с 62 до 65 (на 4,8 %) и снижению шероховатости  $Ra$  на 20 %. МИО на МИП-18 при режиме 7 повышает среднее значение твердости НВ с 63 до 65 (на 3 %), а среднюю величину шероховатости  $Ra$  снижает на 10 %.

МИО AZ80 на установке МИУ 20-21 при режимах 4, 5 не повышает температуру и индукцию поверхности образцов в отличие от установки МИУ-3 с цилиндрической индукторной системой.

На рисунке 3 показаны результаты измерений средней твердости НВ поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на высокоскоростной установке МИУ-3 на двух типах индукторной системы.



**Рисунок 3. — Твердость поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до (1 столбик) и после МИО (2 столбик) на установке МИУ-3 при режимах 1, 2**

МИО по режиму 1 на установке МИУ-3 в цилиндрическом индукторе (образцы сплава AZ80 1.1.1, 2.1.1, 3.1.2) с минимальным зазором между спиралью индуктора разогревает поверхность образцов магниевого сплава до 40...60 °С. При этом среднее значение твердости НВ образца 1.1.1 (получен экструзией при 300 °С) не изменилось, образца 2.1.1 (получен экструзией при 350 °С) — повысилось до 15,4 %, а образца 3.1.2 (получен экструзией при 400 °С) — понизилось на 14,0 %. Такой результат свидетельствует о различных свойствах сплава, полученного при различных температурах. Для образцов, полученных при 350 °С, режим 1 подходит для повышения твердости поверхности.

На рисунке 4 показаны результаты измерений средней твердости НВ поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на высокоскоростной установке МИП-18 при режиме 3.

МИО при режиме 3 на установке МИП-18 при использовании плоского индуктора температуру образца магниевого сплава AZ80 повышает на 2-3° (до 26 °С), увеличивает среднее значение твердости НВ на образце 1.4.1 на 8,6 % и снижает шероховатость  $Ra$  на 12,5 % (рисунок 5). На образце 2.4.1 (получен при 350 °С) твердость НВ повысилась на 10,3 %, шероховатость  $Ra$  снизилась на 6,4 %. Данный режим 3 рекомендуется использовать не только для снижения шероховатости поверхности, но и для повышения среднего значения твердости магниевого сплава, полученного при 300...350 °С, поскольку на образце 3.4.1, который получен при 400 °С, шероховатость  $Ra$  снизилась на 7,2 %, твердость НВ снизилась на 16,3 %.

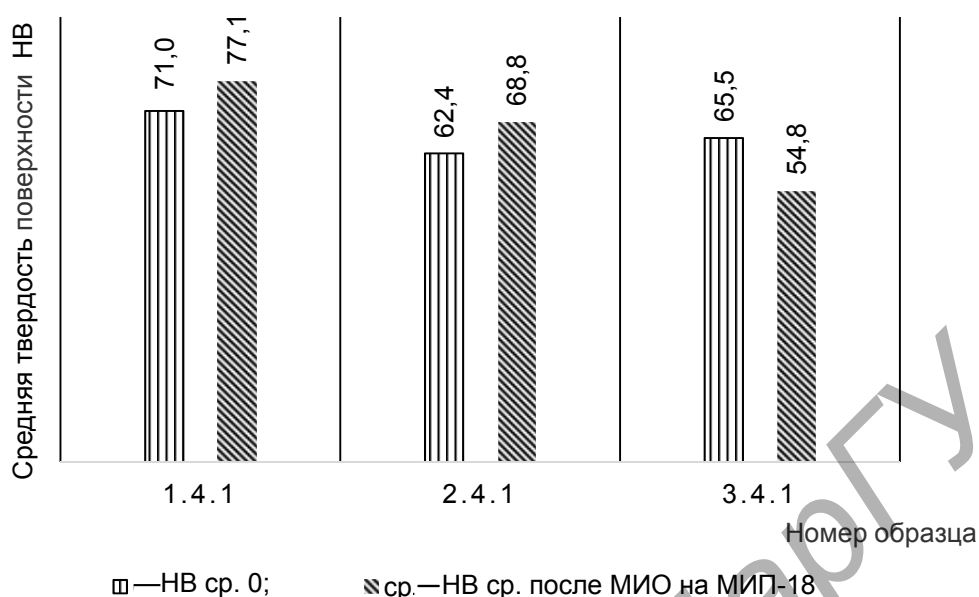


Рисунок 4. — Твердость поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на установке МИП-18 (режим 3)

