

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**УПРОЧНЯЮЩАЯ  
И ФИНИШНАЯ АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДЕТАЛЕЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

Под редакцией Л. М. Акуловича

Минск  
БГАТУ  
2022

**Авторы:**

доктор технических наук, профессор *Л. М. Акулович* (введение и заключение, структура, общее редактирование, главы 1, 3, 4);  
кандидат технических наук, доцент *А. В. Миранович* (главы 2, 4);  
кандидат технических наук, доцент *Л. Е. Сергеев* (главы 2, 3);  
кандидат технических наук *О. Н. Ворошуха* (глава 4)

**Упрочняющая** и финишная абразивная обработка в магнитном поле деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович [и др.]; под редакцией Л. М. Акуловича. – Минск : БГАТУ, 2022. – 360 с. : ил. – ISBN 978-985-25-0190-3.

Приведены результаты научных исследований процессов восстановления изношенных поверхностей деталей магнитно-электрическим упрочнением и повышения их физико-механических свойств при упрочняющей магнитно-абразивной обработке. Описан механизм формирования износостойких покрытий из ферромагнитных порошков под действием электрических разрядов в магнитном поле и др.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских институтов, машиностроительных и ремонтных предприятий, а также будет полезна аспирантам, магистрантам и студентам технических специальностей учреждений высшего образования.

Табл. 42. Ил. 158. Библиогр.: 141 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (протокол № 1 от 11 января 2022 г.)

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор, начальник отделения технологий машиностроения и металлургии Объединенного института машиностроения НАН Беларуси *В. И. Жорник*;

доктор технических наук, профессор, заведующий отраслевой научно-исследовательской лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» *О. Г. Девойно*

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ . . . . .	7
ВВЕДЕНИЕ . . . . .	8
1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССАХ УПРОЧНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН . . . . .	13
1.1. Магнитные свойства металлов . . . . .	14
1.2. Намагничивание ферромагнетиков . . . . .	19
1.3. Методы упрочнения поверхностей деталей машин в магнитном поле . . . . .	23
1.4. Ориентация ферромагнитных частиц в магнитном поле в процессах упрочнения поверхностей деталей машин . . . . .	36
2. МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ . . . . .	45
2.1. Механизм нанесения покрытий при магнитно-электрическом упрочнении . . . . .	45
2.1.1. Стадии процесса формирования точечного вкрапления . . . . .	45
2.1.2. Механизм действия сил при электрическом разряде . . . . .	48
2.1.3. Тепловые процессы в рабочей зоне при воздействии электромагнитного поля . . . . .	52
2.1.4. Модели тепловых процессов в поверхностном слое упрочняемой детали . . . . .	55
2.2. Исследование стабильности процесса магнитно-электрического упрочнения . . . . .	59
2.2.1. Влияние вида источника технологического тока на стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения . . . . .	59
2.2.2. Влияние параметров магнитного поля на стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения . . . . .	67
2.3. Проектирование магнитопроводов на основе постоянных магнитов . . . . .	88
2.3.1. Методика расчета параметров магнитной системы . . . . .	89
2.3.2. Определение конструктивных параметров магнитной системы на основе постоянных магнитов . . . . .	95
2.3.3. Синтез магнитопроводов различной конфигурации с использованием постоянных магнитов . . . . .	97

2.4. Исследование технологических параметров магнитно-электрического упрочнения . . . . .	104
2.4.1. Моделирование процесса магнитно-электрического упрочнения . . . . .	104
2.4.2. Влияние технологических факторов на параметры оптимизации . . . . .	108
2.4.3. Оптимизация технологических режимов магнитно-электрического упрочнения . . . . .	116
2.5. Исследование физико-механических свойств поверхностного слоя после магнитно-электрического упрочнения . . . . .	121
2.5.1. Материалы для нанесения покрытий . . . . .	121
2.5.2. Микроструктура поверхностных слоев . . . . .	123
2.5.3. Микротвердость поверхностного слоя . . . . .	126
2.5.4. Пористость, сплошность и разнотолщинность покрытий . . . . .	128
2.5.5. Износостойкость упрочненных поверхностей . . . . .	135
<b>3. ФИНИШНАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН . . . . .</b>	<b>145</b>
3.1. Ферроабразивные порошки . . . . .	147
3.1.1. Материалы ферроабразивных порошков . . . . .	147
3.1.2. Магнитная проницаемость и насыпная плотность ферроабразивных порошков . . . . .	155
3.2. Магнитно-абразивный инструмент . . . . .	159
3.2.1. Формирование ферроабразивного инструмента . . . . .	159
3.2.2. Механизм стружкообразования при магнитно-абразивной обработке . . . . .	174
3.2.3. Способы магнитно-абразивной обработки . . . . .	183
3.3. Магнитно-абразивная обработка типовых поверхностей . . . . .	193
3.3.1. Обработка поверхностей простейших форм . . . . .	193
3.3.2. Обработка фасонных поверхностей . . . . .	203
3.4. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей тел вращения . . . . .	214
3.4.1. Расчет топографии магнитного поля для магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей . . . . .	214
3.4.2. Компьютерное моделирование топографии магнитного поля при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения . . . . .	222
3.4.3. Компьютерное моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке деталей сферической формы . . . . .	223

