

2. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2007. – 232 с.
3. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных фильтроматериалов / Вегера А.И., Елышин А.И., Волков В.К., Жаркова О.Н. // Вести ПГУ, В – Прикладные науки. – Новополоцк: ПГУ, 2000. – С. 69–74.
4. Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой пор / Л.П. Пилинович [и др.]; под ред. П.А. Витязя. – Минск: Тонпик, 2005. – 252 с.

УДК 623.791.44

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

*Акулович Л.М., д-р. техн. наук, проф.,
Миклуш В.П., канд. техн. наук, проф.,
Миранович А.В., зам. декана ФТС*

*(УО «Белорусский государственный аграрный государственный
технический университет», г. Минск)*

Введение

Детали автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различного рода нагрузок и внешних сред, что приводит к необратимым процессам износа их рабочих поверхностей. Исследования ремонтного фонда тракторов показывают, что в среднем только до 20 % деталей подлежат выбраковке, 25-40 % деталей являются годными для дальнейшей эксплуатации, а 55-60 % деталей можно восстановить. Сущность восстановления изношенных деталей состоит в возвращении им

свойств, заложенных во время изготовления и утраченных при эксплуатации. Такими свойствами являются твердость и износостойкость трущихся поверхностей, структура и сплошность материала, форма, размеры, взаимное расположение и шероховатость рабочих поверхностей, усталостная прочность, жесткость и распределение массы детали относительно оси вращения. К восстанавливаемым деталям относят детали, имеющие износ хотя бы одной основной рабочей поверхности. Восстановление работоспособности таких деталей осуществляется нанесением высококачественных покрытий, последующей механической обработкой с обеспечением необходимого класса точности и шероховатости восстанавливаемых поверхностей. При этом, кроме возобновления технических характеристик восстановленных поверхностей (размеры, форма), необходимо обеспечить требования точности по взаимному расположению поверхностей детали (соосность, перпендикулярность, параллельность, межосевое расстояние и т.п.), независимо от того, восстанавливались эти поверхности или сохранены от новой детали. Таким образом, восстановление изношенной детали – это комплекс технологических операций, обеспечивающих изменение геометрических характеристик и параметров до уровня аналогичной новой детали, а физических параметров – до уровня близкого новой детали.

Многократно повторяющийся процесс восстановления детали должен быть построен рациональным образом с оптимизацией критерия расхода производственных ресурсов (материальных, трудовых и энергетических). Современное восстановительное производство располагает множеством способов нанесения покрытий на восстанавливаемые поверхности. К основным тенденциям развития технологии нанесения покрытий относятся использование высококонцентрированных источников энергии (лазерных и электронных пучков, низкотемпературной плазмы и др.), создание новых композиций материалов покрытий и технологических процессов их получения.

Эффективный путь расширения технологических возможностей процессов обработки, снижения трудоемкости,

Репозиторий БГАТУ

На упрочняемую поверхность одновременно воздействуют электромагнитные и термомодеформационные потоки энергии, а также потоки вещества. При этом процессы формирования упрочненных поверхностей деталей носят, в основном, термомеханический характер, а электромагнитные потоки вследствие простоты их формирования и удобства в управлении наиболее технологичны. Для термообработки поверхностного слоя используется энергия электродугового разряда, что позволяет легировать поверхностный слой основы как элементами материала порошка, так и элементами присадок в транспортирующей среде.

Управлять как глубиной, так и степенью упрочнения поверхностного слоя в процессах термообработки и легирования позволяют главным образом электромагнитные потоки в рабочей зоне. Однако для настоящего времени не установлен механизм взаимного влияния режимов каждого из совмещаемых процессов. Рассмотрим основные стадии формирования упрочненного слоя для каждого из совмещаемых методов.

При МЭУ упрочненный слой формируется путем образования на поверхности детали множества точечных вкраплений [2] в результате нанесения расплавленного материала частиц порошка (рис. 2).

При подаче порошка в рабочий зазор его частицы, смещаясь друг относительно друга, уплотняются (рис. 2, *а*) и образуют цепочки между поверхностью детали и полюсным наконечником. При этом электрическая проводимость промежутка деталь – полюсный наконечник увеличивается. Сближение частиц порошка с поверхностями детали и полюсного наконечника электромагнита при подаче разрядного тока приводит к пробое оксидных пленок на их поверхностях, в результате чего образуются каналы проводимости технологического тока. Места контакта частиц порошка с поверхностью детали оплавляются (рис. 2, *б*), тем самым создаются условия для возникновения кратковременного дугового разряда (рис. 2, *в*). Электрическая дуга расплавляет частицы порошка (рис. 2, *г*) и приваривает их к поверхности детали (рис. 2, *д*), затем происходит разрыв электрической дуги (рис. 2, *е*).