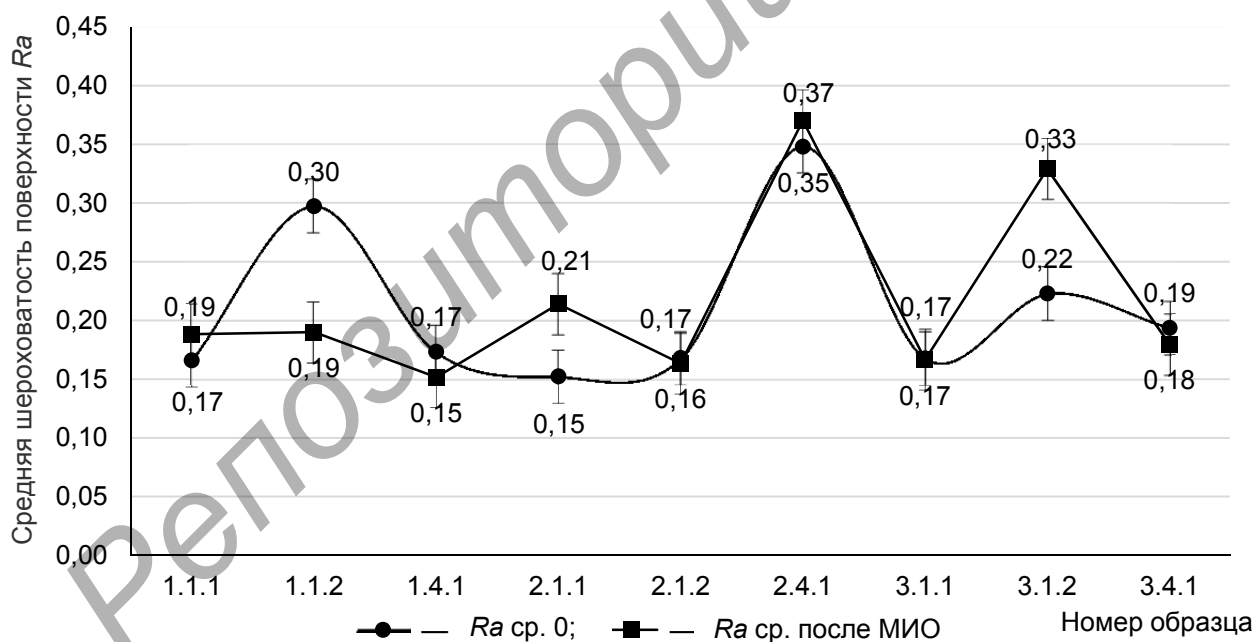
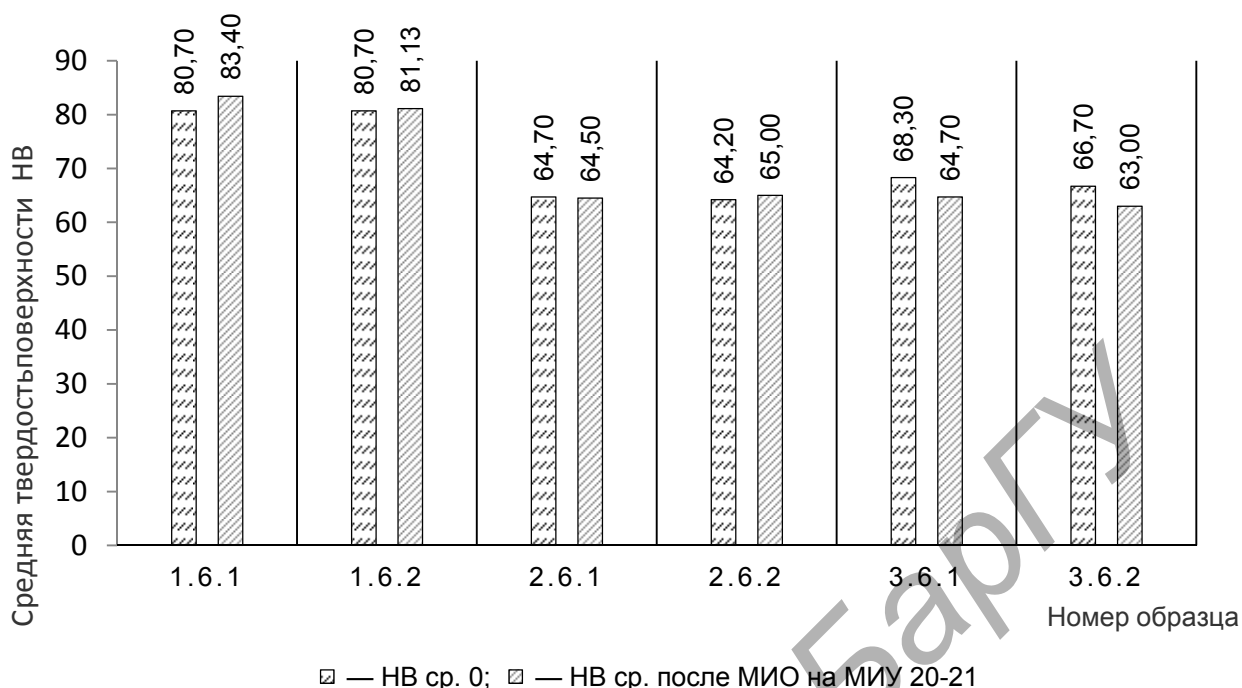


