

6. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легируемые порошки на железной основе и защитные покрытия из них. — Мн.: УП «Технопринт», 2001. — 300 с.
7. Оликер В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. — М.: Металлургия, 1990. — 176с.
8. Лоскутов В.Ф. Разработка процессов получения диффузионных легированных боридных и карбидных покрытий для повышения стойкости деталей машин и инструмента: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук. Киев, 1987. —36с.
9. Электромагнитная наплавка плоских изношенных поверхностей деталей машин / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Люцко, А.И. Коршунов, М.П. Кульгейко / Ремонт, восстановление, модернизация. — 2004. — №1. —С.2-6.

УДК 621.791

**Пантелеенко Ф.И., Акулич А.П., Люцко В.А.,
Петришин Г.В., Дмитриченко Е.Э.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ СО СМАЗКОЙ

Введение. Износостойкость, являющаяся одним из важнейших критериев долговечности трущихся деталей машин, зависит от многих факторов: характера трения (скольжение, качение, качение с проскальзыванием и т.д.), смазки, наличия абразивных частиц, свойств материалов и температуры трущихся поверхностей, сил трения, качества поверхностного слоя и ряда других [1-3]. Одним из самых распространенных видов трения является трение скольжения со смазкой. Оно характерно для работы большой номенклатуры деталей подвижных соединений технологического оборудования (подшипниковых узлов, зубчатых зацеплений коробок скоростей и подач металлорежущих станков и др.). Более интенсивному изнашиванию подвергаются детали сопряжений, работающих в условиях трения скольжения со смазкой, в которую попадает абразив из окружающей среды, либо в виде продуктов износа, шлама, нагара и т.д. (детали подшипниковых узлов сельскохозяйственных, транспортных, дорожно-строительных машин, детали двигателей внутреннего сгорания, направляющие элементы корпусных деталей технологического оборудования) [1,3-5].

Одним из эффективных методов повышения износостойкости деталей машин, работающих в указанных условиях эксплуатации, является магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) [4-7]. В качестве материалов покрытий в процессе МЭУ чаще всего применяются ферромагнитные порошки (ФМП), изготовленные на основе железа с большим содержанием бора (ферробор, феррохромбор). Заслуживает внимания изучение триботехнических характеристик покрытий из ФМП, применяемых при магнитно-абразивном полировании, а также из специальных легированных порошков на основе серого чугуна, которые до настоящего времени в процессе МЭУ не использовались. Качественные характеристики МЭУ (толщина упрочненного слоя, его сплошность, износостойкость) во многом определяются стабильностью процесса формирования наносимых покрытий. Для повышения стабильности процесса МЭУ обработку ведут в потоке охлаждающей жидкости, в среде защитных газов или применяют си-

стемы электронного управления одним из параметров технологической цепи.

Однако, в настоящее время, широкое внедрение перспективного технологического метода сдерживается недостаточной изученностью как физико-механических и триботехнических свойств покрытий из различных ФМП, так и влияния на них условий осуществления процесса МЭУ.

Цель работы. Изучение влияния материала порошков и условий осуществления процесса МЭУ на физико-механические и триботехнические характеристики ферромагнитных покрытий при трении скольжения со смазкой, содержащей абразив.

Оборудование и методика исследований. Магнитно-электрическое упрочнение образцов осуществляли на лабораторной установке второго типа [5] в двух режимах: с включенным блоком стабилизации и с его отключением. Для упрочнения цилиндрических поверхностей установка оснащалась механизмом вращательного движения образцов [7]. Одна часть образцов упрочнялась на воздухе, а другая – с использованием СОЖ, состоящей из 5% раствора эмульсола Э-1 в воде.

Износостойкость ферромагнитных покрытий при трении скольжения со смазкой, содержащей абразив исследовали на машине СМТ-1 по схеме «диск-колодка» по методике, приведенной в [6,7]. Покрытия на диски из стали наносились из различных ФМП: ферробора (ФБ-10, ФБ-17 ГОСТ 14848-69), феррохромбора (ФХБ-1 ТУ 48-42-12-70), абразивно-полировального (ферабраз-311 (40%Fe+60%TiC) ТУ 147.038-84), легированного серого чугуна В, Si, Cr, Mn, Ni (ЛСЧ). Колодки изготавливались из чугуна СЧ25. Эталонном служил диск из стали 40Х с твердостью 48...54 HRC_с. Смазка трущихся поверхностей производилась путем окунания в абразивную среду – масло индустриальное 20, содержащее 5% по массе абразива (кварцевый песок ГОСТ 8006-72). Сравнительную износостойкость оценивали гравиметрическим методом по потере массы Δ_m . Интенсивность изнашивания I_m оценивали на единицу длины пути трения, а относительная износостой-

