

## ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Акулович Леонид Михайлович<sup>1</sup>✉, Мисько Владимир Григорьевич<sup>2</sup>, Федоров Олег Сергеевич<sup>3</sup>✉

<sup>1,2</sup>БГАТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

<sup>1</sup>dekanat.fts@bsatu.by

<sup>3</sup>fos1973@yandex.ru

**Аннотация.** Наиболее нагруженными являются детали машин, работающие в сопряжении, а также поверхности рабочих органов сельскохозяйственной и строительной техники. Надежность и долговечность таких деталей зависит в первую очередь от способности поверхностных слоев деталей сопротивляться разрушению. Одним из способов повышения износостойкости поверхностей, создания барьеров для возникновения очагов коррозии, мест зарождения усталостных микротрещин является упрочнение рабочих поверхностей деталей. Для этого разработано большое количество различных методов поверхностного упрочнения, основанных на нанесении покрытия или изменении состояния (модификации) поверхности. Сложные условия эксплуатации деталей машин, как правило, требуют от поверхности свойств, возможность получения которых обусловлена комбинированием способов упрочнения, один из них выбирается базовым, а остальные являются дополнительными. Целью исследований является научное обоснование тенденции развития комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей машин и ее использование на этапе синтеза способов комбинированного упрочнения поверхностей деталей машин в магнитном поле. В результате исследований обоснована ступенчатая возрастающая форма границы эффективных областей воздействия структурными составляющими (базовым и дополняющим способами) комбинированной упрочняющей обработки, каждая ступень которой показывает, когда достигнутый на данном этапе развития уровень технологии комбинированного упрочнения исчерпал свои возможности и на смену ей приходит новая усовершенствованная технология следующего уровня. Показано, что из комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей в магнитном поле наиболее перспективными по производительности являются совмещение магнитно-электрического упрочнения и тонкого шлифования, а также совмещение магнитно-абразивной обработки и магнитно-импульсного упрочнения.

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, совмещенная упрочняющая обработка, цикловая производительность, лазерное оплавление, магнитно-электрическое упрочнение, модификация поверхности.

**Для цитирования:** Акулович Л. М., Мисько В. Г., Федоров О. С. Тенденция развития комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей машин с использованием энергии магнитного поля // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4(80). С. 142-149. [https://doi.org/10.48012/1817-5457\\_2024\\_4\\_142-149](https://doi.org/10.48012/1817-5457_2024_4_142-149).

**Актуальность.** Сопрягаемые поверхности деталей узлов и механизмов мобильных машин, поверхности рабочих органов сельскохозяйственных и строительных машин работают в наиболее тяжелых условиях, и параметры внешней нагрузки (контактное давление в сопряжении, скорости относительного перемещения сопрягаемых поверхностей и др.), перепады температур, контакт с окружающей

средой, влияние технологических материалов (смазки, охлаждающие жидкости и т.п.) воспринимаются в первую очередь их поверхностным слоем [14]. Основные показатели ресурса сопрягаемых деталей различных механизмов зависят от способности контактирующих слоев деталей сопротивляться разрушению, что технологически обеспечивается достижением необходимой износостойкости рабочих поверх-

ностей, созданием барьеров для зарождения в поверхностных слоях усталостных микротрещин, возникновения очагов коррозии и т.п. Для улучшения этих показателей в машиностроении и при восстановлении изношенных рабочих поверхностей деталей используют упрочнение путем нанесения различных износостойких материалов, термической и пластической обработкой [6, 13].

Широкий диапазон условий работы машин способствует различному виду изнашиваний деталей, что в свою очередь требует методов поверхностного упрочнения, подходящих под конкретный вид износа, как правило, они основаны на нанесении покрытий и (или) изменении состояния (модификации) поверхности [8, 11, 12]. Получение упрочненной поверхности деталей осуществляется путем нанесения на них материалов, которые по своим свойствам отличаются от свойств основного металла, но наиболее полно отвечают условиям эксплуатации. При модификации поверхностного слоя происходят физико-химические превращения в структуре металла, повышающие его сопротивление разрушению. Модифицирование поверхностного слоя может осуществляться поверхностным пластическим деформированием (ППД), поверхностной термообработкой, диффузионным насыщением легирующими элементами и другими способами. Вследствие широкого диапазона условий эксплуатации машин и видов изнашивания ни один из известных методов упрочнения поверхностей деталей не может претендовать на универсальность. В одном случае один и тот же метод упрочнения поверхности может существенно повысить эксплуатационные качества поверхности, а в других не произойдет никаких изменений параметров поверхности. По этой причине наиболее эффективным является применение комбинированной упрочняющей обработки, основанной на использовании двух или трех методов упрочнения, каждый из которых формирует присущий ему показатель качества поверхности [4, 9, 11]. При совмещении способов комбинированной упрочняющей обработки один из них принимается в качестве базового, а остальные – как дополняющие базовый. Каждый из дополняющих способов призван, как правило, улучшить тот или иной показатель качества поверхностного слоя, сформированного базовым способом [2].