Рисунок 5. — Средняя шероховатость Ra поверхности образцов магниевого сплава до и после МИО на высокочастотном оборудовании (режимы 1, 2, 3)

На рисунке 6 показаны результаты измерений средней твердости НВ поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО при режимах 4, 5 на установке МИУ 20-21.

Исследования образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на режимах 4, 5 показали увеличение среднего значения твердости поверхности НВ до 3,3 % (в пределах погрешности измерений) на образце 1.6.1, полученном экструзией при температуре 300 °С, а также снижение до 5,5 % на образце 3.6.2, полученном экструзией при температуре 400 °С, т. е. влияние этих режимов на твердость поверхности незначительное.



**Рисунок 6. — Твердость поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на установке МИУ 20-21 (режимы 4, 5)**

Из анализа представленных результатов экспериментов МИО и исследований свойств поверхности образцов магниевых сплавов в поперечном сечении, изготовленных по различным технологиям деформации (прокатка, экструзия), очевиден вывод, что повышение температуры материала свыше 50 °С под воздействием МИО имеет разрушающее влияние на свойства поверхности образцов магниевого сплава. Дальнейшие исследования позволят это проверить.

Для исследования влияния увеличенной длительности МИО на магниевые сплавы применили новую экспериментальную МИУ 20-21, созданную в лаборатории магнитно-импульсных технологий ФТИ НАН Беларуси. Она обеспечивает ток через индуктор до 700 А, который представляет собой «пачки» импульсов частотой 50 или 100 Гц и длительностью от 0,1 до 5,0 с, что позволяет получить в индукторе пачки импульсов от 10 до 1 000 и более.

На рисунке 7 представлены результаты исследований суммарных остаточных макро-напряжений образцов магниевого сплава AZ80, обработанных сначала на МИУ-3 (МИО 1) и получивших значительное повышение макро-напряжений, затем на МИУ 20-21 (МИО 2), которая сняла эти макро-напряжения.

После МИО 2 произошло изменение знака суммарных макро-напряжений 2-го рода на поверхности двух образцов сплава AZ80 1.1.1 (получен экструзией при 300 °С) и 3.1.2 (получен экструзией при 400 °С) с растягивающего на сжимающее.

Таким образом, анализ результатов исследований свойств поверхности образцов магниевых сплавов AZ80 и МА 2-1 позволил установить, что МИО на установке МИУ 20-21 по выбранным режимам способна на изменение знака суммарных макро-напряжений 2-го рода с растягивающего на сжимающее, что способствует увеличению прочности деформированного магниевого сплава за счет снижения вероятности процессов разрушения.

