УДК 622.232

В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев
Криворожский национальный университет, Украина
Тел./Факс: +38 (097) 3468909; *E-mail: anton.ryazancev@inbox.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА, ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ШЕСТЕРЕН ПУТЕМ ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрены особенности технологии плазменного упрочнения поверхностей зубьев крупномодульных колес. Приведены характеристики оборудования для плазменного упрочнения. Обосновано преимущество метода для повышения эксплуатационных показателей деталей горных машин.

Ключевые слова: *плазмотрон прямого действия, плазменный нагрев, термический цикл, упрочненный слой, эксплуатационные показатели.*

Введение

В промышленности широкое распространение находят крупногабаритные и крупномодульные зубчатые передачи. Например, шаровые мельницы, предназначенные для измельчения различных руд, угля и другого сырья, оборудуются открытыми зубчатыми передачами, модуль зубьев которых равен $m = 20...34$ мм, ширина зубчатого венца $b = 600...1000$ мм. Они работают в условиях ударно-циклических контактных нагрузок, что вызывает высокие требования к несущей способности зубчатой передачи. Снижение несущей способности определяется такими причинами: разупрочнение зуба у его основания, усталостное выкрашивание контактной поверхности и износ профиля зуба. Повреждение зубчатых колес может также наступать в результате волнистого износа. Это явление вызвано пластическим течением поверхностного слоя вследствие циклического контактирования в режиме скольжение-качение, а также недостаточной твердостью. Ключевыми вопросами при проектировании зубчатых передач является выбор материала и способа его упрочнения.

Для изготовления значительной части деталей машин и технологического инструмента в отечественной промышленности широко используются сравнительно дешевые низколегированные стали с повышенным содержанием углерода и чугуны. Эксплуатационная стойкость таких деталей в современных условиях не отвечает возрастающим требованиям производства ввиду увеличивающихся затрат на запасные части, текущий и капитальный ремонт агрегатов, связанный с их заменой.

Учитывая изложенное, проблема продления эксплуатационного ресурса деталей является весьма актуальной в экономическом, в экологическом и ресурсосберегающем аспектах, поскольку их первичное производство и утилизация сопровождаются потреблением сырьевых и энергетических ресурсов, а также техногенным загрязнением окружающей среды. Перспективным направлением решения этой проблемы представляется упрочняющая термическая обработка рабочей поверхности концентрированным потоком энергии [1]. Образующиеся при скоростном нагреве и охлаждении структуры закалочного типа обладают высокой твердостью, износостойкостью, сопротивлением разрушению.

Широкое промышленное применение большинства известных способов упрочняющей обработки концентрированным потоком энергии (лазерной, электроннолучевой, катодно-ионной и др.) сдерживается высокой стоимостью и сложностью оборудования, недостаточными его надежностью и производительностью,

необходимостью использования вакуума, специальных помещений с особыми требованиями, потребностью в квалифицированном обслуживании, высокими эксплуатационными расходами и др. В этих условиях, для продления эксплуатационного ресурса быстроизнашивающихся деталей рациональным по параметрам универсальности, доступности, экологичности и экономической эффективности представляется способ поверхностной термообработки плазменной дугой [1,2,3]. Не изменяя параметров шероховатости поверхности, такая термообработка легко встраивается в технологический процесс подготовки и ремонта деталей, являясь финишной операцией, малозатратна, достаточно производительна и позволяет эффективно увеличить их эксплуатационную стойкость.

Основное содержание и результаты работы

Целью плазменной закалки является повышение эксплуатационного ресурса деталей машин за счет упрочнения их поверхностного слоя (толщиной до нескольких миллиметров) термической обработкой плазменной дугой при неизменном общем химическом составе материала и сохранении во внутренних слоях первоначальных свойств исходного металла.

Упрочнение является результатом высокоскоростного локального нагрева плазменной дугой поверхностного слоя изделия до высоких (выше AC_3) температур и быстрое его охлаждение со сверхкритической скоростью в результате теплоотвода в глубинные (внутренние) слои материала изделия. Образующиеся при скоростном нагреве и охлаждении структуры закалочного типа обладают высокими твердостью, износостойкостью и сопротивлением разрушению. Эффект от плазменной закалки определяется повышением эксплуатационных свойств детали благодаря изменению физико-механических характеристик поверхностного слоя, вследствие образования специфической структуры и фазового состава металла, а также получения на поверхности сжимающих остаточных напряжений.

Структурные превращения в целом соответствуют происходящим при объемной закалке, однако, высокие скорости нагрева и охлаждения вызывают изменение соотношений между структурными составляющими, изменение их морфологии вследствие повышенной дефектности кристаллического строения (увеличение плотности дислокаций, измельчение блоков и рост напряжений в кристаллической решетке)[1,2].

