

УДК 621.793

**М.А. Белоцерковский, доц., канд.техн.наук**

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь*

**А.И. Камко, канд.техн.наук**

*РУПП «Гомельский завод литья и нормалей», г. Гомель, Беларусь*

## Повышение работоспособности тяжело нагруженных узлов трения скольжения сельхозмашин нанесением покрытий с последующим трибомодифицированием

В работе описаны технологии формирования антифрикционного износостойкого слоя на рабочих поверхностях шарнирных сопряжений жатки. Приведены методы механического плакирования гибким инструментом и трибомеханического модифицирования, а также трибомеханического модифицирования стальных газотермических покрытий.

**узлы трения скольжения сельхозмашин, антифрикционные покрытия, механическое плакирование, трибомодифицирование, смазка с наноразмерными наполнителями, газотермические стальные покрытия**

**Введение.** В современных сельскохозяйственных машинах имеются узлы трения скольжения, в которых удельные нагрузки достигают значений 25 – 30 МПа. К таким узлам относятся, например, шарниры механизмов копирования рельефа поля жаткой. Основными требованиями, предъявляемыми к механизмам копирования, являются обеспечение долговечности и высокого быстродействия при подъеме-опускании жатки в процессе передвижения комбайна по неровностям поля. При недостаточном быстродействии, опорные башмаки жатки зарываются в почву или, не успевая сканировать впадины, скользят только по выпуклым участкам поля, вызывая эффект галопирования жатки, что повышает потери зерна, снижает производительность, нарушает технологический процесс уборки и приводит к поломкам жатвенного агрегата.

Быстродействие механизмов копирования жатки зерноуборочной машины в значительной степени определяется работоспособностью шарнирных сопряжений в рычажных звеньях. Отмечено, что при эксплуатации шарнирных сопряжений механизмов копирования жаток имеет место выдавливание и деструкция смазочной пленки, что обуславливает интенсификацию процессов изнашивания поверхностей трущихся деталей. В результате резко возрастают моменты от сил трения в шарнирах, увеличиваются внутренние зазоры и люфты в подвижных сопряжениях, что служит причиной роста динамических нагрузок и вибраций, а следовательно, и ухудшения качества работы механизмов копирования рельефа поля.

Одним из наиболее эффективных путей решения задачи повышения ресурса и улучшения работоспособности пар трения скольжения, эксплуатирующихся при повышенных удельных нагрузках, является использование композиционных пластичных смазок в сочетании с технологиями, обеспечивающими формирование металлических покрытий. Для интенсификации процесса приработки и повышения триботехнических свойств покрытий, в том числе смазкоудерживающей способности, используют пластичные смазки с наноразмерными наполнителями. При этом достигается эффект трибомеханического модифицирования, установленный

Жорником В.И. [1], когда в процессе трения со смазкой, модифицированной ультрадисперсными алмазами, в поверхностном слое формируется наноразмерная ячеистая субструктура, вызывающая эффективное поглощение энергии фрикционного взаимодействия.

**Цель исследований.** Целью выполненных исследований явилось повышения работоспособности тяжело нагруженных узлов трения сельхозмашин на примере шарнирных сопряжений механизмов копирования рельефа поля, путем формирования антифрикционных износостойких структур на рабочих поверхностях комбинированием методов нанесения покрытий и трибомеханического модифицирования пластичными смазками с наноразмерными наполнителями.

**Оборудование, материалы и методики исследований.** Для формирования тонкослойных покрытий был использован способ деформационного плакирования гибким инструментом [2]. Покрытия толщиной более 100 мкм наносились методами газопламенного распыления проволок и гиперзвуковой металлизации [3, 4]. Распыляемые проволоки выполнены из сталей мартенситного (сталь 40X13) и аустенитного (сталь 12X18H10T) классов. Оборудование для нанесения покрытий разработано в ОИМ НАН Беларуси. Для модифицирования покрытий в процессе трибомеханического взаимодействия использовалась пластичная комплексная литиевая смазка ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом присадок «УДАГ», а также смазка И-20А, (кинематическая вязкость -  $22 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/с), наполненная шихтой алмазосодержащей «ША» (ТУ РБ 100056180.003 – 2003).