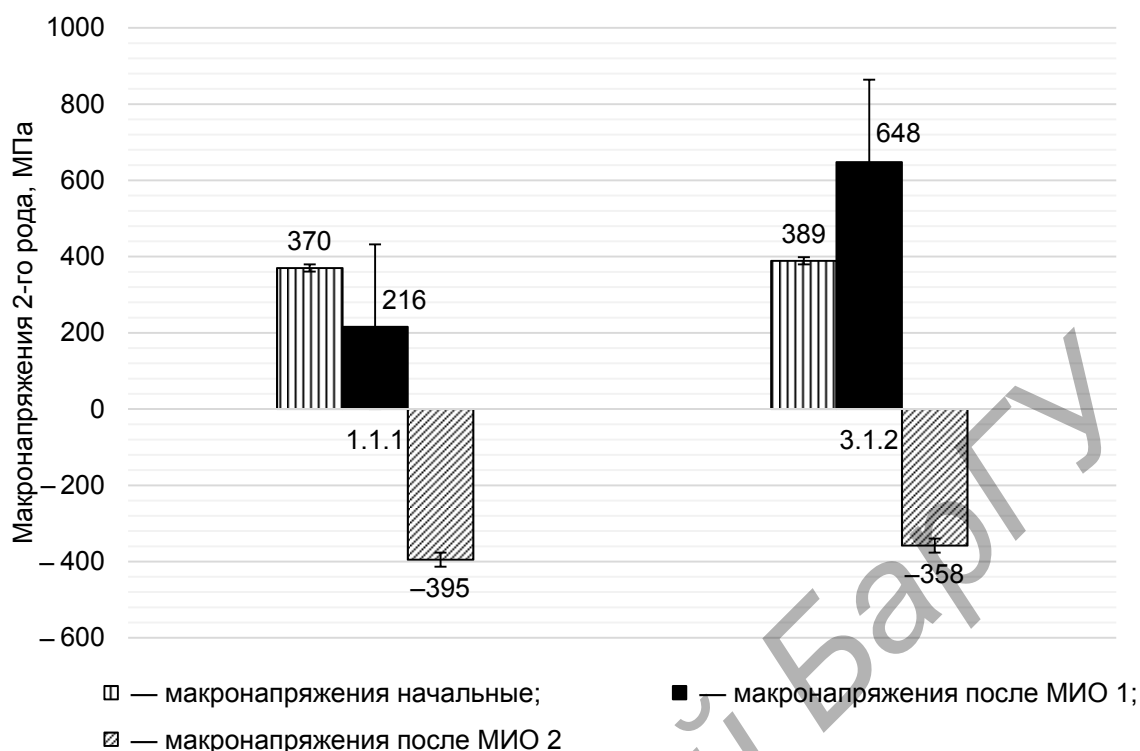


Рисунок 7. — Суммарное остаточное макронапряжение образцов магниевого сплава AZ80 до и после последовательной МИО на МИУ-3, затем на МИУ 20-21

**Заключение.** Результаты проведенных исследований показали, что применение МИО на парамагнитных магниевых сплавах системы Mg—Al—Zn, полученных различными деформационными технологиями (прокатка, интенсивная пластическая деформация — экструзия при различных температурах), позволяет улучшить свойства поверхности и, соответственно, повысить прочность.

Путем МИО при использовании различных технологических режимов на высокоскоростном магнитно-импульсном оборудовании (МИУ-3, МИП-18) улучшили свойства поверхностного слоя образцов магниевых сплавов в нужном направлении: повысили твердость НВ на 10...15 % и снизили шероховатость  $Ra$  на 12...36 %.

На экспериментальной низкочастотной установке с увеличенной длительностью импульса МИУ 20-21 на большинстве образцов получили изменение знака суммарных макронапряжений 2-го рода с растягивающего на сжимающее.

В совокупности эти результаты при дальнейших исследованиях позволят определить механизмы повышения прочности деформированного магниевого сплава за счет снижения вероятности процессов разрушения.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ в рамках совместного белорусско-китайского проекта по договору № T23КИ-003.

#### Список цитированных источников

1. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милокова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — Гл. 2. — С. 31—52.

2. *Малыгин, Б. В.* Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
4. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
5. *Петров, А. А.* Магниево-алюминиевые сплавы: перспективные отрасли применения, преимущества и недостатки (обзор). Ч. 1 : Применение в медицине. Кристаллографические факторы, влияющие на коррозионную стойкость магниевых сплавов / А. А. Петров, К. А. Сперанский // Тр. ВИАМ. — № 11 (105). — С. 12—24.
6. Магниево-алюминиевые сплавы : справочник / под ред. И. И. Гуреева, М. В. Чухрова. — М. : Металлургия, 1978. — Ч. 2 : Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов. — 273 с.

Поступила в редакцию 25.09.2023.

Репозиторий БарГУ