Вместе с тем при синтезе любого способа комбинированной упрочняющей обработки

для обеспечения его конкурентоспособности необходимо, кроме показателей качества поверхности, учитывать параметры экономической эффективности, основным из которых является производительность технологического процесса упрочнения.

**Цель исследований** – научно обосновать тенденцию развития комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей машин и ее использование на этапе синтеза способов комбинированного упрочнения поверхностей деталей машин в магнитном поле.

**Материал и методы исследования.** Современное развитие технического сервиса машин основано на комплексном подходе к синтезу восстановительных и функциональных покрытий, в основе которого лежит концепция создания покрытий с заданными и контролируемые физико-механическими свойствами с минимальными материальными и экономическими издержками [13, 14].

На первом этапе исследования структура технологического цикла (основная составляющая технологической операции) комбинированных способов упрочняющей обработки поверхностей деталей машин описывается алгебраическим выражением. На втором этапе производится анализ теоретически полученного выражения, на основе которого предлагаются направления развития способов комбинированного упрочнения поверхностей деталей машин в магнитном поле.

Производительность комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей машин обусловлена структурой технологической операции:

$$t_u = t_\sigma + t_\delta, \quad (1)$$

где  $t_\sigma$  – продолжительность упрочняющей обработки базовым способом;

$t_\delta$  – продолжительность воздействия дополняющим способом, не совмещенная во времени с обработкой базовым способом.

Цикловая производительность  $Q_u$  характеризуется величиной, обратной затратам времени на упрочнение базовым и дополняющими способами (1):

$$Q_u = \frac{1}{t_\sigma + t_\delta}. \quad (2)$$

Подставив в (2) вместо  $t_\sigma$  производительность базового способа  $Q_\sigma$  и выполнив соответствующие алгебраические преобразования,

получим зависимость цикловой производительности от совмещаемых способов:

$$Q_u = \frac{Q_b}{1 + t_d \times Q_b}. \quad (3)$$

Цикловая производительность (3) характеризует уровень технико-экономических показателей комбинированного способа упрочнения поверхностей деталей. Если технологическая операция упрочнения выполняется только базовым способом, то есть отсутствуют затраты времени на воздействия дополняющими способами ( $t_d = 0$ ), или эти воздействия совмещены с непосредственным упрочнением базовым способом, цикловая производительность  $Q_u$  имеет максимальное значение и равна производительности базового способа  $Q_b$ :

$$Q_{u \max} = \lim_{t_d \rightarrow 0} \frac{Q_b}{1 + t_d \times Q_b} = Q_b. \quad (4)$$

Из (4) следует, что использование технологий комбинированного упрочнения поверхностей деталей не может быть эффективным как без использования прогрессивных технологий (новых материалов и инструментов, высокоэнергетических способов обработки, высоких режимов и т.п.) базового способа, так и снижения цикловых потерь времени воздействия дополняющими способами. Совершенствование технологических процессов и оборудования для их реализации является объективной закономерностью их развития. Эта закономерность иллюстрируется графиком (рис. 1) зависимости цикловой производительности от производительности базового способа при различных величинах времени воздействия дополняющим способом  $t_d$ .

Анализ данных рисунка 1 показывает, что совершенствование базового способа после определенного уровня (линии 1' 2' 3') существенно не влияет на повышение цикловой производительности без уменьшения времени воздействия дополняющим способом. Чем меньше величина  $t_d$ , тем выше цикловая производительность и тем больше возможностей ее повышения путем увеличения базовой. С увеличением производительности базового способа при конкретном значении  $t_d$  цикловая производительность вначале резко повышается, а затем асимптотически приближается к пределу, равному  $1/t_d$  (линия 5 на рисунке). В этом случае дальнейшее повышение производительности базового способа  $Q_b$  не дает за-

метного увеличения цикловой производительности. Это свидетельствует о том, что достигнутый уровень технологии комбинированного упрочнения исчерпал свои возможности, и на смену ей приходит новая, усовершенствованная технология следующего уровня  $1/t_d$  и т.д. (см. линии 1–4 на рисунке 1).

