

УДК 621. 923

Л.Г. Полонский, д.т.н., проф.*Житомирский государственный технологический университет,
Украина***Л.М. Кожуро, д.т.н., проф.***Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь***М.Л. Хейфец, д.т.н., проф.***Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

ПОВЕРХНОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПОРОШКА

В статье рассмотрены особенности формирования текстуры в поверхностном слое при электромагнитной наплавке с поверхностным пластическим деформированием.

Введение. Повышение надежности и долговечности деталей машин во многом определяется состоянием их поверхностного слоя. Основными причинами потери работоспособности узлов и механизмов являются изнашивание и усталостные поломки деталей, их разрушение вследствие ползучести, коррозия, эрозия в различных средах, кавитационное разрушение и всевозможные сочетания этих причин. Свыше 80 % отказов обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, в которых изнашивание играет доминирующую роль. Износ деталей различных групп по элементам составляет: 52 % – цилиндрические поверхности; 3 % – конические и сферические; 1 % – плоские; 1 % – профильные и фасонные; 2 % – зубья и шестерни; 3 % – шлицы; 5 % – пазы; 10 % – резьбы. Причем 13 % поверхностей имеют нарушение макрогеометрии и формы; трещины и изломы обнаружены у 9 % деталей [1]. Поэтому актуальными являются как разработка новых, так и совершенствование известных методов восстановления. При восстановлении поверхностей деталей машин используют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать поверхность с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью. Наиболее перспективными являются электрофизические методы, использующие энергию электромагнитного поля [2]. Одним из таких ресурсосберегающих методов является электромагнитная наплавка.

Электромагнитная наплавка упрочняющего слоя. Изучение комбинированного упрочнения деталей электромагнитной наплавкой с

поверхностным пластическим деформированием предполагает в первую очередь исследование электромагнитных, а затем термомеханических кооперативных процессов.

Свободно падающий ферромагнитный порошок выстраивается в цепочки – электроды и подвергается интенсивному нагреву в электромагнитном поле. В результате его расплавления капли жидкого металла, соответствующие по составу отдельным фрагментам порошка, осаждаются на холодную металлическую подложку.

В зоне формирования поверхностного слоя, состоящей из деформирующего инструмента, разогретого при наплавке покрытия и холодной подложки – обрабатываемой детали рассчитаны температурные поля (рис. 1). По нормальным и касательным нагрузкам на контактной площадке инструмента при низком и высоком разогреве покрытия определены поля эквивалентных напряжений (рис. 2). Тепловое и напряженное состояния технологической зоны показывают, что в результате совместных действий электромагнитных потоков при наплавке покрытия и динамических нагрузок при его пластическом деформировании в поверхностном слое как в покрытии, так и за его пределами должны формироваться упрочняющие структуры.

Процессы электромагнитной наплавки рассматривались при нанесении порошков феррованадия Fe-V и быстрорежущей стали P6M5Ф3 [2, 3].

При нанесении покрытий электромагнитной наплавкой на поверхности детали формируется износостойкий слой из материала порошка и наружной части подложки, упрочненной за счет нагрева с последующим быстрым охлаждением и диффузии элементов покрытия. Между покрытием и упрочненной подложкой располагается переходная зона небольшой толщины.

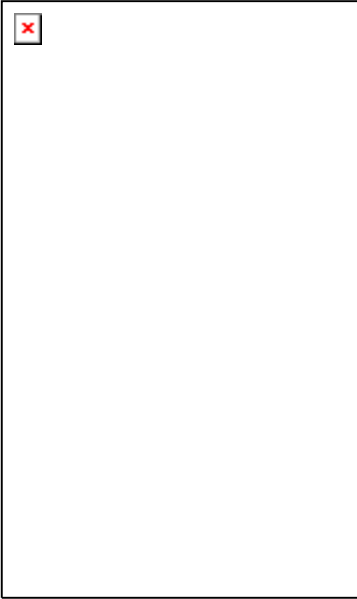


Рис. 1. Температурное поле детали (диаметр 40 мм) при деформировании наплавленного слоя в зоне формирования поверхности (1,0–200 °С)