Формирование покрытия происходит путем расположения на поверхности детали множества точечных вкраплений, по мере заполнения которыми поверхности детали сплошность покрытия увеличивается, а толщина его практически не изменяется, хотя перенос материала порошка на поверхность детали продолжается. В результате этого обеспечивается сглаживание формируемой поверхности.

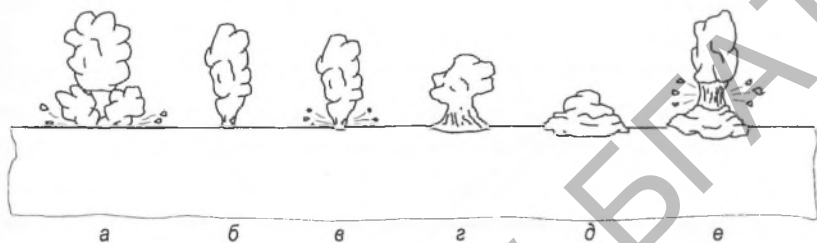


Рис. 2. Стадии формирования точечного вкрапления при электромагнитной наплавке зерен ферропорошка

В начале МЭУ перенос материала порошка происходит наиболее интенсивно (рис. 3), затем этот процесс замедляется, прекращается и начинает частично сниматься упрочненный слой. Увеличение длительности МЭУ не приводит к адекватному увеличению толщины покрытия. При удельной длительности упрочнения $\tau > 4 \text{ с/см}^2$ (рис. 3, кривая 2) поверхность более шероховатая. Время, в течение которого масса перенесенного материала порошка на поверхность детали достигает первого максимума, считается оптимальным [3].

При увеличении напряжения в рабочем зазоре возрастает переносимая в единицу времени масса материала порошка (рис. 3). Это объясняется тем, что с увеличением рабочего напряжения растет энергия импульса, повышаются рабочий ток и температура нагрева участков детали в зоне контакта с частицами порошка, что способствует переносу материала порошка на упрочняемую поверхность. Установлено, что наибольший перенос материала порошка достигается при использовании более мощных источников питания.

Образовавшиеся после первых разрядов точечные вкрапления материала порошка выступают над поверхностью детали (рис. 2, д). Являясь концентраторами магнитного поля, они притягивают последующие цепочки из частиц порошка, тем самым способствуют возникновению электрических разрядов на упрочненной поверхности. В результате многократного воздействия разрядов первоначальные вкрапления частично разрушаются (рис. 2, е).

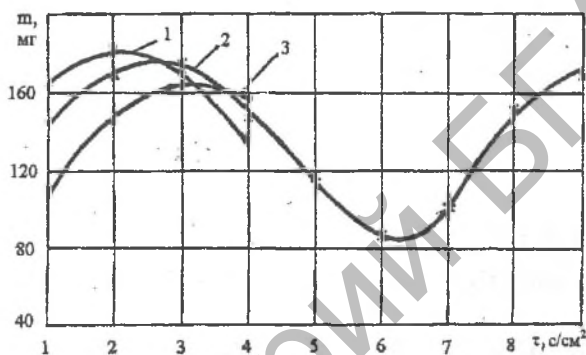


Рис. 3. Зависимости изменения массы покрытия m от удельной длительности упрочнения τ при напряжении между полюсами 34 В (1), 29 В (2), 23 В (3)

Таким образом, процесс формирования упрочненного слоя сопровождается нанесением покрытия и эрозией его отдельных участков. В результате этого рельеф упрочненной поверхности состоит из хаотически расположенных выступов и мелких лунок. Знак изменения массы покрытия за рассматриваемый промежуток времени зависит от того, какой процесс превалировал в течение этого времени. Если процесс переноса материала порошка на поверхность детали превалирует над эрозией, то масса покрытия увеличивается. Если же превалирует эрозия – масса покрытия уменьшается.

Другим из совмещаемых методов является поверхностное пластическое деформирование. Методы ППД весьма производительны и основаны на использовании пластических

свойств металла – его способности необратимо деформироваться под действием внешних сил без нарушения целостности. Их применение обеспечивает шероховатость поверхности в пределах $Ra\ 0,125-0,63$ при высокой размерной стойкости инструмента. При упрочнении металла способами ПИД повышается поверхностная твердость, пределы текучести и упругости, создаются остаточные напряжения сжатия, увеличивается опорная поверхность.