Границы эффективных областей воздействия структурными составляющими (базовым и дополняющим способами) комбинированной упрочняющей обработки представляют собой ступенчатую возрастающую линию, которая на рисунке 1 выделена жирным. Приведенная форма указанных границ отражает общую тенденцию развития комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей машин, которая может служить ориентиром при их синтезе.

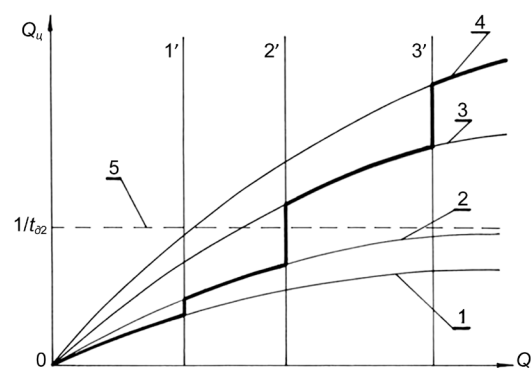


Рисунок 1 – График зависимости цикловой производительности ( $Q_u$ ) от базовой ( $Q_b$ ):

1–4 – ступени (уровни) совершенствования комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей;

1'–3' – рациональные пределы повышения производительности базовым способом при заданном времени воздействия дополняющим способом ( $t_d$ ); 5 – предельное значение цикловой производительности при достигнутой величине  $t_d$

Рассмотрим, как проявляется закономерность (3) при синтезе способов комбинированной упрочняющей обработки в магнитном поле, основанных на использовании концентрированных в пространстве и времени потоков магнитной и электрической энергии. По соотношению продолжительности упрочняющей обработки базовым способом  $t_b$  и продолжительности воздействия дополняющим способом  $t_d$  возможны следующие варианты:

1)  $t_d \leq 0$  – комбинированная совмещенная упрочняющая обработка, при которой базовый и дополняющий способы выполняются одновременно, то есть совмещены во времени;

2)  $t_d > t_b$  – комбинированная упрочняющая обработка, при которой базовый и дополняю-

щий способы выполняются либо вначале одновременно, затем незавершенная часть дополняющей обработки продолжительностью ( $t_{\theta} - t_{\sigma}$ ) выполняется последовательно;

3)  $t_{\theta} \gg t_{\sigma}$  – упрочнение поверхности происходит последовательно, дополняющая обработка производится после завершения обработки базовым способом без снятия детали со станка.

Классическая схема базовых способов комбинированного упрочнения наружных цилиндрических поверхностей с использованием энергии магнитного поля основана на том, что заготовку 1 располагают с определенным зазором между полюсными наконечниками электромагнитов 3 (рис. 2). Контур магнитопровода 2 может быть замкнутым, что позволяет получить наибольшую магнитную индукцию в рабочей зоне, или разомкнутым. На основе схемы, представленной рисунке 2, формируются базовые способы упрочняющей обработки в магнитном поле: магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) и магнитно-абразивная обработка (МАО).

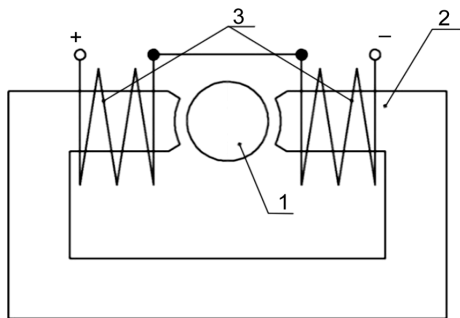


Рисунок 2 – Схема взаимного расположения цилиндрической поверхности и электромагнитов:

- 1 – деталь, 2 – магнитопровод,
- 3 – электромагнитные катушки

При МЭУ упрочняемую поверхность детали 1 и полюсный наконечник 3 магнита располагают между собой с определенным зазором и подключают их к источнику технологического тока 5, а в зазор из бункера-дозатора 6 непрерывно подают ферромагнитный порошок (ФМП), частицы которого выстраиваются в токопроводящие «цепочки» 2, замыкая контакты источника технологического тока (рис. 3). В результате электрического разряда происходит плавление частиц ФМП в местах их контакта с поверхностью заготовки, что приводит к формированию на поверхности покрытий в виде сочетания множества точечных вкраплений округлой формы.

