

аустенит, в условиях трения со смазкой И-20А при давлениях 10 – 30 МПа регистрируется фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситное превращение, приводящее к возрастанию содержания в поверхностном слое мартенситной α -фазы (до 35 – 40 об.%) и сопровождающееся интенсивным упрочнением поверхности трения. Повышение давления испытаний до $p = 50$ МПа приводит к катастрофическому износу трибосопряжения. В случае триботехнических испытаний в среде смазки, модифицированной добавками наноразмерных алмазо-графитовых частиц (УДАГ), процессы приработки трибосопряжения интенсифицируются. При этом несущая способность пары трения, содержащей газотермическое покрытие, существенно возрастает и трибосопряжение демонстрирует устойчивую работу при контактных давлениях, достигающих 100 МПа.

Литература

1. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм их разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками. Ч. 1. Триботехнические свойства / П.А. Витязь [и др.] // Трение и износ. – 2006. – Т. 27. – № 1. – С. 61 – 68.

УДК 621.793

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ТРИБОМОДИФИЦИРОВАНИЕМ

М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»;

А.И. Камко

РУПП «Гомельский завод литья и нормалей»

Введение. 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 [1]. Известны технологии изготовления деталей узлов трения скольжения, ис-

пользующие эффект трибомодифицирования [2], включающие формирование на рабочей поверхности заготовок из черных металлов покрытий из цветного металла методом гальванического осаждения или деформационного плакирования гибким инструментом, нанесение на покрытия слоя пластичной смазки, содержащей ультрадисперсный порошок шихты алмазосодержащей «ША» и приработку в узлах трения при относительно больших нагрузках и небольшой скорости скольжения (до 0,15 м/с). В поверхностном слое покрытий из цветных металлов формируется наноразмерная субструктура, обуславливающая эффективное поглощение энергии фрикционного взаимодействия при трении, ускорение приработки, повышение триботехнических свойств деталей узлов трения скольжения.

Цель исследований. Указанные методы изготовления деталей узлов трения скольжения имеют ряд недостатков, основными из которых являются: малая величина прочности сцепления гальванических покрытий (менее 10 МПа) и их низкая смазкоудерживающая способность; низкая твердость модифицированных покрытий, полученных деформационным плакированием или электроосаждением, что ограничивает их применение, особенно при наличии в узлах трения абразивных частиц; невозможность использования модифицированных покрытий, полученных деформационным плакированием или электроосаждением, при удельных нагрузках более 35 МПа.

Целью исследований, выполненных авторами работы, явилось повышение качества деталей узлов трения путем роста твердости, стойкости к задиру их рабочих поверхностей, снижения коэффициента трения и повышения износостойкости при эксплуатации в условиях высоких удельных нагрузок.

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 НВ, а также есть определенное количество оксидов. В процессе дальнейшей приработки вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит будет трансформироваться в износостой-

кий и твердый мартенсит ($HV = 700 \dots 800$) за счет протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Образованная в ходе приработки наноразмерная субструктура также будет усиливать эффект повышения триботехнических свойств.

Оборудование и материалы, использованные в ходе исследований. Для нанесения покрытий на детали узлов трения скольжения использовали установку проволочную термораспылительную «ТЕРКО» (газопламенное напыление) и экспериментальную установку гиперзвуковой металлизации (активированная электродуговая металлизация). Наносимый материал покрытий – сталь мартенситного класса марки 40X13 и сталь аустенитного класса марки 12X18H10T.

Установлено, что для того, чтобы добавленный в смазку наноразмерный алмазографитовый модификатор обеспечил интенсификацию процесса приработки фрикционного сопряжения, необходимо им заполнить поры напыленных покрытий. Экспериментальные исследования процесса заполнения пор напыленных покрытий жидкой смазкой с наноразмерным наполнителем, проведенные на стенде для гидродинамической пропитки полых пористых изделий, показали, что необходимо использовать жидкие смазки с кинематической вязкостью не более $50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. В экспериментах использовали смазку И-20А (кинематическая вязкость – $22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), наполненную шихтой алмазосодержащей «ША» (ТУ РБ 100056180.003-2003) в количестве 0,9 %.

Результаты исследований и их обсуждение. 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 газокислородного факела, т.е. 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) [3].

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 высо-

ким содержанием остаточного аустенита ($V_\gamma \approx 30 \dots 50$ 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 полета 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 12Х18Н10Т составила 0,89 – 1,11 мкм/км; интенсивность изнашивания покрытий из стали 40Х13 – 0,72 – 0,97 мкм/км. Покрытия, не прошедшие приработку в смазке с модификатором, оказались

практически непригодными для эксплуатации при удельных нагрузках свыше 60 МПа.

Выводы. Предложенный метод трибомодифицирования газотермических покрытий позволяет повысить триботехнические характеристики рабочих поверхностей деталей узлов трения скольжения, эксплуатирующихся при высоких удельных нагрузках.

Литература

1. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм фрикционного разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазграфитовыми добавками. Ч. 1. Триботехнические свойства / П.А. Витязь [и др.] // Трение и износ. – 2006. – Т. 27. – № 1. – С. 61 – 68.
2. Камко, А.И. Технология формирования антифрикционных слоев на рабочих поверхностях шарнирных сопряжений / А.И. Камко // Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2007. – № 3. – С. 66 – 74.
3. 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.

УДК 621.89

ОСОБЕННОСТИ ФРИКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАЛИЧИИ НАНОСТРУКТУРНЫХ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И НАНОСТРУКТУРНЫХ СМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ

Н.К. Толочко

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
Минск*

Введение. Можно выделить два основных направления развития нанотрибологии. Первое направление связано с исследованием фрикционных процессов, характеризующихся наличием нанорельефных контактирующих поверхностей, а также нанотолщинных смазочных слоев [1, 2]. Особенности таких процессов, типичных для наноэлектромеханических систем, определяются атомно-молекулярным взаимодействием поверхностей, контактирующих наночастицами (включая единичные наноконтакты) и находящихся под малой нагрузкой. Второе направление связано с исследованием фрикционных процессов, характеризующихся наличием наноструктурных контактирующих поверхностей, а также наноструктурных смазоч-