Характер и объем протекания перечисленных явлений зависит от теплофизических свойств обрабатываемого материала, скорости относительного перемещения заготовки и источника нагрева, тепловой мощности плазменной дуги [2]. Меняя указанные параметры, можно добиваться увеличения степени проявления той стороны плазменного воздействия на материал заготовки, доминирование которой считается целесообразным для данного случая.

Структура упрочненного слоя, характеризующаяся большой твердостью и высокой дисперсностью, оказывает определяющее влияние на изменение эксплуатационных характеристик упрочненных материалов — износостойкость, механические свойства (прочность, пластичность, трещиностойкость, выносливость), тепло- и коррозионную стойкость.

Характер изменения эксплуатационных характеристик при плазменном упрочнении наряду с фазовыми и структурными превращениями обусловлен также реализацией определенных механизмов упрочнения при их взаимосвязи. Известно, что в результате закалки происходит комплексное упрочнение материала, определяемое влиянием дефектов тонкой кристаллической структуры (дислокаций, вакансий и их комплексов), мартенситными превращениями и включениями дисперсной фазы [1,3]. Применительно к плазменному упрочнению влияние различных механизмов

структурного и субструктурного упрочнения на эксплуатационные характеристики пока не изучено, что подтверждает актуальность дальнейших исследований

В начале необходимо сформулировать требования, или критерии, которым должен удовлетворять источник нагрева в условиях данного способа обработки, а именно – упрочнение крупномодульных шестерен.

Первое требование к источнику нагрева – возможность регулирования ширины нагрева.

Второе требование к источнику нагрева – отсутствие оплавления поверхностного слоя.

Третий критерий – обеспечение равномерной глубины структурных превращений.

Четвертый критерий – достижения необходимой микроструктуры упрочненного слоя.

Очевидно, что избежать оплавления металла можно за счет снижения локальности плазменного воздействия, либо за счет значительного увеличения скорости относительного перемещения пятна нагрева и детали. Возможность управления плотностью теплового потока, направляемого в заготовку, дает применение магнитно-отклоняющей системы, которая заставляет плазменную дугу сканировать. Всесторонний анализ вариантов-прототипов выявил предпосылки для создания такой схемы плазменного упрочнения, которая бы имела широкие технологические возможности и соответствовала критериям, указанным выше. Эти предпосылки реализованы в способе, разработанном с участием авторов [3]. Новый способ предусматривает поверхности заготовки без оплавления по всей ширине обработки. Избежать оплавления поверхности удаляется за счет увеличения пятна нагрева путем сканирования плазменной дуги в переменном магнитном поле.

Технологический процесс и оборудование

Плазмотроны для плазменного упрочнения должны удовлетворять как общим требованиям, присущим всем плазмотронам (высокая мощность, стабильность параметров плазменного потока, значительная энергетическая эффективность, большая длительность непрерывной работы, надежность конструкции, простота эксплуатации), так и обладать рядом специфических свойств: защищенность токоведущих частей и способность регулировки положения плазмотрона. Кроме того, для обеспечения эффективного нагрева материалов с различными теплофизическими характеристиками в конструкции плазмотрона должно быть предусмотрено варьирование параметров нагрева в достаточно широких пределах [2] .

При выборе генераторов плазмы предпочтение следует отдавать плазмотронам прямого действия. Это связано с тем, что работа плазмотрона косвенного действия сопровождается выделением шума с высоким общим уровнем, что крайне резко ухудшает санитарно-гигиенические условия работы термиста. Недостатком плазмотронов прямого действия является высокая локальность нагрева ими поверхности обрабатываемой детали [2].

С учетом изложенных требований был использован однодуговой плазмотрон постоянного тока ПВР-401. Плазмообразующий газ – воздух. По расположению плазменной дуги относительно дугового канала, а также по характеру воздействия дуги на обрабатываемый материал, он относится к плазмотронам прямого действия.

Снижение локальности нагрева осуществляется за счет наложения на поток генерируемой плазмы внешнего переменного магнитного поля. Так как поток плазмы представляет собой движущиеся заряженные частицы, то это приводит к тому, что прямолинейно движущаяся заряженная частица плазмы при попадании во внешнее

магнитное поле отклоняется от первоначального направления своего движения. Если первоначальное направление движения заряженных частиц перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, то в магнитном поле заряженные частицы движутся по дуге окружности. В результате этого поток плазмы оказывается как бы изогнут по дуге окружности. Расположение центра кривизны дуги окружности определяется направлением силовых линий и магнитной индукцией внешнего магнитного потока. Переменный характер внешнего магнитного поля приводит к колебаниям потока плазмы с частотой изменение магнитного поля, а при достаточной частоте магнитного поля интегральное пятно нагрева на поверхности заготовки вытягивается в линию, следствием чего является снижение локальности нагрева.

