

## ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ ТРАКТОРОВ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

Лузан С.А. д.т.н., проф., Кириенко Н.М. к.т.н., доц.

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
Харьковский национальный технический университет сельского  
хозяйства им. Петра Василенко*

*Статья посвящена исследованию свойств и разработке технологии воздушно-плазменного напыления антифрикционного покрытия на вал коробки передач трактора с целью повышения ресурса*

**Введение.** Как свидетельствуют статистические данные Украинской Ассоциации «Надежность машин и сооружений», за период эксплуатации затраты металла на запчасти тракторного двигателя составляют 50-100 % его массы, шасси трактора – 100 %. Затраты средств на техническое обслуживание и ремонт автомобилей, тракторов за весь срок службы в 3-6 раз превышает стоимость их изготовления.

Развитие современной тракторной техники обусловлено усилением условий эксплуатации агрегатов, узлов и деталей. В связи с этим повышение износостойкости деталей машин, определяющих их ресурс, является актуальной задачей.

**Анализ основных достижений и публикаций.** В монографии [1] на основе анализа влияния ряда факторов: нагрузки, частоты вращения, степени загрязнения смазочной среды, конструктивных особенностей узлов, сопряжений на интенсивность изнашивания и динамику накопления усталостных повреждений, а также с учётом накопленного опыта повышения работоспособности деталей и узлов на Харьковском тракторном заводе была определена номенклатура деталей шасси колесных тракторов типа Т-150К требующих повышения долговечности. Номенклатура содержит 36 деталей. Преобладающие виды повреждений: износ – 33 детали, питтинг зубьев – 2 детали, спекание втулки с валом – 1 деталь. Если проанализировать выбранные возможные пути повышения долговечности, то на долю упрочняющих технологий приходится 9 деталей (плазменное напыление – 3 дет., химико-термическое упрочнение – 3 дет., лазерное упрочнение – 3 дет.), что составляет более 27%, а среди них плазменное напыление и лазерное упрочнение занимают объем 67%.

Ресурс большинства машин зависит от относительно небольшого количества деталей. Это позволяет планировать объемы их восстановления, разрабатывать, выпускать и внедрять специальное оборудование, создавать и развивать

специализированные производства, наращивать объёмы и расширять номенклатуру восстановления изношенных деталей.

Агрегаты и узлы автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин представляют собой совокупность множества деталей типа: вал, втулка, рычаг, корпус, шестерня, подвергающиеся в процессе эксплуатации воздействию различного рода нагрузкам и среды, приводящих к необратимым процессам износа их рабочих поверхностей.

При обработке статистических данных по отказам деталей автомобилей установлено следующее их распределение: износ – 53,4%; разрушение (трещины, поломка, обрыв части детали) – 18,9%; деформация (растяжение, скручивание, изгиб) – 10,4%, другие виды дефектов – 17,3%.

Существующие традиционные методы упрочнения: термические, химико–термические, поверхностное пластическое деформирование не всегда отвечают предъявляемым требованиям к ресурсу. Известные способы наплавки обеспечивают получение необходимых свойств у рабочих поверхностей, однако, значительные тепловложения в материал детали, без которых невозможно произвести наплавку, приводят к наибольшим термическим остаточным напряжениям и деформациям, устранить которые, в ряде случаев, не представляется возможным. Кроме того, получение тонких наплавленных покрытий на поверхности деталей сложной формы значительно усложняет технологический процесс и он трудно поддается механизации.

Эффективным способом, лишенным вышеперечисленных недостатков, является плазменное напыление. В настоящее время у нас в стране и за рубежом накоплен большой опыт по применению плазменного напыления защитных покрытий. Фирма «Metco» (Италия) широко применяет плазменное напыление с целью защиты от износа, коррозии, а также для восстановления изношенных деталей машин [2]. Фирма «Plasma – Technic» (Швейцария) производит напыление сплавом ОТЗ ( $Al_2O_3+3\%TiO_2$ ) или ОТ13 ( $Al_2O_3+13\%TiO_2$ ) деталей текстильного оборудования, что значительно повышает их стойкость против износа [3]. На Одесском заводе поршневых колец внедрен технологический процесс изготовления компрессионных поршневых колец с плазменным молибденовым покрытием [4].

**Формулировка целей статьи.** Разработать рекомендации по совершенствованию технологии плазменного повышения ресурса деталей тракторов с учетом обеспечения взрывопожаробезопасности.

**Основной материал.** Одной из деталей, определяющих ресурс трактора Т-150К, является вал первичный коробки передач. Зубья венца вала в процессе эксплуатации подвергаются деформации из-за повышенного нагрева в сопряжении со шлицами диска сцепления двигателя.