3.4.4. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке мелко модульных зубчатых колес . . . . .	226
3.4.5. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке наружных конических поверхностей . . . . .	227
3.4.6. Моделирование магнитного поля при магнитно-абразивной обработке внутренних конических поверхностей . . . . .	230
3.5. Экспериментальные исследования магнитно-абразивной обработки . . . . .	232
3.5.1. Топография магнитного поля при MAO беговых дорожек внутренних колец подшипников качения . . . . .	232
3.5.2. Факторный анализ процесса магнитно-абразивной обработки по производительности и качеству поверхности . . . . .	236
3.5.3. Исследование технологических режимов магнитно-абразивной обработки . . . . .	240
3.5.4. Влияние смазочно-охлаждающих технологических средств на сьем металла при магнитно-абразивной обработке . . . . .	246
<b>4. КОМБИНИРОВАННЫЕ И СОВМЕЩЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ . . . . .</b>	<b>270</b>
4.1. Упрочняющая финишная магнитно-абразивная обработка поверхностей деталей машин . . . . .	270
4.1.1. Формирование в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке абразивной «щетки» и ее режущая способность. . . . .	270
4.1.2. Методы повышения производительности магнитно-абразивной обработки и качества обработанных поверхностей . . . . .	275
4.1.3. Методы исследования топографии магнитного поля . . . . .	288
4.2. Механизм ориентации ферроабразивных зерен в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке . . . . .	290
4.2.1. Обобщенная модель формы ферроабразивного зерна . . . . .	290
4.2.2. Теоретическое исследование ориентации единичного ферроабразивного зерна в процессе резания . . . . .	294
4.2.3. Экспериментальные исследования влияния угла наклона оси ферроабразивных зерен на производительность и шероховатость поверхности . . . . .	301
4.2.4. Методы изменения направления магнитных силовых линий для реализации управляемого ориентированного резания . . . . .	303
4.3. Метод регенерации абразивной «щетки» в процессе магнитно-абразивной обработки . . . . .	311
4.3.1. Разработка схемы магнитной системы для регенерации абразивной «щетки» . . . . .	313

4.3.2. Влияние параметров импульсного магнитного поля на производительность обработки и шероховатость поверхности . . . . .	322
4.3.3. Определение рациональных технологических режимов магнитно-абразивной обработки с регенерацией абразивной «щетки» . . . . .	325
4.3.4. Экспериментальное исследование влияния импульсного магнитного поля на производительность обработки при суперпозиции основного и дополнительного магнитных полей . . . . .	332
4.4. Синтез комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле . . . . .	335
4.4.1. Методика синтеза комбинированных способов упрочняющей обработки поверхностей деталей машин в магнитном поле . . .	335
4.4.2. Совмещенные способы упрочняющей обработки в магнитном поле поверхностей вращения . . . . .	337
4.4.3. Экспериментальные исследования влияния совмещенной магнитно-абразивной обработки и магнитно-импульсного упрочнения на производительность и качество поверхности . . .	342
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	346
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . .	348

Научное издание

**Акулович** Леонид Михайлович,  
**Сергеев** Леонид Ефимович,  
**Миранович** Алексей Валерьевич и др.

УПРОЧНЯЮЩАЯ  
И ФИНИШНАЯ АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДЕТАЛЕЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*  
Редактор *Г. В. Анисимова*  
Компьютерная верстка *Н. А. Тихонович*  
Дизайн обложки *А. А. Покало*

Подписано в печать 26.12.2022. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 20,92. Уч.-изд. л. 16,36. Тираж 100 экз. Заказ 796.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–1, 220023, Минск.