Триботехнические испытания образцов с антифрикционными слоями осуществлялись по схеме возвратно-поступательного перемещения, для чего был использован лабораторный трибометр МТВП-9М, оснащенный устройством для измерения коэффициента трения. Стендовые испытания осуществлялись на специальном стенде, имитирующем условия работы шарнирных подшипников.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Расчеты нагруженности шарнирных сопряжений механизмов копирования и блоков уравновешивающих пружин жатки комбайна КЗС-7 показали, что статические нагрузки без учета сил трения, действующие в шарнирах механизмов копирования, достигают 31920 Н. В то же время, в случае отсутствия смазки в шарнирах (сухое трение), когда коэффициент трения достигает значений 0,60-0,65, нагрузки и моменты от сил трения в шарнирах возрастают на 50-60%, на такую же величину должны увеличиваться упругие силы, возникающие в блоках уравновешивающих пружин. В этих условиях для обеспечения устойчивой работоспособности механизмов копирования рельефа поля жаткой реакция на ее башмаки на верхнем пределе копирования задается в два раза выше соответствующих значений для нижнего предела копирования, в противном случае жатка не успевает отслеживать макрорельеф поля без отрыва башмаков от его поверхности и переходит в режим галопирования. В то же время при таких уровнях реакции на башмаках жатка не может работать на почвах с низкой несущей способностью. Из результатов выполненного анализа следует, что значения коэффициента трения в рассматриваемых шарнирах должны соответствовать условию  $f \leq 0,10$ , это позволит повысить работоспособность механизма копирования рельефа поля и поднять качество выполняемых жаткой операций.

Для исследования особенностей структурных и фазовых превращений в поверхностях трения в присутствии модифицированной смазки были проведены триботехнические испытания модельных пар трения «сталь 45 – сталь 45» и «медь М1 – сталь 45». Установлено, что в результате трибовзаимодействия существенно возрастает микротвердость поверхностного слоя отожженной стали (в 1,5-1,8 раза) и

меди (в 2,3-2,4 раза), и увеличивается ширина дифракционных линий от матричной  $\alpha$ -фазы (рентгеноструктурный анализ). Это указывает на повышение плотности дислокаций в поверхностных слоях в результате их интенсивной пластической деформации в процессе фрикционного взаимодействия. Фактически в процессе испытаний со смазкой, модифицированной наноразмерной алмазографитовой шихтой «УДАГ», в поверхностном слое формируется ячеистая субструктура, характеризующаяся размером субзерен  $\leq 100$  нм (рисунок 1).

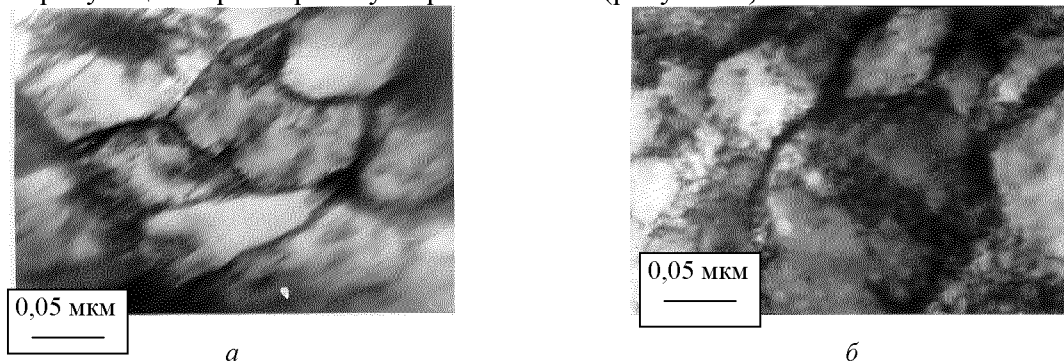


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности трения отожженной стали 45 (а) (давление 20 МПа) и меди М1 (б) (давление 10 МПа) после испытаний со смазкой Литол-24, модифицированной «УДАГ»

Образование в поверхностях трения наноразмерной субзеренной структуры вследствие присущих ей чрезвычайно высоких пластических свойств приводит к эффективному поглощению энергии фрикционного взаимодействия при трении и облегчает приработку контактирующего сопряжения. Предполагается, что эффективное измельчение формирующейся в поверхностях трения субзеренной структуры при использовании смазки, модифицированной УДАГ, способствует повышению триботехнических свойств подобных фрикционных сопряжений.

Для формирования тонких покрытий из меди использовали технологию деформационного плакирования вращающейся металлической щетки. В ходе исследований по отработке режимных параметров процесса формирования тонких металлических покрытий было установлено, что технологические параметры процесса обработки (скорость скольжения щетки по поверхности обрабатываемой детали, число оборотов детали, величина натяга) и конструктивные параметры щетки (диаметр щетки, длина и плотность набивки ворса) определяются, в основном, составом наносимого материала, а также исходным состоянием материала основы, и, следовательно, могут варьироваться в достаточно широких пределах (рисунок 2).