Для повышения ресурса работы вала первичного коробки передач был выбран антифрикционный порошок на основе меди ПГ-19М-01 и исследованы его триботехнические свойства.

Покрытия наносили методом плазменного напыления на основу из стали 25ХГТ, прошедшую химико-термическую обработку (нитроцементацию),

обеспечивающую твердость 57-65 HRC в поверхностном слое глубиной 0,8-1,3 мм.

Для исследования покрытий применяли оптическую (микроскоп МИМ-8), электронную растровую микроскопию (микроскоп JSM-840 с системой микроанализаторов LINK 860/500), а также рентгеновский микроанализатор MAP-3, способ рентгеноструктурного фазового анализа на дифрактометре ДРОН-2.

Триботехнические свойства плазменных покрытий изучали на машине трения, позволяющей осуществлять возвратно-поступательное движение полусферического индентора по плоской поверхности образцов. Полусферический индентор радиусом 4 мм из сплава ВК-8 позволял получить в зоне трения контактные напряжения 1000 МПа при нормальной нагрузке 9,8 Н. Плазменные покрытия из сплава на основе меди ПГ-19М-01 наносили на плоские образцы Ø49 мм, h=3 мм из стали 25ХГТ толщиной 20 и 30 мкм. Скорость скольжения составляла 0,018 м/с, путь трения – 100 м (5000 циклов) при температуре 20<sup>0</sup>С. Испытания производили в среде минерального масла МС-20. Степень износа образцов определяли по потере веса.

Общую пористость определяли на отделенных от подложки покрытиях в соответствии с ГОСТ 18898-89.

Рентгенофазовый анализ плазменных покрытий показал, что основной фазой в покрытиях является твердый раствор алюминия в меди с периодом решетки  $a = 3,6479 \text{ \AA}$  существенно превышающим период решетки чистой меди  $a = 3,61479 \text{ \AA}$  [5].

Методами рентгеновской тензометрии по положению линии (420)  $\alpha$  – твердого раствора Al в Cu установлено, что покрытие толщиной 20 мкм соответствуют растягивающие напряжения величиной  $\sigma = 235 \text{ МПа}$ , действующие в отражающем слое (слое, формирующем картину дифракции) толщиной до 5 мкм. Для расчета напряжений по измеренной деформации решетки использовалось значение модуля упругости  $E = 11,8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$  [6].

В покрытии толщиной 30 мкм величина растягивающих напряжений в 2,5 раза меньше и составляет  $\sigma = 93 \text{ МПа}$ , а в покрытии толщиной 0,5 мм, отделенном от основы, остаточные напряжения соответствуют  $\sigma = 103 \text{ МПа}$  на толщине дифракционного слоя.

Общая пористость покрытий достигает 46-48 %. Это преимущественно открытая пористость. Для покрытий толщиной 20-30 мкм она составляет 30-35 %. В толстых (125 мкм) покрытиях общая пористость несколько снижается и, главным образом, за счет уменьшения вклада открытой пористости. Общий объем и средний размер пор снижается в глубь от приповерхностной зоны покрытия до его основы. Открытая пористость преобладает в приповерхностной со стороны напыления зоне глубиной 25-30 мкм при толщине покрытия 125 мкм. В более тонких покрытиях формируется пористая структура, имеющая лабиринтный характер, и преобладают поры, имеющие открытый выход наружу.

Анализ микроструктуры поверхности покрытия толщиной свыше 100 мкм показал, что она крайне неоднородна: гладкие бесструктурные участки

чередуются с частицами различной морфологии (рис.1).

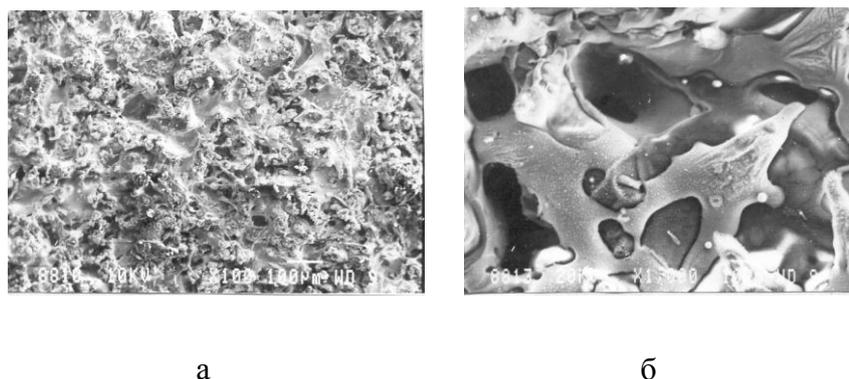


Рисунок 1 – Микроструктура наружной поверхности отделенного от подложки покрытия: а – x100; б – x1000.

