

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ЭЛЕМЕНТОВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ  
ПОКРЫТИЯМИ ФРИКЦИОННЫМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ**

**В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич**  
*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск*  
**А. И. Камко**  
*Гомельский завод литья и нормалей*

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 толщиной 0,05 – 0,5 мм. Покрытия из цветных металлов и низколегированных сталей, которые, как правило, мягче стальных или чугунных деталей, позволяют сравнительно легко обеспечить правило положительного градиента, согласно которому, процесс деформирования отдельных, наиболее нагруженных участков поверхностей трения, должен проходить только в поверхностных слоях, не вовлекая в деформацию ниже расположенный материал. Кроме того, слой относительно мягкого покрытия позволяет улучшить прирабатываемость деталей пар трения и способствует образованию в процессе трения адаптивных, субмикроскопических поверхностных пленок, обладающих повышенной адсорбционной способностью к смазочным материалам.

Для деталей узлов трения скольжения технологического оборудования и сельскохозяйственной техники авторами была разработана технология формирования на рабочей поверхности заготовок из черных металлов покрытия из цветного металла методом деформационного плакирования гибким инструментом (щеткой) с последующим нанесением слоя пластичной смазки и приработки в узле трения. Однако большая длительность процесса приработки (от 30 мин. до 1 часа) и недостаточно высокие антифрикционные свойства ( $f_{тр}$  при удельных нагрузках около 20 МПа составил  $\sim 0,12$ ) потребовали изменения процесса.

Указанные недостатки в значительной степени были устранены при использовании пластичной смазки, содержащей ультрадисперсный порошок шихты алмазосодержащей «ША» (ТУ РБ 100056180.003 – 2003) в количестве 0,5 – 1,5 мас. %. Последующая приработка осуществлялась при нагрузке 20 – 30 МПа и скорости скольжения 0,1 – 0,15 м/с в течение 5 – 15 мин.

В процессе приработки со смазкой, модифицированной «ША», в поверхностном слое покрытия из цветного металла формируется наноразмерная субструктура, характеризующаяся размером субзерен  $\leq 100$  нм. 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. Процесс фрикционного модифицирования, сопровождающийся измельчением формирующейся в поверхностях трения субзеренной структуры, обуславливает повышенные триботехнические свойства деталей узлов трения скольжения и в их дальнейшей эксплуатации. Коэффициент трения был снижен до 0,09, а интенсивность изнашивания уменьшена в 3 – 3,5 раза. В настоящее время технологический процесс фрикционного (трибомеханического) модифицирования тонких покрытий из меди и бронзографита используется при изготовлении шарнирных сопряжений кормо- и зерноуборочной техники.

Разработанная технология хорошо зарекомендовала себя для деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся при удельных нагрузках не более 40 МПа. Использование покрытий из бронзографита с последующим трибомеханическим модифицированием в тяжело нагруженных узлах трения не дало положительного результата, что обусловлено прежде всего их относительно низкой твердостью (не более  $HV = 400$ ).

Для тяжело нагруженных узлов трения было предложено формировать покрытия газотермическим распылением проволок из сталей мартенситного или аустенитного классов. Исследования показали, что распыление проволок из сталей мартенситного класса необходимо осуществлять газопламенным методом, а покрытия из сталей аустенитного класса наносить методом гиперзвуковой металлизации. Кроме того, приработку в узле трения выполняют при удельной нагрузке 32 – 40 МПа и скорости скольжения 0,2 – 1,0 м/с, при этом в качестве основы смазки используют жидкие масла с кинематической вязкостью не более  $50 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/с (патент РБ №12982).

Повышенная задиростойкость элементов трибосопряжений, имеющих нанесенное распылением стальной легированной проволоки покрытие, обеспечивается, в первую очередь, пластичностью покрытия, облегчающей процесс приработки, в начальный период трения и высокой износостойкостью, твердостью и адгезией к смазочным материалам при дальнейшей эксплуатации узла. Это возможно только в том случае, когда в сталях сформирована двухфазная структура, содержащая метастабильный аустенит, имеющий твердость 200 – 300 HV, а также имеется определенное количество оксидов.

Авторами экспериментально установлено, что для 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 проволоочных сталей мартенситного класса нагревать и распылять струей газо-кислородного факела. Для получения того же эффекта при нанесении покрытий из проволоочных сталей аустенитного класса необходимо использовать плавление в электрической дуге и распылять сверхзвуковым потоком продуктов сгорания пропано-воздушной смеси (метод гиперзвуковой металлизации).

В процессе приработки вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит трансформируется в износостойкий и твердый мартенсит ( $HV = 700 - 800$ ) за счет протекания деформационного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения.

Эксперименты показали, что для того, чтобы добавленный в смазку наноразмерный алмазно-графитовый модификатор обеспечил интенсификацию процесса приработки фрикционного сопряжения, необходимо им заполнить поры напыленных покрытий. Это условие возможно реализовать только при использовании жидких смазок с кинематической вязкостью не более  $50 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ . Учитывая, что пористость стальных покрытий, полученных распылением проволоочных материалов газопламенным методом, составляет 8 – 12%, а полученных гиперзвуковой металлизацией – не более 6%, удельное давление и скорость относительного скольжения в процессе приработки должны быть значительными. Давление в гидродинамическом клине, возникающем в слое смазки в процессе приработки сопряжения, способствует заполнению пор газотермических покрытий жидкой смазкой, содержащей наноразмерный наполнитель.

В ходе триботехнических испытаний установлено, что стальные покрытия, приработанные в среде смазки с алмазно-содержащим наноразмерным наполнителем «ША», обладают достаточно высокой износостойкостью в диапазоне удельных нагрузок 50 – 100 МПа, в то время как покрытия, не прошедшие приработку в смазке с модификатором, оказались практически непригодными для эксплуатации при удельных нагрузках свыше 60 МПа.

Таким образом, для деталей узлов трения скольжения, эксплуатирующихся при нагрузках 20 – 30 МПа может быть рекомендована технология, включающая комбинацию методов деформационного плакирования и трибомеханического модифицирования. При изготовлении или восстановлении деталей трибосопряжений, в которых удельные нагрузки достигают значений 50 – 100 МПа, необходимо использовать методы газотермического напыления с последующим трибомеханическим модифицированием.