Пантелеенко Федор Иванович, д.т.н., профессор, зав. каф. «Материаловедение и конструкционные материалы», член-корреспондент НАНБ, проректор по научной и производственной деятельности Полоцкого государственного университета. Беларусь, ПГУ, 211440, г. Новополоцк, Витебской обл., ул. Блохина, 29.

Люцко Василий Александрович, к.т.н., доцент каф. «Технология машиностроения» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого.

Дмитриченко Евгений Эдуардович, ассистент каф. «Технология машиностроения» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого.

Беларусь, ГГТУ им. П.О. Сухого, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Акулич Антон Павлович, к.т.н., доцент, декан электронно-механического факультета, зав. каф. «Технология машиностроения» Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

кость $\epsilon_{отн}$ определялась отношением износостойкости покрытия ϵ к износостойкости материала эталона $\epsilon_{эт}$ [3].

Металлографический анализ проводили на микроскопе МИМ-8М, а микротвердость определяли на приборе ПМТ-3 по методике, приведенной в [5,8].

Результаты исследований. Анализ фотографий микроструктур показывает, что условия осуществления процесса МЭУ оказывают существенное влияние на качество наносимых покрытий. При упрочнении без стабилизации процесса (блок стабилизации отключен) в верхней (белой) зоне покрытия (рис. 1) четко видно большое количество микропор и раковин, а также просматриваются микротрещины, что в целом значительно снижает сплошность нанесенного слоя и может привести к ухудшению его физико-механических свойств. Появление данных дефектов можно объяснить довольно частым нарушением температурного режима в рабочем зазоре в процессе формирования покрытий, вызванного большой амплитудой колебаний силы технологического тока. При МЭУ со стабилизацией процесса величины технологического тока и температуры в рабочей зоне находятся в заданных пределах, и поэтому дефекты в верхней зоне упрочненного слоя, наблюдаются значительно реже (рис. 2-4), а сплошность покрытия возрастает [8]. При упрочнении в среде охлаждающей жидкости сплошность покрытий также возрастает. Однако толщина покрытий при этом уменьшается в 1,8-2 раза. После травления шлифов, в белом слое покрытий, нанесенных на воздухе (рис. 3), четко просматривается, вытянутая перпендикулярно к поверхности образца, игольчатая структура кристаллов, характерная для боридов железа FeB и Fe₂B [9]. В белом слое покрытий, нанесенных в среде охлаждающей жидкости (рис. 4) игольчатая структура просматривается не так четко, строение кристаллов имеет более округлую форму. Такое различие в структуре белого слоя и толщине покрытий можно объяснить тем, что применение охлаждающей жидкости снижает температуру в рабочем зазоре в процессе электрических разрядов и горения дуги, а это, в свою очередь, приводит к изменению скорости и длительности формирования структуры и фазовых превращений в различных слоях покрытий. Следовательно, можно предположить, что и микротвердость покрытий при МЭУ в среде охлаждающей жидкости также будет ниже чем у покрытий, формируемых на воздухе.

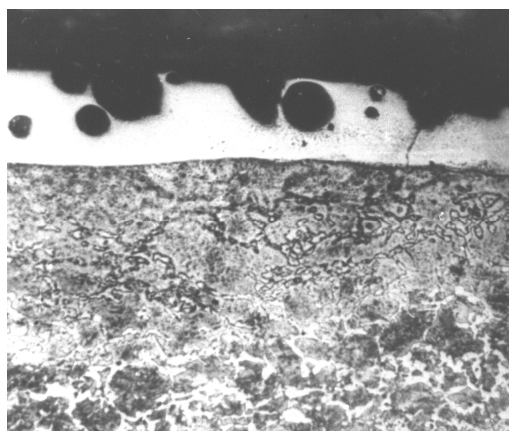


Рис. 1. Микроструктура покрытия из порошка ЛСЧ на сталь 45 (×100) со стабилизацией процесса МЭУ.