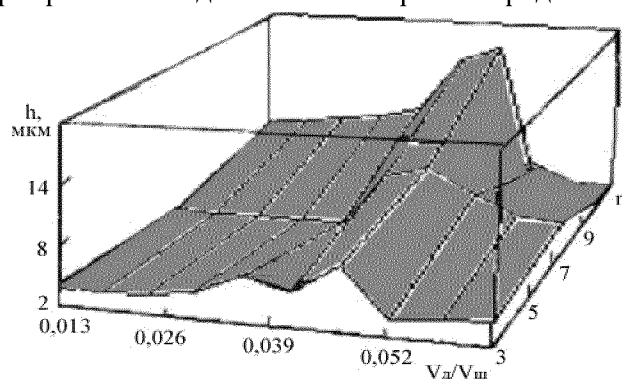


Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости толщины медного покрытия  $h$  от числа проходов щетки  $n$  и соотношения скоростей вращения детали и щетки

Были выбраны оптимальные режимы формирования медного покрытия толщиной 3...5 мкм. В частности, при использовании щетки диаметром 180...200 мм, шириной - 20 мм, с толщиной и вылетом ворса – соответственно 0,25 и 30 мм рекомендовано величину натяга щетки устанавливать в пределах 0,8...1,1 мм, число проходов - 5..7, соотношение линейных скоростей вращения детали и щетки 0,013...0,017, скорость осевой подачи щетки – 0,25...0,50 мм/об.

Проведенными испытаниями установлено (таблица 1), что композиционное покрытие, состоящее из нанесенного деформационным плакированием медного слоя, модифицированного в процессе трибомеханического воздействия в присутствии комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом присадок, имеет минимальные значения исследуемых параметров.

Таблица 1 - Результаты стендовых испытаний

Покрытие	Момент сопротивления проворачиванию, Н·м	Коэффициент трения	Температура вблизи зоны трения, К	Линейный износ, мкм
Без покрытия (смазка Литол-24)	110...130	0,15-0,18	335...355	60...85
Поликарбонат (газопламенное напыление)	75...90	0,11-0,13	315...325	25...35
Медное покрытие (деформационное плакирование) + смазка ИТМОЛ-150Н с УДАГ	45...55	0,07-0,10	300...315	12...18

При этом маслосъемность поверхности образца с медным покрытием на 13-15% больше, чем маслосъемность поверхности образца без покрытия.

Триботехническими испытаниями было установлено, что комбинированная технология деформационного плакирования с трибомодифицированием обеспечивает повышение долговечности сопряжений при удельных нагрузках не более 35 МПа. Для более нагруженных узлов было предложено использовать комбинацию технологий нанесения стальных покрытий распылением проволок и последующее трибомодифицирование.

Научная гипотеза, положенная авторами в основу выполненных исследований, заключается в следующем. Повышенная задиристость трибосопряжения, содержащего деталь с покрытием, обеспечивается, в первую очередь, пластичностью покрытия в начальный период трения для ускорения процесса приработки и, в ходе дальнейшей работы узла, высокой износостойкостью, твердостью, адгезией к жидким смазкам. Этого можно достичь, получив покрытия из сталей, в которых сформирована двухфазная структура, содержащая метастабильный аустенит, имеющий твердость 200 – 300 HV, а также имеется определенное количество оксидов. В процессе дальнейшей приработки вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит будет трансформироваться в износостойкий и твердый мартенсит (HV=700...800) за счет протекания деформационного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. Образованная в ходе приработки наноразмерная субструктура также будет усиливать эффект повышения триботехнических свойств.

Экспериментально установлено, что для обеспечения формирования в структуре стального напыленного покрытия метастабильного аустенита, имеющего низкую температуру протекания деформационного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, соответствующую

температурам эксплуатации узлов трения скольжения (270 – 320 К), необходимо покрытия из проволочных сталей мартенситного класса нагревать и распылять струей газо-кислородного факела, то есть использовать метод газопламенного проволочного напыления. Для получения того же эффекта при нанесении покрытий из проволочных сталей аустенитного класса необходимо использовать плавление в электрической дуге и распылять сверхзвуковым потоком продуктов сгорания пропано-воздушной смеси (метод активированной или гиперзвуковой металлизации) [5].

Газопламенное распыление проволок приводит к формированию слоя с относительно низким уровнем твердости, обусловленным малой концентрацией окислов, невысоким содержанием остаточного аустенита при использовании проволок из сталей аустенитного класса и очень высоким содержанием остаточного аустенита ( $V_\gamma = 30 \dots 50$  об.%) при распылении проволок мартенситного класса. Одной из наиболее вероятных причин появления «аустенитного эффекта» в покрытиях из сталей мартенситного класса является относительно более высокая концентрация в них легирующих элементов (хрома и углерода) за счет полного растворения карбидов хрома при расплавлении проволоки и насыщения капель расплава углеродом из пламени газопламенного факела. Об этом, в частности, свидетельствует отсутствие в покрытии частиц карбидов  $Cr_{23}C_6$ .