При МАО рабочий зазор заполняют ФМП, частицы которого под действием сил магнитного поля стремятся развернуться наибольшей

осью по направлению силовых линий магнитного поля, выстраиваясь в «цепочки» и формируя своеобразную абразивную щетку (рис. 4). При вращении детали между ее поверхностью и образовавшейся щеткой возникает сила трения, под действием которой происходит перемещение зерен ФМП из зон 1 и 3 в зоны 2 и 4 соответственно. Поскольку ФМП обладает магнитной проницаемостью, то согласно «краевому эффекту» магнитный поток в рабочем зазоре концентрируется на выходе из зазора (зоны 2, 4), а в зонах 1, 3 и средней части он ослабевает. В результате происходит срезание микронеровностей на поверхности детали.

Поскольку роль дополняющих способов комбинированной упрочняющей обработки заключается в улучшении показателей качества поверхностного слоя, сформированных базовым способом, то рассмотрим недостатки базовых способов МЭУ и МАО.

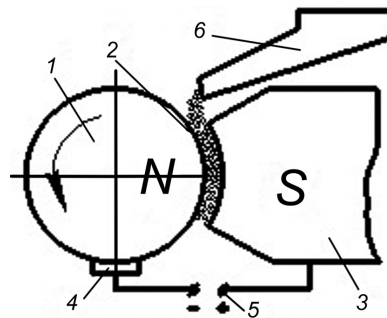


Рисунок 3 – Схема МЭУ:

- 1 – деталь, 2 – ферромагнитный порошок,
- 3 – полюсный наконечник магнита,
- 4 – скользящий контакт, 5 – источник тока,
- 6 – бункер-дозатор

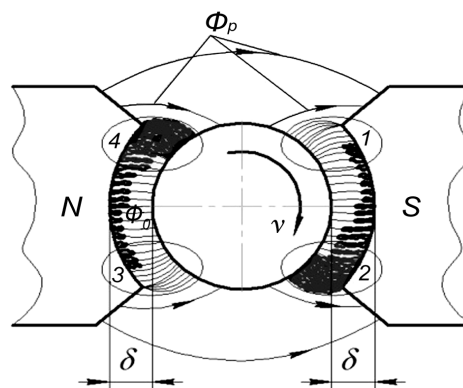


Рисунок 4 – Схема МАО:

- $\Phi_0$  – основной магнитный поток,
- $\Phi_p$  – поток рассеивания,  $\delta$  – рабочие зазоры,
- 1–4 – зоны формирования режущего инструмента

Для технологии нанесения покрытий способом МЭУ присуща неравномерность распределения по упрочняемой поверхности отдельных вкраплений материала ФМП. Это приво-

дит как к снижению сплошности наносимого покрытия, так и к увеличению шероховатости поверхности  $Ra \geq 12,5$  мкм. Поверхности с такими показателями качества не могут работать в парах трения, поэтому после МЭУ требуется производить последующую финишную обработку, например, шлифованием и (или) ППД. Проблема последующей обработки состоит в том, что при обработке ППД высока вероятность образования микротрещин в поверхностном слое, а при шлифовании – удаляется до 50 % нанесенного покрытия. Кроме этого при упрочнении поверхностей деталей, работающих в парах трения, требуется обеспечить соответствующие требования к топографии поверхности, характеризующей распределение металла по высоте в шероховатом поверхностном слое. Экспериментально установлено [9], что последующая после МЭУ финишная обработка значительно увеличивает опорную поверхность (рис. 5). До половины высоты профиля опорная поверхность после ППД, совмещенной с МЭУ, увеличивается в 2...3 раза (кривая 2). После шлифования и магнитно-абразивной обработки величина опорной поверхности еще более увеличивается (кривые 3 и 4).