Для ПИД поверхностей после магнитно-электрического упрочнения используют роликовые или шариковые накатники. Рассмотрим взаимодействие деформирующего инструмента с максимальным числом степеней свободы – шарика при обкатке упрочненной поверхности, состоящей из множества точечных вкраплений расплава материала порошка. При этом не будем учитывать влияние изменения свойств материала в процессе обработки на коэффициент трения скольжения. Шарик, обладающий всеми степенями свободы, получает стохастические импульсы от столкновений с микровыступами поверхности, в результате чего, помимо движения подачи, шарик приобретает дополнительное вращение. В зависимости от соотношения углов поворота шарика (угол прецессии, угол нутации и угол собственного вращения вокруг оси) точка его контакта с упрочняемой поверхностью будет описывать одну из траекторий: петлеобразную, пикообразную, синусоидальную (рис. 4).

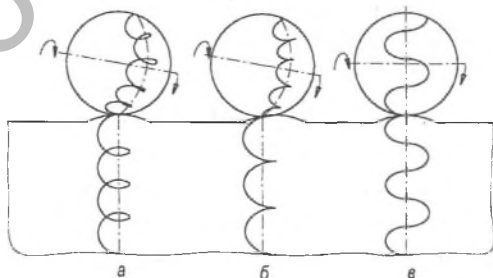


Рис. 4. Траектории точки контакта шарика с обрабатываемой поверхностью

а) петлеобразная, б) пикообразная, в) синусоидальная

Анализ контактного взаимодействия шарика с обрабатываемой поверхностью показывает, что движение шарика зависит от внешних стохастических импульсов моментов сил в результате трибоконтактных процессов и определяется формой и размерами микровыступов на упрочняемой поверхности. Моменты трения, увеличивающиеся с ростом температуры обрабатываемой поверхности, уменьшают скорость вращения и сокращают путь трения, изменяя траекторию движения и обеспечивая тем самым минимум полной энергии. В результате интенсивность нагрева формируемой поверхности, в том числе при использовании технологического тепла при МЭУ, влияет на характер траектории шарика через коэффициент трения скольжения.

Без дополнительного нагрева степень деформации невелика и при значительных контактных нагрузках поверхность растрескивается. Траектория шарика в результате взаимодействия с точечными вкраплениями, полученными при МЭУ, имеет петлеобразный характер. При нагреве обрабатываемый металл переходит в пластичное состояние, вследствие чего степень деформации возрастает. В результате выступы поверхности сглаживаются, впадины частично завальцовываются, однако в недостаточно прогретых подповерхностных слоях сохраняются трещины. Увеличение коэффициента трения скольжения шарика, препятствующее его вращению, уменьшает длину траектории, делая ее пикообразной, что приводит к снижению интенсивности пластической деформации. Дальнейший нагрев металла обеспечивает высокую степень деформации, выглаживание поверхности и отсутствие трещин в покрытии. Траектория точки контакта шарика с обрабатываемой поверхностью имеет минимальную длину и приобретает синусоидальный характер. Нагрев поверхностного слоя тормозит вращение и уменьшает длину траектории шарика, что приводит к снижению интенсивности пластической деформации.

Таким образом, управлять процессом деформирования позволяет термическое воздействие и дополнительное вращение шарика.

По структурному строению в упрочненном слое после комбинированного термомеханического упрочнения в электромагнитном поле можно выделить три зоны: наплавленную, диффузионную и зону термического влияния (рисунок 5).

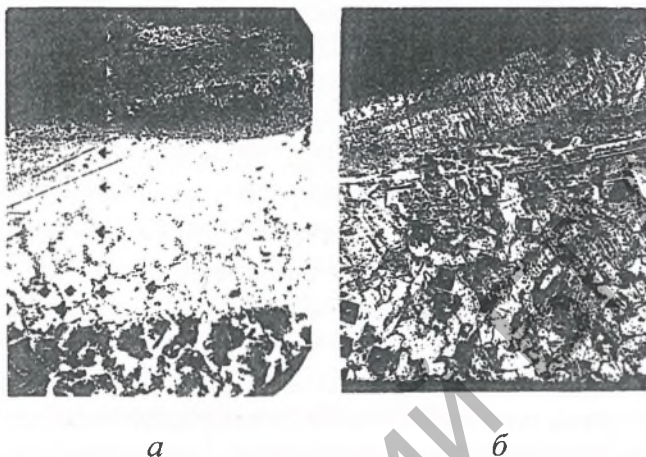


Рис. 5. Фотографии микроструктур (x200) поверхностного слоя, упрочненного ферробором ФБ-1: стали 45 после МЭУ (а); стали 20 после МЭУ и ППД (б)