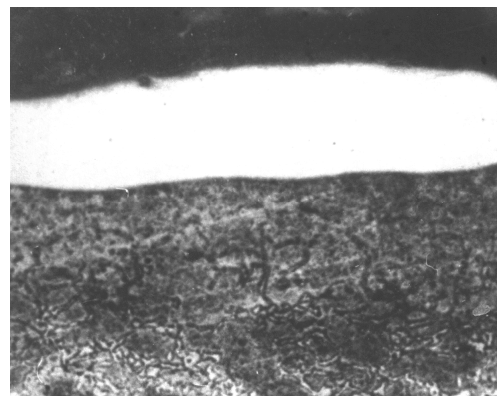


Рис. 2. Микроструктура покрытия из порошка ЛСЧ на сталь 45 (×100) без стабилизации процесса МЭУ.

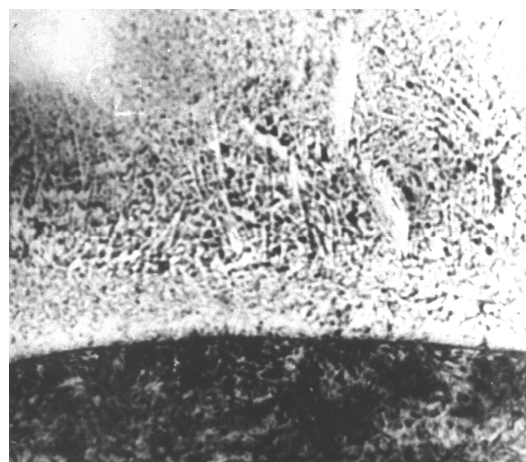


Рис. 3. Микроструктура верхней зоны покрытия из порошка ЛСЧ на сталь 45 (×400) со стабилизацией процесса МЭУ на воздухе.

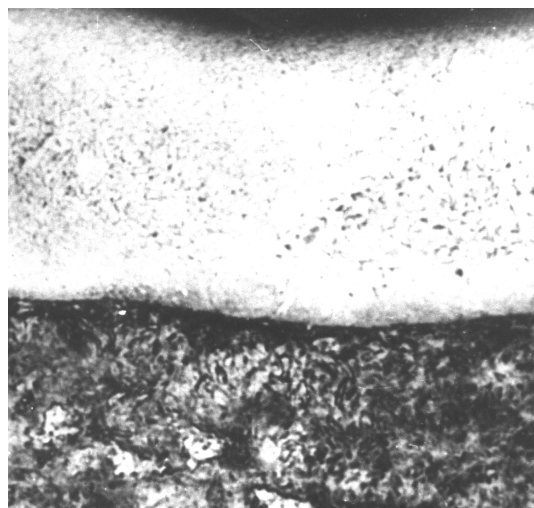


Рис. 4. Микроструктура верхней зоны покрытия из порошка ЛСЧ на сталь 45 (×400) со стабилизацией процесса МЭУ в среде охлаждающей жидкости.

На рис. 5 представлены зависимости изменения величины микротвердости по глубине упрочненного слоя, которые подтверждают эти предположения. Покрытия, нанесенные со стабилизацией процесса (кривые 1 и 3), отличаются плавным изменением микротвердости по глубине. Для покрытий нанесенных без стабилизации (кривые 2 и 4) наоборот, характерен большой разброс значений микротвердости относительно