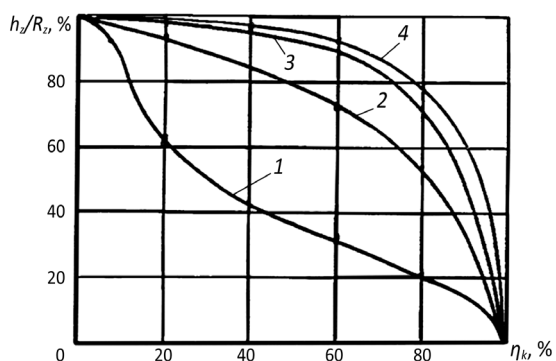


Рисунок 5 – Опорные кривые поверхностей, упрочненных сочетанием различных способов упрочняющей обработки:

- 1 – МЭУ; 2 – МЭУ+ППД; 3 – МЭУ+шлифование;  
4 – МЭУ+шлифование+МАО;  
 $h_z$  – высота уровня;  $R_z$  – высота микронеровностей;  $\eta_k$  – отношение отрезков внутри контура ко всей его длине

Анализ опорных кривых упрочненных поверхностей на рисунке 5 обосновывает целесообразность синтеза способа комбинированной обработки по варианту 2 совмещением МЭУ и шлифования на шлифовальном станке (рис. 6). При наладке станка шлифовальный круг устанавливают на требуемый размер диаметра обрабатываемой поверхности и межосевое расстояние  $A$  выдерживается постоянным на протяжении всего цикла обработки. По мере нанесения покрытия диаметральный

размер будет увеличиваться только до достижения расстояния  $A$ , так как лишний слой будет срезаться шлифовальным кругом. После завершения нанесения покрытия способом МЭУ необходимо осуществить выжигивание поверхности этим же шлифовальным кругом в течение нескольких секунд. Такая комбинированная обработка совмещает во времени нанесение покрытия и осуществляет чистовую обработку его поверхности до шероховатости  $Ra \leq 1,25$  мкм, а также экономит расход ФМП, поскольку при МЭУ будет наноситься только заданная толщина покрытия.

Операции МАО в технологических процессах изготовления деталей являются финишными. В то же время способ МАО, способный обеспечивать показатель шероховатости поверхности  $Ra \leq 0,2$  мкм, не исправляет погрешности геометрической формы. Поэтому базовый способ МАО целесообразно совмещать с другими способами тонкой обработки поверхностей, например, шлифованием по схеме, аналогичной для МЭУ (рис. 6).

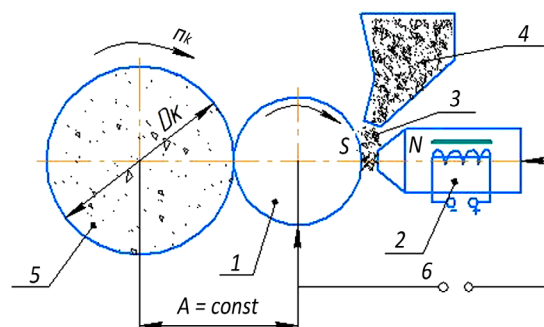


Рисунок 6 – Схема комбинированной упрочняющей обработки наружных цилиндрических поверхностей МЭУ со шлифованием:

- N, S – полюсы магнитного поля; 1 – заготовка; 2 – полюсный наконечник магнита; 3 – ФМП; 4 – бункер-дозатор; 5 – шлифовальный круг; 6 – источник технологического тока

Вторым вариантом комбинированной упрочняющей обработки является совмещение по варианту 1 базового способа МАО и магнитно-импульсного упрочнения (МИУ) путем конструирования магнитных систем в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 7 [3]. Известно [5], что поверхностный слой металла, подвергнувшись воздействию переменного магнитного поля, изменяет свои эксплуатационные свойства. Улучшение свойств поверхностей ферромагнитных деталей после МИУ объясняется увеличением тепло- и электропроводности металлов, вызванной направленной ориентацией свободных электронов металла во внешнем магнитном поле. Эта

ориентация происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность металла. При МИУ вследствие неоднородной кристаллической структуры поверхностного слоя в нем возникают вихревые токи. Вихревые токи обуславливают магнитное поле и локальные микровихри, которые, в свою очередь, нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла, создавая очаги градиента напряжений. На таких участках возрастает вероятность разрыва межатомных связей. В тех местах, где локальные напряжения превышают пределы упругости материала, формируются очаги пластической деформации, что свидетельствует об упрочнении металлической поверхности. Поэтому здесь интенсивно протекают процессы размножения и перемещения дислокаций. С увеличением плотности дислокации сталь претерпевает своеобразный наклеп, что выражается в изменении параметра решетки мартенсита и снижении температуры обратного мартенситного превращения [5]. Экспериментально установлено [3], что совмещение базового способа МАО и МИУ (рис. 7) увеличивает микротвердость поверхностного слоя на глубине 5 мкм на 18...20 % по сравнению с классической МАО.