Износ покрытий на пути трения 100 м не превышал 0,1 мг, а линейный износ (глубина дорожек трения) составил около 10 мкм. Коэффициент трения в процессе испытаний равнялся  $k = 0,1$  и не зависел от толщины покрытия. В условиях сухого трения наблюдался практически монотонный рост коэффициента трения от начального значения  $k = 0,15$  до максимального  $k = 0,3$  в конце периода испытаний.

Исследования износостойкости стали 25ХГТ без покрытия показали, что в результате сухого трения на пути трения 100 м происходит увеличение коэффициента трения от начального значения  $k = 0,15$  до  $k = 0,8$ . При трении в среде масла МС-20 коэффициент трения в течение всего времени испытаний имел постоянную величину  $k = 0,15$ .

Исследования дорожек трения показали существенное различие характера изнашивания плазменных покрытий для случаев сухого и граничного трения. При сухом трении помимо пластической деформации частиц покрытия наблюдался процесс микрорезания, приводивший к образованию царапин на дне дорожки трения. Последнее обусловлено схватыванием частиц износа с материалом индентора и повреждением поверхности покрытия. Наличие же смазки в зоне трения препятствует протеканию процесса схватывания и практически исключает микрорезание. Усталостное разрушение зерен покрытия приводит к образованию мелкодисперсных частиц износа размером порядка 1 мкм. Поверхность образовавшихся частиц инактивируется смазкой, предотвращая последующее схватывание, как с покрытием, так и с индентором.

Для реализации этой технологии на ОАО «ХТЗ» был организован специализированный участок плазменного напыления, оснащенный оборудованием НПО «Комплекс» г. Черкассы. В состав которого входят: блок плазменного напыления – смеситель газов СГ-1, питатель порошка ПП-2500, плазмотрон ПМ-1М, установка холодильная «Холод-1», источник питания ИП-7, установка плазменного напыления, аспирационное марки А-9000, установка струйно-абразивная марки АП-1М, установка моечная марки УМ-50М. В качестве плазмообразующих и транспортирующих газов в данном

оборудовании предусмотрено применение смеси аргона с водородом.

С целью снижения затрат на плазмообразующие газы, уменьшения взрывопожароопасности участка были выполнены работы по модернизации комплекса плазменного напыления, включающие установку источника питания АПР-402М и плазмотрона для воздушного плазменного напыления. Учитывая, что воздух, применяемый в качестве плазмообразующего газа, является сильным окислителем напыляемой бронзы, для оптимальных параметров режима нанесения покрытия использовали метод планирования эксперимента [7]. В качестве параметра оптимизации была выбрана прочность сцепления напыленного слоя с основой  $\sigma_{сц}$ , независимых факторов: ток дуги  $I_0$ , расход плазмообразующего газа  $Q$ , дистанция напыления  $L$ . При решении этой задачи был использован статистический метод планирования экстремальных экспериментов и реализован полный факторный эксперимент типа  $2^3$ . Полученная математическая модель, устанавливающая связь между технологическими параметрами режимов воздушно-плазменного напыления и прочностью сцепления с подложкой, имеет вид [7]:

$$\sigma_{сц} = 3,70 - 0,19 \cdot I_0 + 0,51 \cdot Q - 0,69 \cdot L,$$

где  $I_0$  – ток дуги;  $Q$  – расход плазмообразующего газа;  $L$  – дистанция напыления.

Для определения оптимального соотношения факторов режима плазменного напыления применили метод крутого восхождения. Оптимизацию проводили до выполнения условия  $\sigma_{сц} \geq 45$  МПа.

Дополнительные эксперименты, проведенные при найденных теоретических значениях факторов, подтвердили данные результаты.

Оптимальным режимом воздушно-плазменного напыления порошка марки ПГ-19М-01 следует считать:

ток дуги – 115 А;

напряжение дуги – 210 В;

расход плазмообразующего газа – 3,3 м<sup>3</sup>/ч;

дистанция напыления – 0,116 м.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что применение метода воздушно-плазменного напыления позволяет получать антифрикционные покрытия из порошка на основе меди ПГ-19М-01, увеличивающие срок службы деталей, работающих в условиях ограниченной смазки или ее отсутствия. Коэффициент трения в режиме граничного трения и при отсутствии смазки не превышает 0,1 и 0,3 соответственно при контактных напряжениях до 1000 МПа и скоростях скольжения 0,018 м/с.