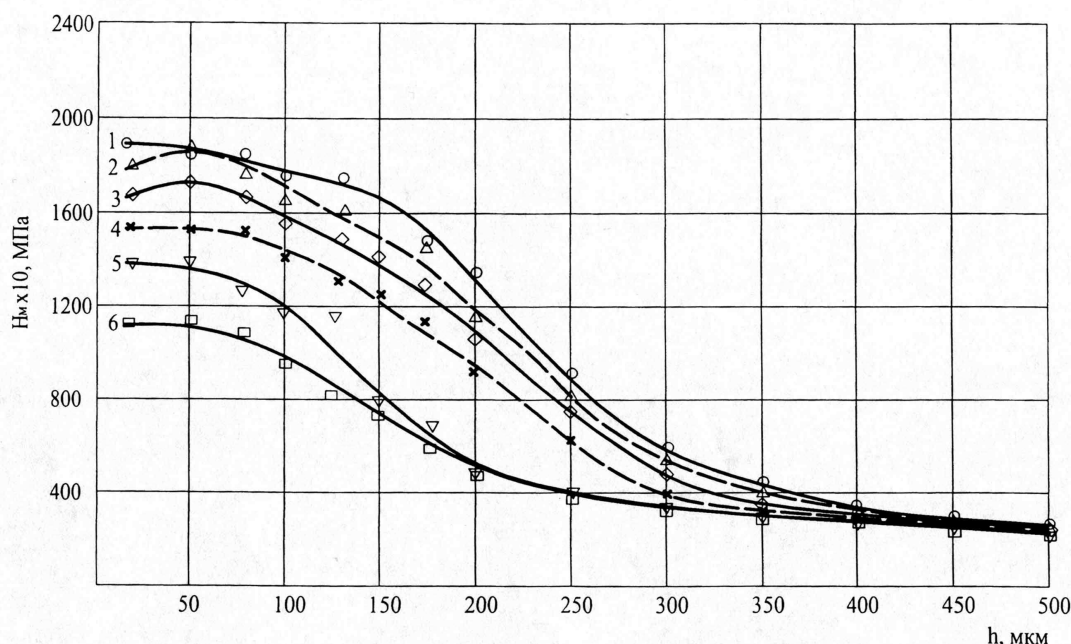


Рис. 5. Распределение микротвердости H_{μ} по глубине поверхностного слоя h в зависимости от условий МЭУ и марки ферропорошка (материал образца – сталь 45): 1,3 – со стабилизацией МЭУ; 2,4 – без стабилизации МЭУ; 1-4 – без охлаждения; 5,6 – с охлаждением; 1,2,5 – ферропорошок ЛСЧ; 3,4,6 – ферропорошок ФБ-10.

Таблица. Микротвердость зон упрочненного слоя на образцах из стали 45 в зависимости от марки порошка H_{μ} : 10МПа

Марка ферропорошка	Зоны			Основной металл
	верхняя	переходная	измененная	
ФБ-10	1350...1750	750...950	350...550	210...230
ФБ-17	1650...1980	800...1260	350...600	
ФХБ-1	1250...1500	550...950		
ЛСЧ	1600...1900	850...1200	400...650	
ферабраз-311	1400...1750	750...1100		

средних значений. Особенно заметно это проявляется в пределах белого слоя (для ферропорошка ЛСЧ он составляет 175...200 мкм, кривые 1 и 2, а для ферропорошка ФБ-10 – 125...150 мкм, кривые 3 и 4). Кроме того, в белом слое покрытий без стабилизации, наблюдается снижение значений микротвердости на 50...100 единиц. Как уже отмечалось выше, нарушение температурного режима в рабочей зоне приводит к появлению дефектов в белом слое, который формируется непосредственно в процессе расплавления ферромагнитного порошка. Следовательно, любые нарушения стабильности протекания процесса МЭУ, в первую очередь, непосредственно отражаются на качественных и количественных характеристиках белого слоя. Этим и объясняется большой разброс значений микротвердости и снижение ее величины именно в белом слое. При нанесении покрытий в среде охлаждающей жидкости больших колебаний температуры в рабочей зоне не происходит, процесс протекает более стабильно, чем на воздухе, и явных дефектов в белом слое значительно меньше (рис. 4). Поэтому и большого разброса значений микротвердости в упрочненном слое не наблюдается (кривые 5 и 6). Однако величина микротвердости белого слоя в этих покрытиях снижается на 400...500 единиц, причем независимо от марки ферропорошка. Из сравнений экспериментальных значений микротвердости с литературными данными следует, что микротвердость белого слоя, в покрытиях нанесенных на воздухе, находящаяся в пределах $H_{\mu}=(1300...1850) \cdot 10$ МПа (кривые 1-4), совпадает с микротвердостью двухфазного боридного слоя ($FeB+Fe_2B$) [10]. В то время как микротвердость белого слоя, покрытий, полученных в среде охлаждающей жидкости, составляет всего $H_{\mu}=(1100...1300) \cdot 10$ МПа, что соответствует микротвердости

однофазного боридного слоя Fe_2B . Т.е. результаты дюрометрии подтвердили ранее выдвинутое предположение, что охлаждающая жидкость, оказывающая влияние на температурный режим МЭУ, снижает микротвердость покрытий. Это подтверждается и исследованиями в области борирования металлов и сплавов, из которых следует, что микротвердость белого слоя, обусловленная соотношением в нем боридных фаз FeB и Fe_2B , также существенно зависит от температуры и длительности процесса формирования покрытий [9, 10].