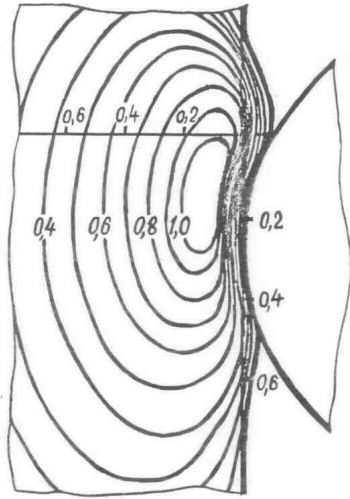


Рис. 2. Поле эквивалентных напряжений в зоне формирования поверхности (1,0–1000 МПа) при наплавке с поверхностным деформированием

Наружная часть наплавленного слоя независимо от состава используемого порошка представляет собой конгломерат очень мелких металлических пластин из пересыщенного твердого раствора легирующих компонентов порошка в α - или γ -железе. Карбидных частиц ни в одном из исследованных покрытий не обнаружено из-за их высокой дисперсности. В покрытиях из порошков Fe-V и P6M5Ф3 пластины твердого раствора имеют столбчатое расположение, ориентированное в направлении максимального теплоотода. Общим для всех покрытий является наличие микропористости, с максимумом на наружной поверхности наплавленного слоя и уменьшающейся по объему и размерам пор при продвижении вглубь покрытия.

Переходная зона при электромагнитной наплавке без дополнительных механических воздействий очень узка.

При наплавке Fe-V аустенит в структуре покрытия отсутствует. Вследствие быстрой кристаллизации тугоплавкого покрытия и отвода тепла вглубь образца углерод диффундирует в материал покрытия,

образуя тонкий переходной слой полной закалки, протяженность которого не превышает 10...15 мкм.

Под покрытием, при наплавке порошком Р6М5Ф3, располагается зона термического влияния со структурой неполной закалки. Условно эту зону можно разделить на две части. На участке, прилегающем к покрытию, феррит носит следы рекристаллизации, а бывший перлит имеет троститно-мартенситную структуру. Для участка, удаленного от покрытия, изменение затрагивает только бывший перлит.

Описанным выше структурам соответствует и характер распределения микротвердости по сечению поверхностного слоя (рис. 3 и 4, кривые 1). Твердость наплавленного слоя относительно невысока $H_{\mu} = 600$ МПа. Это связано с наличием пористости и остаточного аустенита. В зоне полной закалки, структура которой содержит мартенсит, твердость повышается до $H_{\mu} = 700$ МПа, а затем в соответствии с уменьшением концентрации углерода снижается до значений, соответствующих твердости материала детали $H_{\mu} = 200$ МПа.

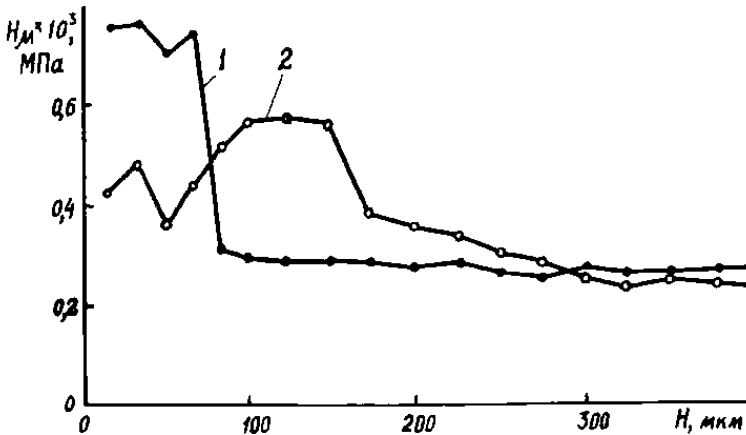


Рис. 3. Зависимости изменения микротвердости H_{μ} по глубине поверхностного слоя H после электромагнитной наплавки (1) и последующего поверхностного пластического деформирования (2) покрытия порошком FeV

Пластическое деформирование наплавляемой поверхности.