Микроструктура упрочненного слоя, обеспечивающая его физико-механические параметры, определяется химическим составом упрочняющего порошка и материала основы [4]. Так, например, при упрочнении стали 45 ферробором ФБ-1, основными структурными составляющими поверхностного слоя являются закалочный мартенсит, сорбит и комплексные бориды на основе FeB и Fe_2B . Наплавленный слой содержит большое количество мелкодисперсных боридов с микротвердостью до 20 ГПа. Диффузионная зона представляет собой α - твердый раствор бора в железе с микротвердостью 8,0...11,4 ГПа. На границе между наплавленным и диффузионным слоем заметен тонкий боридный слой. В матрице на границе с диффузионной зоной обнаружено повышенное содержание углерода на глубине около 100 мкм. Таким образом, при ЭМН поверхностный слой формируется в результате взаимодействия материалов

ферропорошка и детали с образованием твердых растворов и взаимным диффузионным проникновением.

Влияние геометрических параметров на эксплуатационные характеристики поверхностных слоев деталей определяется высотой и формой неровностей, а также топографией поверхности. Важнейшей характеристикой топографии поверхности с точки зрения эксплуатационных свойств деталей является опорная кривая, характеризующая распределение металла по высоте в шероховатом поверхностном слое. Изучение опорных кривых показывает [4], что комбинированное упрочнение значительно увеличивает опорную поверхность (рисунок 6). Так, до половины высоты профиля опорная поверхность после ППД, совмещенной с МЭУ, увеличивается в 2-3 раза (рис. 6).

После шлифования и магнитно-абразивной обработки величина опорной поверхности еще более увеличивается. Однако для сохранения толщины нанесенного покрытия предпочтительно применять бесстружковые методы последующей обработки упрочненных поверхностей. Поэтому, где это возможно, при механической обработке упрочненных и восстановленных деталей следует обходиться без операций шлифования.

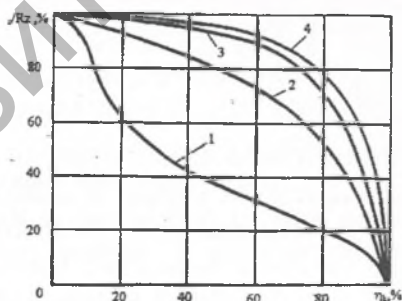


Рис. 6. Опорные кривые поверхностей упрочненных поверхностей:

- 1 – МЭУ, 2 – МЭУ+ППД, 3 – МЭУ + шлифование, 4 – МЭУ + шлифование + магнитно-абразивная обработка; h_z – высота рассматриваемого уровня; Rz – высота неровностей; η_k – отношение отрезков внутри контура ко всей длине

Заключение

Термомеханическая обработка, заключающаяся в комбинированном воздействии на металл пластическим деформированием и термическим упрочнением, является эффективным технологическим процессом повышения свойств и однородности структуры покрытий, наносимых в электромагнитном поле. Совмещение процессов упрочнения обеспечивает улучшение показателей качества упрочненных и восстановленных деталей: шероховатость поверхности не превышает Ra 5,0...6,3 мкм, опорная поверхность увеличивается в 2–3 раза, в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения. Осуществляя рациональную последовательность технологических операций, переходов и воздействий с использованием термомеханической обработки в электромагнитном поле можно прогнозировать и создавать требуемые физикомеханические параметры качества деталей.

Рекомендуется для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственных машин, работающих в условиях абразивного загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сенюць, Т.Б. Поверхностное упрочнение деталей с помощью энергии магнитного поля / Т.Б. Сенюць, Д.И. Сырковаш, М.А. Рошня, Л.М. Акулович // Промышленность Белоруссии. – 1975. – № 2. – С. 94.
2. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
3. Акулович, Л.М. Определение коэффициента использования порошка при магнитоэлектрическом упрочнении изделий / Л.М. Акулович, М.Т. Забавский, Л.М. Кожуро // Порошковая металлургия. Вып. 10. – Минск, 1986. – С. 3 – 6.
4. Акулович, Л.М. Самоорганизация процессов упрочняющей обработки / Л.М. Акулович, В.С. Ивашко, М.Л. Хейфец. – Минск: Народная книга, 2008. – 236 с.