Для создания внешнего магнитного поля серийно выпускаемый плазмотрон прямого действия 4 (ПВР-401) снабжают специальной магнитной системой (рис. 1), которая состоит из двух сердечников с катушками *3* и наконечником *2*.

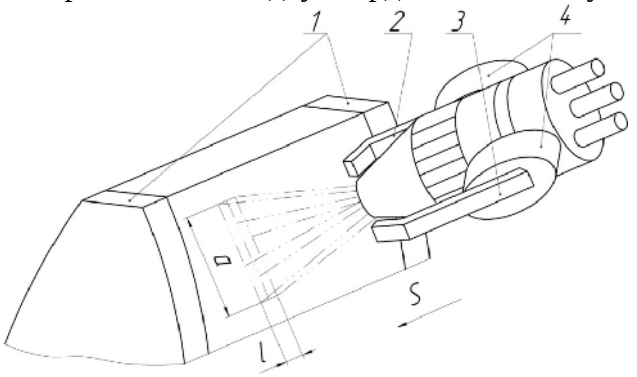

Рис. 1. Схема устройства

Наконечники имеют водоохлаждаемые каналы, так как нагрев металла наконечников выше температуры, соответствующей точке Кюри, не допускается. Корпуса катушек *3* выполнены из термостойкого изолирующего материала, например фторопласта-4. Электромагнитные катушки подключают к источнику переменного напряжения. Частота источника может быть промышленной, т.е. равной 50 Гц. Применение рассматриваемого устройства в комплекте с плазмотроном ПВР-401 (диаметр сопла d_c=6 мм) позволяет получать размах колебаний 0...60 мм, который регулируется путем изменения силы тока, питающего магнитную систему. Исследования показали, что сканирующая дуга обеспечивает достаточно хорошую равномерность теплового потока, плотность которого может варьироваться как за счет изменения параметров дуги, так и путем изменения амплитуды ее колебаний. Так же для избегания оплавления на краях детали, к шестерне прикрепляются специальные накладки 1.Таким образом, сочетание плазмотрона прямого действия с описанной магнитной системой позволяет иметь мощный сосредоточенный тепловой источник для интенсивного нагрева поверхности обрабатываемой детали. Перемещение такого источника со скоростью, превышающей скорость распространения тепла в материале обрабатываемой детали, приводит к интенсивному отводу тепла от поверхностных слоев в тело детали. В результате этого скорость охлаждения поверхностных слоев достигает нескольких сотен градусов в секунду, что обеспечивает структурные превращения в металле поверхностных слоев детали. Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, глубина закаленного слоя с мелкоигольчатой мартенситной структурой составляет 3...5 мм.

Использование такой технологии позволяет осуществлять поверхностную местную закалку крупногабаритных деталей приводов. Учитывая сложность закалки по традиционным технологиям крупномодульных шестерен, авторы считают, что максимальный эффект от плазменной закалки может быть получен при ее применении для зубчатых колес, вал-шестерен. Кроме того, при плазменной закалке зубчатых колес может быть достигнут дополнительный эффект. Он обусловлен возможностью

получения переменной твердости по поверхности зубьев, что позволяет управлять процессом изнашивания зубьев с целью поддержания постоянства качественных показателей зацепления зубчатых колес.

Сокращение длины дуги, как и повышение расхода плазмообразующего газа, ведет к увеличению «жесткости» дуги, и для получения той же амплитуды колебаний ее требуется значительно большая напряженность магнитного поля [2]. Поэтому магнитно-отклоняющую систему следует устанавливать непосредственно на плазмотроне, а длину магнитопроводов необходимо делать как можно меньше, т.к. от этого зависит эффективность работы системы. Предварительные эксперименты позволили уточнить технические данные плазмотрона и свести их в таблицу.