Аналогичные закономерности в распределении микротвердости по глубине упрочненного слоя в зависимости от условий обработки наблюдаются и у покрытий, сформированных из других исследуемых марок ферромагнитных порошков. Значения микротвердости различных зон упрочненного слоя для рассмотренных ФМП представлены в таблице.

На втором этапе исследовали износостойкость покрытий из данных порошков в условиях трения скольжения со смазкой, содержащей абразив. Результаты исследований данных покрытий представлены на рис. 6. Из анализа экспериментальных данных следует, что металлопокрытия, нанесенные различными ФМП, имеют высокую износостойкость. причем материал ФМП оказывает существенное влияние на износ образцов. В порядке уменьшения износостойкость покрытий, в зависимости от марки применяемого ФМП, располагается в следующей последовательности:

$$\begin{aligned}
 & \text{ЛСЧ} (\epsilon_{\text{омн}}=4,62) \rightarrow \text{ФХБ-1} (\epsilon_{\text{омн}}=3,98) \rightarrow \\
 & \rightarrow \text{ФБ-17} (\epsilon_{\text{омн}}=2,96) \rightarrow \text{ФБ-10} (\epsilon_{\text{омн}}=2,22) \rightarrow \\
 & \rightarrow \text{ферабраз-311} (\epsilon_{\text{омн}}=1,85)
 \end{aligned}$$

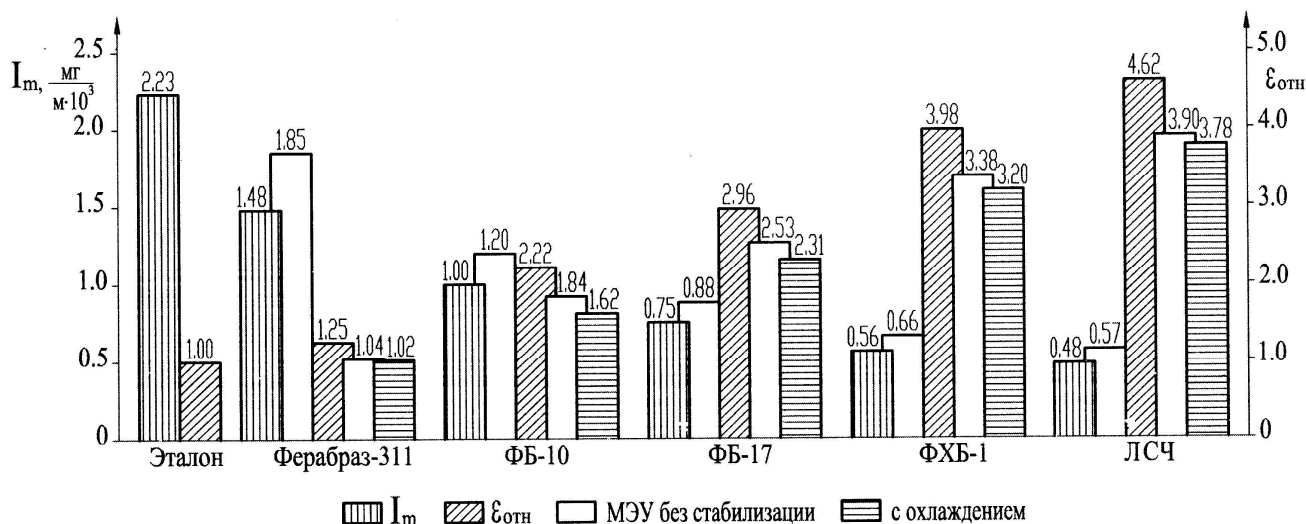


Рис. 6. Зависимость интенсивности изнашивания I_m и относительной износостойкости $\epsilon_{отн}$ при трении скольжения со смазкой, содержащей абразив, от марки ферропорошка. Материал образцов – сталь 45. Эталон – сталь 40Х, 48...54 HRC_c, без покрытия

Наибольшую износостойкость имеют покрытия из порошков ЛСЧ и ФХБ-1, хотя они по значениям микротвердости, соответственно, $H_{\mu}=(1600...1900) \cdot 10$ МПа и $H_{\mu}=(1250...1500) \cdot 10$ МПа уступают покрытиям из ФМП ФБ-17 с $H_{\mu}=(1650...1980) \cdot 10$ МПа.