Меньшее количество аустенита в покрытиях, полученных гиперзвуковой металлизацией из сталей мартенситного класса обусловлено существенно более высокой скоростью полета расплавленных частиц, характерной для данного способа напыления. Процессы диффузионного насыщения капель расплава углеродом из восстановительной атмосферы продуктов сгорания пропано-воздушной смеси пройти не успевают (время пролета расплавленных капель в атмосфере продуктов сгорания не более  $5 \cdot 10^{-4}$  с) и содержание остаточного аустенита в слое снижается. При гиперзвуковой металлизации сталями аустенитного класса происходит интенсивное окисление распыленных частиц, поскольку их температура после вылета из зоны электрической дуги составляет более 2500 К. При окислении резко уменьшается содержание хрома или марганца в аустенитной фазе и температура начала мартенситного превращения повышается до температур, позволяющих реализовать процесс деформационного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения.

Результаты исследований показали, что удельная нагрузка в процессе приработки должна быть не более 40 МПа при небольших скоростях скольжения. Триботехнические испытания приработанных покрытий (режимы приработки: удельная нагрузка 35 МПа, скорость скольжения 0,4 м/с, смазка И-20А + «ША») осуществлялись при удельной нагрузке 50 - 100 МПа и скорости скольжения 0,25 м/с в среде смазки И-45.

В ходе триботехнических испытаний установлено, что стальные покрытия, приработанные в среде смазки с алмазосодержащим наноразмерным наполнителем «ША», обладают достаточно высокой износостойкостью в диапазоне удельных нагрузок 50 – 90 МПа: интенсивность изнашивания покрытий из стали 12X18H10T составила от 0,89 до 1,11 мкм/км; интенсивность изнашивания покрытий из стали 40X13 составила от 0,72 до 0,97 мкм/км. Покрытия, не прошедшие приработку в смазке с модификатором, оказались практически непригодными для эксплуатации при удельных нагрузках свыше 60 МПа.

**Выводы.** Предложенные технологии, сочетающие методы формирования покрытий и последующего трибомодифицирования позволяют повысить работоспособность и долговечность деталей узлов трения скольжения сельхозмашин. Технология, включающая комбинацию методов деформационного плакирования и

трибомодифицирования, может быть рекомендована для узлов трения скольжения при удельных нагрузках 20 – 30 МПа. Технология, использующая газотермическое напыление стальных покрытий с последующим трибомодифицированием позволяет повысить триботехнические характеристики рабочих поверхностей деталей узлов трения скольжения, эксплуатирующихся при удельных нагрузках до 100 МПа..

## Список литературы

1. Zornik, V. Modifying of Plastic Lubricant by Additives of Nanodiamonds / V. Zornik //Korea-Eurasia Technology Cooperation Workshop. Seul, KITECH, 2008.– P. 289 – 292.
2. Камко, А.И. Технология формирования антифрикционных слоев на рабочих поверхностях шарнирных сопряжений / А.И. Камко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого, 2007. –№ 3. – С. 66-74.
3. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. - Минск: Технопринт, 2004. – 200 с.
4. Белоцерковский, М.А. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении: Сборник научн. трудов. (Минск, 30-31 октября 2008 г.) / Редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2008.– С. 479 – 484.
5. Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия, 2008. – №10. – С. 39 – 44.

*М. Белоцерковский, А. Камко*

**Підвищення працездатності важконавантажених вузлів тертя ковзання сільгоспмашин нанесенням покриттів з наступним з наступним трибомодифікуванням**

У роботі описані технології формування антифрикційного зносостійкого шару на робочих поверхнях шарнірних сполучень жнивварки. Наведено методи механічного плакування гнучким інструментом і трибомеханічного модифікування, а також трибомеханічного модифікування сталевих газотермічних покриттів.

*М. Belotserkovsky, A. Kamko,*

***Working capacity increase hard loaded knots of a sliding friction of agricultural cars drawing of coverings with the subsequent tribomodification***

In the paper the technologies of formation of an antifriction wear resistance layer on working surfaces of the hinged linkings of harvester are shown. The article includes description of the deformation cladding process by the floppy tool and tribomechanical modifying, and the modifying of thermo spray steel coatings.

Получено 10.08.09