

## ПРОЧНОСТНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, НАНОСИМЫХ НА ШТОКИ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

Белоцерковский М.А.<sup>1</sup>, Яловик А.П.<sup>2</sup>, Гоман А.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
mbelotser@gmail.com

<sup>2</sup>ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк, Беларусь

Шток гидроцилиндра строительно-дорожных машин (СДМ) работает в условиях циклически изменяющихся в процессе эксплуатации нагрузок, различных температурных режимах, при этом сопряжения «шток-цилиндр» испытывают удары при подъеме и опускании, что значительно снижает срок службы гидроприводов. На масляной поверхности штока гидроцилиндра оседает пыль, капли влаги и частицы грунта. Перемещаясь, шток увлекает их за собой, что приводит к нарушению герметичности манжет, появлению задиров, рисков, тем самым, загрязняя рабочую жидкость гидросистемы и способствуя повышенному изнашиванию сопряженных деталей гидропривода и как следствие интенсивной утечки жидкости.

Для восстановления рабочей поверхности штоков СДМ предлагаются различные методы наплавки, газотермического напыления, электроискрового легирования, гальванического осаждения. Причем выбор потребителем технологии восстановления-упрочнения штоков основывается на результатах чужого или собственного опыта и определяется, в основном, эмпирическим путем с учетом стоимости оборудования.

Авторами данной работы предлагается технология восстановления, основанная на совместном использовании метода гиперзвуковой металлизации и эффекта трибомодифицирования. При этом восстановленная нанесением стального покрытия поверхность штока проходит процесс приработки в консистентной смазке, содержащей наноразмерный наполнитель. Прочность сцепления стальных покрытий с поверхностью штока составляет от 50 до 65 МПа, что значительно превышает возможности многих других технологий. Однако того, чтобы гарантировать требуемые показатели работоспособности восстановленных штоков, необходимо выполнить аналитическую оценку минимально необходимой величины адгезии покрытий.

Предложенная ранее [2] концепция прочностной надежности деталей с покрытиями позволяет не только оценить пределы использования каждого из методов газотермического напыления, но прежде всего аналитическим путем установить необходимый уровень прочности сцепления покрытий на деталях узлов трения широко распространенного технологического оборудования и транспортных машин, который должен быть обеспечен используемыми методами восстановления.

Прочностная надежность покрытия зависит от его напряженного состояния, обусловленного контактными и касательными напряжениями, действующими на поверхность покрытия. Оценка прочностной надежности покрытия может быть проведена с помощью эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{экв}}$ , зависящего от вида напряженного состояния и определенного по одной из теорий прочности. Наиболее распространенной является теория прочности Мора, по которой  $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \nu\sigma_3$ , где

$\nu = \frac{\sigma_{\text{вр}}}{\sigma_{\text{вс}}}$  - отношение предела прочности при растяжении к пределу прочности при

сжатии материала покрытия;  $\sigma_1, \sigma_3$  - максимальные и минимальные главные напряжения, действующие в зоне сцепления покрытия с основой.

Учитывая, что для большинства деталей толщина покрытия незначительна по сравнению с размерами зоны сопряжения деталей, в первом приближении напряженное состояние в покрытии может быть описано с помощью стержневой модели и в зоне сцепления покрытия с деталью может быть изображено с помощью элементарного параллелепипеда. Для этого случая, главные напряжения определяются из выражений:

$$\sigma_1 = -\frac{p}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 + \tau^2}, \quad \sigma_3 = -\frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 + \tau^2}.$$

Тогда, принимая  $\nu = 1$ ,  $\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{p^2 + 4\tau^2}$

Условие прочностной надежности покрытия по критерию прочности его сцепления с деталью имеет вид:  $\sigma_{\text{экв}} = \frac{\sigma_{\text{сц}}}{k_3}$  или  $\sigma_{\text{экв}} k_3 \leq [\sigma_{\text{сц}}]$ , где  $\sigma_{\text{сц}}$  – растягивающее напряжение (при нормально приложенной нагрузке), при котором происходит отрыв покрытия от основы, определяемое экспериментально (прочность сцепления на отрыв);  $k_3$  – коэффициент запаса прочности.

После ряда подстановок было получено выражение для определения минимально возможной прочности сцепления покрытия со штоком:

$$\sigma_{\text{сц}} \geq \frac{k_3}{2} \cdot \frac{F}{d^2} \left[ \left( 10 \frac{E_n \Delta l_2}{E_w d l_1} + \frac{4}{\pi} \right) + K \frac{(l_2 - l_1) d \Delta}{l_1^3} + \sqrt{\left( 10 \frac{E_n \Delta l_2}{E_w d l_1} + \frac{4}{\pi} - K \frac{(l_2 - l_1) d \Delta}{l_1^3} \right)^2 + 4 f^2 \left( K \frac{l_2 - l_1}{l_1^2} \cdot \frac{d \Delta}{l_1} \right)^2} \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{сц}}$  – прочность сцепления покрытия со штоком, Н/м<sup>2</sup>;  $k_3$  – коэффициент запаса прочности, равный 1,15 для давлений рабочей жидкости в гидроцилиндрах до 25 МПа и равный 1,20 для более высоких давлений;  $F$  – осевая сила, действующая на шток со стороны исполнительного механизма, Н;  $d$  – диаметр штока, м;  $f$  – коэффициент трения в трибосопряжении «шток – грундбукса гидроцилиндра»;  $E_n$  и  $E_w$  – модули упругости материалов покрытия и штока соответственно, Н/м<sup>2</sup>;  $\Delta$  – диаметральный зазор между штоком и грундбуксой гидроцилиндра, м;  $l_1$  – длина участка штока, расположенного в гидроцилиндре, м;  $l_2$  – длина участка штока, расположенного за пределами гидроцилиндра, м;  $K$  – коэффициент, определяющий величину возможного контактного напряжения в центральной зоне контакта.

Выполненные расчеты для гидроцилиндра внутренним диаметром 80мм; диаметром штока 50 мм; давлением в бесштоковой камере 20 МПа; осевой силой, действующая на шток =  $5 \cdot 10^4$  Н; зазором  $\Delta = 20 \cdot 10^{-6}$  м;  $l_1 = 0,075$  м;  $l_2 = 0,8$  м; модулем упругости стального покрытия -  $1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>; модулем упругости материала штока и цилиндра -  $2,15 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, показали, что прочность сцепления покрытий при восстановлении штока данного гидроцилиндра должна составлять не менее 29,7 МПа. В этом случае можно использовать технологии плазменного и газопламенного напыления стальных проволок, а также традиционную электродуговую металлизацию. При уменьшении диаметра штока до 0,04 м и увеличении зазора до 30 мкм минимальная прочность сцепления составляет 47 МПа.

#### Литература

1. Белоцерковский, М.А. Учет эксплуатационных нагрузок при выборе метода упрочнения-восстановления быстроизнашивающихся деталей / М.А. Белоцерковский, А.М. Гоман // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 1(2). – С. 74–77.