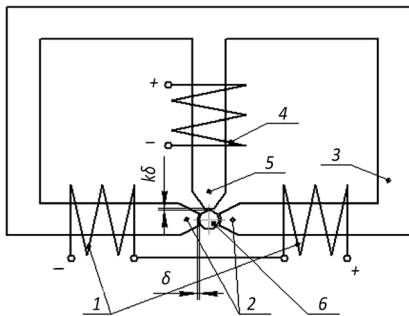


Рисунок 7 – Принципиальная схема магнитной системы при совмещении МАО и МИУ наружных цилиндрических поверхностей:  
1 – катушки электромагнита для МАО;  
2, 5 – полюсные наконечники;  
3 – магнитопровод; 4 – катушка электромагнита для МИУ; 6 – заготовка

При синтезе комбинированных способов поверхностного упрочнения с последовательной обработкой поверхности (вариант 3) дополняющая обработка производится после завершения обработки базовым способом. В этом случае способ дополняющей обработки выбирается по критерию его близости к основным технологическим параметрам базового способа (вид применяемой энергии и параметры ее источников, химический состав наносимых

на упрочняемую поверхность материалов, кинематика процесса и технологические режимы). Например, после МЭУ рекомендуется [10] последующее лазерное оплавление покрытий. Близость этих способов по обобщенным критериям совместимости можно рассматривать в сравнении основных параметров кинематики процессов, в подобии физико-химических механизмов нанесения покрытий, а также по плотности мощности потоков энергии от источников: в локализованных зонах воздействия множества электрических разрядов при МЭУ –  $(5 \times 10^6 \dots 10^8)$  Вт/см<sup>2</sup>, в сфокусированной зоне непрерывного лазера –  $(5 \times 10^3 \dots 10^4)$  Вт/см<sup>2</sup>. Концентрированное энергетическое воздействие на материал поверхностного слоя как при МЭУ, так и при лазерном оплавлении проявляется в модифицирующем эффекте.

**Выводы.** Многообразие условий эксплуатации машин порождает различные виды изнашивания рабочих поверхностей деталей, что не позволяет ни одному из известных способов упрочнения поверхностей деталей претендовать на универсальность. Решением данной проблемы может стать использование комбинированной упрочняющей обработки поверхностей деталей машин, при которой один из способов упрочнения является базовым, а дополняющие способы призваны улучшить тот или иной показатель качества поверхности, сформированный базовым способом.

Тенденция развития комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей машин носит ступенчатый характер, обусловленный асимптотическим приближением производительности базового способа к пределу, что свидетельствует о том, что достигнутый на данном этапе развития уровень технологии комбинированного упрочнения исчерпал свои возможности и ей на смену приходит новая усовершенствованная технология следующего уровня.

Из комбинированных способов поверхностного упрочнения деталей в магнитном поле наиболее перспективными по производительности являются совмещение МЭУ и тонкого шлифования, а также совмещение МАО и МИУ.

#### Список источников

1. Акулович Л. М., Миранович А. В., Мисько В. Г. Методика синтеза комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле // Машиностроение: респ. межведомств. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2022. Вып. 34. С. 5–8.
2. Афанасенко Е. В. Восстановление и упрочнение деталей машин комбинированным методом электромагнитной наплавки с поверхностным

пластическим деформированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск: БАТУ. 1994. 28 с.

3. Ворошуха О. Н. Технология магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Минск: БНТУ. 2019. 27 с.

4. Комбинированный способ упрочнения и финишной абразивной обработки поверхностей деталей в магнитном поле / С. А. Чижик [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17, № 11 (203). С. 509–519.

5. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. 2012. № 3. С. 77–82.

6. Миклуш В. П., Сайганов А. С. Организация технического сервиса в агропромышленном комплексе. Минск: ИВЦ Минфина, 2014. 607 с.

7. Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники интегрированными технологиями упрочняющих защитных покрытий / Б. А. Ляшенко [и др.] // Конструирование, эксплуатация та виробництво сільськогосподарських машин. 2011. Вип. 41, ч. II. С. 9–19.

8. Технология ремонта машин / Е. А. Пучин [и др.]; под ред. Е. А. Пучина. Москва: УМЦ «Триада», 2006. Ч. I. 348 с.

9. Упрочняющая и финишная абразивная обработка в магнитном поле деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович [и др.]; под ред. Л. М. Акуловича. Минск: БГАТУ, 2022. 360 с.

10. Характеристика покрытий после магнитно-электрического упрочнения и лазерной обработки / Л. М. Акулович [и др.] // Инновационные технологии в машиностроении: электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, Новополюцк, 19–20 апреля 2018 г. Новополюцк, ПГУ. 2018. С. 156–159.

11. Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. Москва: Машиностроение, 2005. 272 с.

12. Черноиванов В. И., Голубев И. Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 376 с.

13. Zhang Z., Jing H., Xu L. et al. Influence of microstructure and elemental partitioning on pitting corrosion resistance of duplex stainless steel welding joints. Applied Surface Science. 2017; 394: 297–314.

14. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Perovskaya M. V. et al. Conceptual foundations for developing modern coating surfacing technologies. Transport Engineering. 2022; 6: 48–61.

## References

1. Akulovich L. M., Miranovich A. V., Mis'ko V. G. Metodika sinteza kombinirovannyh sposobov uprochneniya poverhnostej detalej v magnitnom pole // Mashinostroenie: resp. mezhvedomstv. sb. nauch. tr. Минск: BNTU, 2022. Vyp. 34. S. 5–8.

2. Afanasenko E. V. Vosstanovlenie i uprochnenie detalej mashin kombinirovannym metodom elektromagnitnoj naplavki s poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Минск: БАТУ. 1994. 28 с.

3. Voroshuha O. N. Tekhnologiya magnitno-abrazivnoj obrabotki naruzhnyh cilindricheskikh poverhnostej s upravlyaemoj orientaciej ferroabrazivnyh zeren i regeneraciej abrazivnoj shchetki impul'snym magnitnym polem: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.08. Минск: БНТУ. 2019. 27 с.

4. Комбинированный способ упрочнения и финишной абразивной обработки поверхностей деталей в магнитном поле / С. А. Чижик [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17, № 11 (203). С. 509–519.

5. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. 2012. № 3. С. 77–82.

6. Miklush V. P., Sajganov A. S. Organizaciya tekhnicheskogo servisa v agropromyshlennom komplekse. Минск: IVC Minfina, 2014. 607 с.

7. Povyshenie dolgovechnosti bystroiznashivaemykh detalej rabochih organov sel'skohozyajstvennoj tekhniki integrirovannymi tekhnologiyami uprochnyayushchih zashchitnykh pokrytij / B. A. Lyashenko [i dr.] // Konstruyuvannya, ekspluataciya ta virobnytstvo syl'skogospodars'kih mashin. 2011. Vip. 41, ch. II. S. 9–19.

8. Tekhnologiya remonta mashin / E. A. Puchin [i dr.]; pod red. E. A. Puchina. Moskva: UMC «Triada», 2006. Ch. I. 348 s.

9. Uprochnyayushchaya i finishnaya abrazivnaya obrabotka v magnitnom pole detalej sel'skohozyajstvennykh mashin / L. M. Akulovich [i dr.]; pod red. L. M. Akulovicha. Минск: BGATU, 2022. 360 s.

10. Harakteristika pokrytij posle magnitno-elektricheskogo uprochneniya i lazernoj obrabotki / L. M. Akulovich [i dr.] // Innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii: elektronnyj sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Novopolock, 19–20 aprelya 2018 g. Novopolock, PGU. 2018. S. 156–159.

11. Hejfec M. L. Proektirovanie processov kombinirovannoj obrabotki. Moskva: Mashinostroenie, 2005. 272 s.

12. Chernoi Ivanov V. I., Golubev I. G. Vosstanovlenie detalej mashin (Sostoyanie i perspektivy). Moskva: FGNU «Rosinformagrotekh», 2010. 376 s.

13. Zhang Z., Jing H., Xu L. et al. Influence of microstructure and elemental partitioning on pitting corrosion resistance of duplex stainless steel welding joints. Applied Surface Science. 2017; 394: 297–314.

14. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Perovskaya M. V. et al. Conceptual foundations for developing modern coating surfacing technologies. Transport Engineering. 2022; 6: 48–61.

**Сведения об авторах:**

**Л. М. Акулович**<sup>1</sup>✉, доктор технических наук, профессор;

**В. Г. Мисько**<sup>2</sup>, старший преподаватель;

**О. С. Федоров**<sup>3</sup>✉, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-6079-6897>

<sup>1,2</sup>БГАТУ, просп. Независимости, 99/2, Минск, Республика Беларусь, 220023

<sup>3</sup>Удмуртский ГАУ, ул. Студенческая, 9, Ижевск, Российская Федерация, 426069

<sup>1</sup>[dekanat.fts@bsatu.by](mailto:dekanat.fts@bsatu.by)

<sup>3</sup>[fos1973@yandex.ru](mailto:fos1973@yandex.ru)

Original article

## THE TENDENCY OF COMBINED METHODS DEVELOPMENT FOR SURFACE HARDENING OF MACHINE PARTS BY APPLYING MAGNETIC FIELD ENERGY

**Leonid M. Akulovich**<sup>1</sup>✉, **Vladimir G. Misko**<sup>2</sup>, **Oleg S. Fedorov**<sup>3</sup>✉

<sup>1,2</sup>Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

<sup>1</sup>[dekanat.fts@bsatu.by](mailto:dekanat.fts@bsatu.by)

<sup>3</sup>[fos1973@yandex.ru](mailto:fos1973@yandex.ru)

**Abstract.** *The most loaded machine parts are the parts that work in conjunction, as well as the surfaces of the working bodies of agricultural and construction machinery. The reliability and durability of such parts depends primarily on the ability of the surface layers of the parts to resist destruction. One of the ways of increasing the wear resistance of surfaces, creating barriers for corrosion spots, centers of fatigue microcracks is to strengthen the working surfaces of parts. To harden the surfaces of machine parts, many different surface hardening methods have been developed based on coating or changing the condition (modification) of the surface. Difficult operating conditions of machine parts usually require surface properties, which can be obtained by a combination of hardening methods, one of them is selected as the basic one, and the rest are additional. The purpose of the research is to provide a scientific rationale for the tendency of the development of combined methods for surface hardening of machine parts and its use at the stage of synthesis of methods for combined hardening of machine parts surfaces in a magnetic field. The research results justify the stepwise increasing shape of the boundary of effective areas of impact by the structural components (basic and complementary methods) of combined hardening treatment, each stage of which shows when the level of combined hardening technology achieved at this stage of development has exhausted its capabilities and is replaced by a new improved technology of the next level. It is shown that of the combined methods of surface hardening of parts in a magnetic field, the most promising ones in terms of performance are the combination of magnetic-electric hardening and fine grinding, as well as the combination of magnetic abrasive treatment and magnetic pulse hardening.*

**Key words:** *surface hardening, combined hardening treatment, cyclic productivity, laser infusion, magnetic-electric hardening, surface modification.*

**For citation:** *Akulovich L. M., Misko V. G., Fedorov O. S. The tendency of combined methods development for surface hardening of machine parts by applying magnetic field energy. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2024; 4(80): 142-149. (In Russ.). [https://doi.org/10.48012/1817-5457\\_2024\\_4\\_142-149](https://doi.org/10.48012/1817-5457_2024_4_142-149).*

**Authors:**

**L. M. Akulovich**<sup>1</sup>✉, Doctor of Technical Sciences, Professor;

**V. G. Misko**<sup>2</sup>, Senior lecturer;

**O. S. Fedorov**<sup>3</sup>✉, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-6079-6897>

<sup>1,2</sup>Belarusian State Agrarian Technical University, 99/2, Prospect Nezavisimosty St., Minsk, Republic of Belarus, 220023

<sup>3</sup>Udmurt State Agricultural University, 9 Studentskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

<sup>1</sup>[dekanat.fts@bsatu.by](mailto:dekanat.fts@bsatu.by)

<sup>3</sup>[fos1973@yandex.ru](mailto:fos1973@yandex.ru)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 23.09.2024; принята к публикации 26.11.2024.

The article was submitted 12.02.2024; approved after reviewing 23.09.2024; accepted for publication 26.11.2024.