Рентгенофазовым анализом плазменного покрытия из порошка ПГ-19М-01 было установлено, что основной фазой в покрытии является твердый раствор алюминия в меди с периодом решетки  $a=3,6479\text{\AA}$  существенно превышающим период решетки чистой меди  $a=3,61479\text{\AA}$ .

Также результаты сравнительных испытаний износостойкости плазменного покрытия бронзовым порошком ПГ-19М-01 и оловянистой бронзы

05Ц5С5, выполненные на машине трения типа МИ по схеме диск-колода в индустриального масла, показали более высокую износостойкость напыленной бронзы. Полученные результаты подтвердили эффективность разработанной технологии плазменного напыления.

На основании выполненного комплекса исследовательских работ была разработана и реализована в производственных условиях на ОАО “Харьковский тракторный завод им. С. Орджоникидзе” технология воздушно-плазменного напыления антифрикционного покрытия на основе меди ПГ-19М-01 на зубья венца вала первичного коробки передач трактора Т-150К.

**Выводы.** 1. Фазовый состав покрытий из сплава на основе меди ПГ-19М-01 качественно соответствует фазовому составу напыляемого порошка. Покрытие состоит из  $\alpha$  – твердого раствора алюминия в меди, содержащего до 17 ат.% Al, и соединения  $Cu_3Al$ . Порошок отличается несколько большим содержанием фазы  $Cu_3Al$ .

2. Общая пористость покрытий из сплава ПГ-19М-01 достигает 48%. Она снижается в направлении от внешней поверхности покрытия к его основе.

3. Износ плазменных покрытий ПГ-19М-01 на пути трения 100 м не превышает 0,1 мг. Коэффициент  $k$  в режиме граничного трения имеет постоянную величину и для пары покрытие ПГ-19М-01 – сплав ВК-8 составляет  $k=0,1$ . Для стали 25ХГТ без покрытия при тех же условиях коэффициент трения выше и достигает значения 0,15. При отсутствии смазки коэффициент трения пар покрытие ПГ-19М-01 – сплав ВК-8 и сталь 25ХГТ – сплав ВК-8 значительно выше:  $k=0,3$  и  $k=0,8$  соответственно.

4. Установлен оптимальный режим воздушно-плазменного напыления антифрикционного покрытия на основе меди ПГ-19М-01, обеспечивающий взрывопожаробезопасность технологии.

#### Список литературы

1. Кухтов В. Г. Долговечность деталей шасси колёсных тракторов / Кухтов В. Г. – Харьков : ХНАДУ, 2004. – 292 с.
2. Okada M., Maruo H. New plasma spraying and its application / M. Okada , H. Maruo // British Welding Journal. – 1968. – V. 15. - № 8. – P. 371-386.
3. Техника плазменного напыления. Основы, способы, применение. – Швейцария : Плазма-техник АГ, 1974 – 16 с.
4. Соколов А. Д. Разработка и внедрение оборудования и техпроцесса напыления молибдена на поршневые кольца ДВС / Соколов А. Д. // Тез. докл. на III-ей респ. науч. -техн. конф. по современным методам наплавки и наплавочным материалам. – Харьков. – 1981. – С. 27.
5. Самсонов Г.В. Свойства элементов. – М.: Металлургия, 1976. – Ч. 1. – 600 с.
6. Тихонов Л.В. Структура и свойства металлов и сплавов / Л.В. Тихонов, В.А. Кононенко. – Киев: Наукова думка, 1985. – 568 с.
7. Тодоров П.П. Технология плазменного напыления деталей тракторов с применением воздуха / П.П. Тодоров, С.А. Лузан // Технологические системы. – 2001. – №1. – С. 5-7.

## **Анотація**

### **ШЛЯХИ ВИРШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ ТРАКТОРІВ ПЛАЗМОВИМ НАПИЛЕННЯМ З УРАХУВАННЯМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИБУХОПОЖЕЖОБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЇ**

Лузан С. А. д. т. н., проф., Кірієнко М.М. к.т.н., доц.

*Стаття присвячена дослідженню властивостей і розробки технології повітряно-плазмового напилення антифрикційного покриття на вал коробки передач трактора з метою підвищення ресурсу*

## **Abstract**

### **SOLUTIONS TO PROBLEMS OF INCREASING RESOURCE DETAILS TRACTORS BY PLASMA SPRAYING WITH A VIEW TO ENSURING THE FIRE EXPLOSION SAFETY TECHNOLOGY**

Luzan S., d.t.s., Kyriienko M., k.t.s.

*The article is devoted to the study of the properties and the development of technology air plasma spraying anti-friction coating on the gear shaft of the tractor to increase resource*