Геометрические параметры поверхности при комбинированном упрочнении зависят главным образом от пластического деформирования, однако производительность процесса определяется электромагнитной наплавкой.

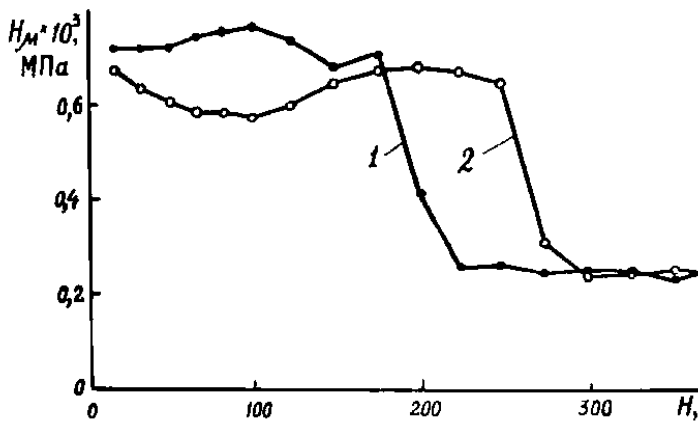


Рис. 4. Залежності змінення мікротвердості H_{μ} по глибині поверхнього слоя H після електромагнітної наплавки (1), послуючого поверхнього пластичного деформування (2) покриття порошком Р6М5Ф3

Изучение структур поверхностных слоев после комбинированного упрочнения позволяет отметить ряд особенностей по сравнению с наплавкой без последующего деформирования. Во-первых, достаточно высокая плотность и однородность наружной части наплавленного покрытия и менее плотная структура в более глубоких зонах, удаленных от поверхности, а также отсутствие ориентированного столбчатого, дендритного строения металла покрытия, присущего наплавке без деформирования. Во-вторых, сильно размыты границы между наплавленным слоем и подложкой, более развит диффузионный слой, в котором происходят превращения, соответствующие полной закалке. В-третьих, расширена зона термического влияния, фазовые превращения в ней развиты более глубоко, а изменение твердости при переходе от наплавленного слоя к подложке менее резко.

В зоне термического влияния после комбинированного упрочнения можно выделить несколько участков. На границе между наплавленным слоем и подложкой располагается участок полной закалки, состоящий из игольчатого мартенсита. К нему прилегает участок неполной закалки, состоящий из мартенсита, троостита и феррита. В феррите наблюдается дробление зерен в результате

рекристаллизации, протекающей под воздействием нагрева и деформации. Это свидетельствует о действии пластической деформации не только на наплавленный слой, но и на поверхностные слои подложки.

Пластическая деформация высокоуглеродистого аустенита при больших температурах приводит к повышению плотности дефектов, вводимых в его структуру. В результате этого более полно осуществляется распад аустенита.

О протекании диффузионных процессов в переходном слое свидетельствует характер распределения легирующих элементов, входящих в состав порошка. Распределение ванадия в поверхностном слое при нанесении порошка Fe-V показывает, что его концентрация достигает на поверхности наплавленного слоя максимума – 8 %, а затем плавно снижается в направлении подложки. О более глубоком протекании диффузионных процессов при наплавке с поверхностным деформированием свидетельствует также распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя, которое носит немонотонный характер (рис. 3 и 4, кривые 2). Минимальная твердость наблюдается вблизи границы наплавленного слоя и подложки, что связано с перераспределением углерода, из-за его повышенной растворимости в жидкой фазе и с обезуглероживанием на границе раздела жидкой и твердой фаз.