Повышенную износостойкость данных металлопокрытий можно объяснить более плавным изменением механических свойств по глубине поверхностного слоя, а также более равномерным распределением износостойких карбидов бора и хрома и боридов хрома в матрице сложного твердого раствора легирующих элементов (В, Сг, Si) в кристаллической решетке железа. Введение в состав ФМП ЛСЧ никеля и уменьшение процентного содержания хрома способствует созданию менее хрупких покрытий, по сравнению с покрытиями из ФХБ-1. Этим объясняется разница в износостойкости покрытий из данных ферропорошков, при общей схожести их химического состава. Наименьшую износостойкость показали покрытия из абразивно-полировочного порошка ферабраз-311 ($\epsilon_{отн}=1,85$), что можно объяснить повышенной склонностью к окислению титановых сплавов и большой разницей в температуре плавления составляющих материала (Fe – 1539 °С, TiC – 3160 °С [11]). Это приводит к регулярному нарушению стабильности процесса формирования упрочненного слоя, что сказывается на его качестве (сплошность покрытий довольно низкая – около 60%).

Условия осуществления процесса МЭУ также оказывают существенное влияние на износ образцов. МЭУ со стабилизацией процесса позволяет снизить интенсивность изнашивания для различных марок ферропорошков в 1,17-1,21 раза по сравнению с МЭУ по традиционной схеме. Применение охлаждающей среды в процессе МЭУ, уменьшающее толщину наносимых покрытий, приводит к снижению износостойкости покрытий. Коэффициент относительной износостойкости ($\epsilon_{отн}$) для этих покрытий уменьшается в 1,22-1,37 раза по сравнению с покрытиями, полученными на воздухе в условиях стабилизации процесса МЭУ. Полученные результаты хорошо согласуются с исследованиями микроструктуры и микротвердости покрытий.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что МЭУ повышает износостойкость покрытий в условиях трения скольжения со смазкой, содержащей абразив, в 2-5 раза по сравнению с упрочнением традиционными методами термической обработки.
2. Установлена степень влияния материалов ФМП на износостойкость покрытий. Наибольшей износостойкостью обладают покрытия из ФМП марок ЛСЧ, ФХБ-1, ФБ-17.

Абразивно-полировальный порошок ферабраз-311 не подтвердил эффективности применения его для МЭУ.

3. Показано, что условия осуществления процесса МЭУ оказывают существенное влияние на качество покрытий. Осуществление МЭУ в условиях стабилизации процесса приводит к увеличению износостойкости покрытий в 1,2 раза.
4. Применение СОЖ при МЭУ повышает сплошность покрытий, но одновременно при этом толщина покрытий уменьшается в 1,8-2 раза, а микротвердость снижается на 200...500 единиц, что приводит к снижению износостойкости упрочненных поверхностей в 1,3 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 520 с.
2. Любарский И.М., Палатник И.С. Металлофизика трения. – М.: Металлургия, 1976. – 176 с.
3. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легируемые порошки на железной основе и защитные покрытия из них. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
4. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. – Мн.: УП «Технопринт», 2000. – 268 с.
5. Пантелеенко Ф.И., Люцко В.А., Коршунов А.И. Электромагнитная наплавка плоских изношенных поверхностей деталей машин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. - №1. – С. 2-6.
6. Акулич А.П., Кульгейко М.П., Люцко В.А. Исследование триботехнических характеристик ферромагнитных покрытий // Материалы науч.-техн. конф. посв. 30-летию ин-та. – Брест: Брестск. политех. ин-т, 1996. – С. 90.
7. Повышение износостойкости деталей машин комплексным магнитно-электрическим способом / Г.С. Шулев, П.В. Сысоев, Э.И. Дмитриченко, В.А. Люцко // Трение и износ. – 1987. – Т.8, №5. – С. 938-943.
8. Кульгейко М.П., Люцко В.А., Мельников Д.В. Эффективность стабилизации энергетического воздействия при магнитно-электрическом упрочнении // Машиностроение: Сб. науч. тр. Вып. 18 / Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: УП «Технопринт». – 2002. – С. 394-398.
9. Лабунец В.Ф., Ворошин Л.Г., Киндрачук М.В. Износостойкие боридные покрытия. – Киев: Техника, 1989. – 159 с.
10. Гуревич Б.Г., Говязина Е.А. Электролизное борирование стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1977. – 72 с.
11. Самсонов Т.В., Виноцкий И.М. Тугоплавкие соединения: Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 558 с.