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

УДК 621.81

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. Ворошухо* (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*

ISBN 978-985-25-0190-3

© БГАТУ, 2022

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

3. ФИНИШНАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН 145
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 мелкомодульных 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 МАО 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 съем металла при магнитно-абразивной обработке 246

4. КОМБИНИРОВАННЫЕ И СОВМЕЩЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ 270
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 1/16.
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.