Таблица 1. Технические характеристики плазмотрона

Наименование параметра	Величина
1. Сила тока дуги, А	100…400
2. Напряжение, В	110…140
3. Напряжение магнитно-отклоняющей системы, В	50…1000
4. Диаметр сопла, мм	6
5. Длина дуги, мм	35…40
6. Размер пятна нагрева в направлении подачи, мм	5…50
7. Амплитуда поперечного сканирования, мм	30…120
8. Расход плазмообразующего газа (воздух), $м^3$/год	2,5…3
9. Частота поперечного сканирования, пдв. х/хв	10…100
10. Вес плазмотрона, кг	10…13

Заключение

Можно отметить следующие преимущества плазменной закалки по сравнению с другими способами термообработки:

1) при закалке концентрированными источниками энергии в силу специфичности обработки (высокие скорости нагрева и охлаждения) удается получить такую структуру и свойства поверхностного слоя, которые недостижимы при традиционных способах термической обработки;

2) упрочняется только поверхностный слой, а сердцевина остается вязкой, что обеспечивает повышенное сопротивление одновременно изнашиванию и усталости;

3) отсутствие или минимальные деформации упрочняемых деталей, что позволяет повысить точность их изготовления, снизить трудоèмкость механической обработки и затраты на изготовление;

4) высокая производительность;

5) при закалке без оплавления поверхности не требуется последующая механическая обработка, что позволяет использовать ее в качестве финишной операции технологического процесса;

6) наличие в поверхностном слое сжимающих напряжений и присутствие остаточного аустенита повышают сопротивляемость зарождению и распространению трещин;

7) высокий эффективный КПД нагрева плазменной дугой (до 85 %), для сравнения, при лазерном упрочнении – 5 %;

8) простота обслуживания, мобильность, невысокие стоимость и эксплуатационные расходы, малые габариты технологического оборудования, возможность автоматизации и роботизации технологического процесса.

10) по сравнению с лазерной и электроннолучевой закалкой плазменная имеет следующие преимущества:

– стоимость оборудования на порядок ниже;

– простота работы на установке и его обслуживания, т.е. не требуется высококвалифицированный обслуживающий персонал;

– мобильность установки, т.е. возможность перемещения и быстрого монтажа на любом станке, обеспечивающем необходимую скорость перемещения детали или плазматрона;

– не требуется, как при лазерной закалке, наносить на поверхность специальные покрытия для увеличения поглощения лазерного излучения.

Технология закалки плазменной дугой является оптимальной по параметрам универсальности, доступности, экологичности и экономической эффективности. Она позволяет увеличить срок службы деталей, минимум, в 1,5…2 раза и сократить затраты на обслуживание и ремонт оборудования на 40…50 %. Кроме того, эта технология производительней и дешевле других способов поверхностной закалки (в том числе и ТВЧ).

Список литературы:

1. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / Н.А. Резников, М.А. Шатерин, В.С. Кунин и др. – М: Машиностроение, 1986. – 232 с.

2. Шатерин М.А. Плазмотрон для плазменно-механической обработки / М.А. Шатерин, М.Т. Коротких, В.П. Нечаев // Сварочное производство. – 1986. – №8. – С. 27,28.

3. Нечаев В.П. Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагрівом / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – 2010. – Вип. 26. – С. 157-160.

4. Нечаєв В.П. Критерії вибору джерела нагрівання для умов поверхневої плазмової обробки / В.П. Нечаев, А.О. Рязанцев // Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 29. – С. 172-176.

5. Нечаєв В.П. Плазмово-механічна обробка високоміцних матеріалів / В.П. Нечаєв, С.В. Думіна // Збірник праці за матеріалами науково-практичної конференції «НАУКА-2009». – Кривий Ріг: КТУ, 2009. – С. 28-29.

Надійшла до редколегії 20.02.2012.

В.П. Нечаєв, А.О. Рязанцев

ДОСЛІДЖЕННЯ, РОЗРОБКА, ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ШЕСТЕРЕНЬ ШЛЯХОМ ПЛАЗМОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ЇХ ПОВЕРХОНЬ

Розглянуті особливості технології плазмового зміцнення поверхонь зубів крупномодульних коліс. Наведені характеристики устаткування для плазмового зміцнення. Обґрунтовані переваги методу для підвищення експлуатаційних показників деталей гірничих машин.

Ключові слова: *плазмотрон прямої дії, плазмовий нагрів, термічний цикл, зміцнений шар, експлуатаційні показники.*

W.P. Nechaev, A.A. Ryazancev

RESEARCH, ELABORATION AND GROUNDS OF THE RESOURCES FOR WORK RELIABILITY OF INCREASE OF LARGE MODULE COG–WHEELS BY PLASMA HARDENING OF SURFACES

The features peculiarities of the surfaces plasma hardening wheels with large module technology are considered. The features of the equipment for the plasma hardening are shown. The advantages of the method for the increase of operating indices of the mining machines details are grounded.

Keywords: *direct action plasmatron, plasma heating, the thermal cycle, the strengthened layer, operating indices.*