

## Анализ факторов, влияющих на выбор поверхностного слоя материала сопряженных деталей пар трения

© В.С. Гаврилова<sup>1</sup>, С.А. Воронов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал»»,  
г. Ковров, Владимирская обл., 601903, Россия

<sup>2</sup>Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева,  
г. Ковров, Владимирская обл., 601910, Россия

*Рассмотрены и проанализированы общие сведения о выборе покрытий и методов поверхностного упрочнения деталей пар трения. На основе общих рекомендаций по выбору поверхностных слоев материалов, учитывающих условия работы пар трения, проведен анализ режимов нагружения и подбор покрытий пары трения поршень — отверстия блока цилиндров аксиально-поршневой гидромашин. Установлено, что для рассматриваемой пары трения можно рекомендовать фторопластовое покрытие.*

**Ключевые слова:** пара трения, фторопластовое покрытие, поверхностный слой, режим нагружения.

В процессе эксплуатации отдельные детали машин и механизмов изнашиваются под воздействием сил трения, нагрузок и условий работы. Основная причина неисправностей механизмов — износ сопрягаемых деталей. Процесс изнашивания сопровождается изменением размеров и формы деталей, возникновением дополнительных динамических нагрузок и вибраций, усталостью рабочих поверхностей и концентрацией напряжений. Поэтому повышение эксплуатационных характеристик машин и механизмов за счет снижения износа применяемых в них пар трения в настоящее время является актуальной задачей.

Один из наиболее эффективных путей решения этой задачи — снижение трения и повышение износостойкости за счет применения антифрикционных покрытий и поверхностной обработки. Правильно подобранные материалы сопряженных поверхностей способны значительно снизить трение, а следовательно, и износ деталей. Именно поэтому необходим такой выбор сочетаний покрытий и материалов, которые бы обеспечивали не только приемлемые потери на трение, но и стабильную работу покрытий при заданных условиях нагружения пар трения.

Для выбора материалов поверхностей пар трения требуется оценить их режимы нагружения: давление в контакте и гидравлической системе; относительные скорости скольжения поверхностей трения; температуру рабочей жидкости и поверхностей трения в местах контакта.

Применение всех антифрикционных покрытий ограничено их физико-механическими свойствами, которые определяют возможные режимы нагружения пар трения при применении тех или иных покрытий. Например, дисульфид молибдена используют при больших перепадах температур ( $-180\dots+400$  °С) и высоких удельных нагрузках, а цинковые сплавы в паре со сталью склонны к заеданию, что ограничивает их применение при малых нагрузках [1].

При высоких температурах возможно применение газотермического напыления, при сухом трении до 500 °С — сочетание твердых материалов с мягкой связкой (карбид вольфрама — кобальт или никель), при повышенных температурах (до 900 °С) — карбид хрома — нихром.

Важным этапом правильного выбора покрытий и методов поверхностной обработки является определение преобладающего вида износа, которому подвержены детали пар трения. Наиболее распространенный вид износа — абразивное изнашивание, сущность которого заключается в разрушении металла твердыми зёрнами абразива при пластическом деформировании и микрорезании трущихся поверхностей.

При интенсивном абразивном износе применяют покрытия с высокой твердостью. К ним можно отнести наплавочные материалы — хромоникелевые сплавы, содержащие бориды, карбиды, имеющие способность самофлюсоваться [2], а также композиционные электролитические покрытия [3]. Также абразивному изнашиванию значительно препятствуют материалы, способные к поглощению твердых частиц. Таким свойством обладают полимерные покрытия, в частности, фторопласт 4 легко поглощает твердые частицы абразива за счет очень низкого модуля упругости [4].

Еще одним видом износа является усталостное изнашивание — выкрашивание или отслаивание частиц материала с образованием ямок на поверхности в результате длительного нагружения переменными по величине и направлению усилиями. Сопротивление усталости антифрикционного слоя на стали повышается с уменьшением его толщины. Это объясняется упрочняющим влиянием стального основания, ограничивающего пластическую деформацию покрытия. Поэтому целесообразно доводить толщину антифрикционного слоя до оптимальной по соображениям улучшения сопротивления износу [5].