Общая глубина упрочнения при поверхностном пластическом деформировании наплавленного слоя составляет 0.15...0.25 мм, в то время как без деформирования глубина упрочнения не превышает 0.10...0.15 мм.

Рентгеноструктурный анализ позволил оценить уровень микронапряжений, дисперсность структуры, содержание углерода в твердом растворе, охарактеризовать дислокационную структуру и идентифицировать фазы в структуре покрытия.

Рентгеноструктурные исследования наплавов порошком P6M5Ф3 без последующего деформирования обнаруживают два типа пересыщенных твердых растворов: с решеткой ОЦК (мартенсит) и ГЦК (аустенит). В табл. 1 приведены результаты расчета рентгенограмм покрытий, которые после деформирования смещаются в сторону меньших углов, что связано с повышением плотности дефектов, вводимых в структуру α -твердого раствора. В покрытии из P6M5Ф3 весь углерод находится в твердом растворе (табл. 2). Расчетные данные о плотности дислокаций показывают, что

пластическое деформирование повышает плотность дефектов, вводимых в структуру мартенсита, а также уменьшает размеры блоков когерентного рассеяния (табл. 3).

Таблица 1

Результаты исследования и расчета рентгенограмм покрытий

Покрытие	Угол скольжения, θ_c , град	Параметр решетки, d/n
Расчетные значения		
	22.40	2.020
Экспериментальные значения		
Р6М5Ф3 (без ППД)	22.38	2.026
Р6М5Ф3 (с ППД)	22.35	2.028

Таблица 2

Содержание углерода в мартенсите покрытий

Покрытие	Параметр решетки α -фазы, нм	Содержание углерода С в мартенсите, %
Р6М5Ф3 (без ППД)	0.2867	0.90
Р6М5Ф3 (с ППД)	0.2868	0.89

Таблица 3

*Размеры блоков когерентного рассеяния
и плотности дислокаций покрытий*

Покрытие	Дисперсность блоков когерентного рассеяния D , нм	Физическое уширение линии β , рад	Плотность дислокаций ρ^* , см^{-2}
Р6М5Ф3 (без ППД)	30	$7.26 \cdot 10^{-4}$	$1.04 \cdot 10^{10}$
Р6М5Ф3 (с ППД)	20	$7.68 \cdot 10^{-4}$	$1.13 \cdot 10^{10}$

Оценка уровня микронапряжений демонстрирует, что они ниже, чем при других методах нанесения покрытий. Это положительным образом сказывается на эксплуатационных свойствах упрочненных деталей.

Заключення. Формирование текстуры в поверхностном слое, повышенная плотность дефектов кристаллического строения, образование дисперсных равномерно распределенных карбидов при электромагнитной наплавке с поверхностным пластическим деформированием способствуют повышению эксплуатационных свойств упрочненных деталей машин. Управляя кооперативными термомеханическими процессами при наплавке, термообработке и пластическом деформировании, посредством регулирования параметров электромагнитного поля, можно при комбинированной обработке создавать поверхностные слои с требуемым для эксплуатации качеством.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Акулович Л.М.* Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
2. *Кожуро Л.М., Чемисов Б.П.* Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Наука и техника, 1995. – 232 с.
3. *Хейфец М.Л.* Проектирование процессов комбинированной обработки. – М: Машиностроение, 2005. – 272 с.

ПОЛОНСКИЙ Леонид Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения и конструирования технических систем Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения;
- история науки и техники.

Тел.: 8 (0412) 22–69–19.

E-mail: pol@ztu.edu.ua

КОЖУРО Лев Михайлович – доктор технических наук, профессор Белорусского государственного аграрного технического университета (Минск, Беларусь).

Научные интересы:

- технология машиностроения.

ХЕЙФЕЦ Михаил Львович – доктор технических наук, профессор Полоцкого государственного университета (Новополоцк, Беларусь).

Научные интересы:

- технология машиностроения;

- процессы комбинированной обработки материалов.

Подано 20.08.2007