При значительном усталостном изнашивании применение, например, хромовых покрытий ограничено их повышенной хрупкостью и низкой усталостной прочностью [6].

Для снижения усталостного износа применяют поверхностное упрочнение деталей пар трения, которое создает на поверхности сжимающее напряжение, что снижает вероятность возникновения трещин. К этим методам можно отнести обкатку поверхностей. Такая

обработка снижает усталостный износ коррозионно-стойкой стали в 1,3 раза по сравнению с необработанной поверхностью [7]. Повышение усталостной прочности происходит также при лазерной термообработке. Для чугунов можно достичь повышения прочности в 1,5 раза по сравнению с необработанной поверхностью [8].

Высокая стойкость к усталостному износу характерна для поверхностей, упрочненных методами химико-термической обработки. Поверхностную твердость конструкционных сталей, обработанных таким методом, можно повысить до значений 7...17 ГПа [9].

Детали механизмов, работающие в экстремальных условиях, зачастую подвержены интенсивному как абразивному, так и усталостному износу, поэтому в некоторых случаях целесообразно сочетать поверхностное упрочнение и нанесение антифрикционных покрытий.

Наиболее часто выходу из строя пар трения способствует адгезионный износ, или износ при заедании («схватывании»). Он заключается в том, что при локальном разогреве и пластической деформации контактирующих выступов разрушается защитная пленка и материалы трущихся поверхностей свариваются в области контакта микровыступов. «Схватывание» особо опасно для контакта двух твердых материалов. Для сталей и чугунов в условиях трения скольжения лучшим материалом сопряженной детали являются цветные металлы и сплавы, имеющие в структуре мягкую составляющую, в качестве которой могут служить включения олова, меди или свинца. Эти металлы «схватываются» со сталью, но адгезионные связи разрушаются по менее прочным цветным металлам [10].

Следующим шагом к выбору материалов поверхностного слоя деталей пар трения является определение условий смазки контактирующих поверхностей. В зависимости от наличия на трущихся поверхностях смазывающей жидкости различают жидкостное, полужидкостное, граничное и сухое виды трения. В условиях жидкостной смазки, когда поверхности деталей разделены несущим гидродинамическим слоем, коэффициент трения минимален, а износ практически отсутствует.

Когда поверхности трения разделены слоем смазки малой толщины (менее 0,1 мкм), не превышающим высоты микронеровностей поверхности, возникает граничное трение. В условиях граничного трения для удержания смазки на поверхности контакта пар трения возможно применение поверхностно-активных веществ. К ним относят соединения, содержащие карбоксильные группы, спирты, различные эфиры, смолы, сернистые соединения.

Если граничный слой разрушается, а нагрузка превышает силы сцепления смазочного материала с рабочей поверхностью детали, то в месте контакта возникают сухое трение и, как следствие, задиры, заклинивания.

Полужидкостное трение наблюдается в тех случаях, когда одновременно с жидкостным трением имеет место граничное, или сухое, трение. Такое трение характерно при пуске механизмов. Часто при пуске в условиях полужидкостного трения детали изнашиваются гораздо больше, чем после нескольких часов устоявшегося режима работы. В таких условиях применяют покрытия на основе графита, дисульфид молибдена, а также металлические покрытия с фторопластовым наполнителем.

На основании изложенного выше была разработана блок-схема с методикой выбора материалов поверхностного слоя деталей пар трения.

Для наглядного примера можно рассмотреть пару трения поршень—стенки отверстий блока цилиндров аксиально-поршневой гидромашины. В серийно выпускаемых гидромашинах поршни изготавливают из стали 50ХФА, а в отверстия стального блока цилиндров запрессовывают втулки из латуни ЛМцСКА-58-2-2-1-1. Схема сил, действующих на поршень и стенки отверстий блока цилиндров, представлена на рис. 1.

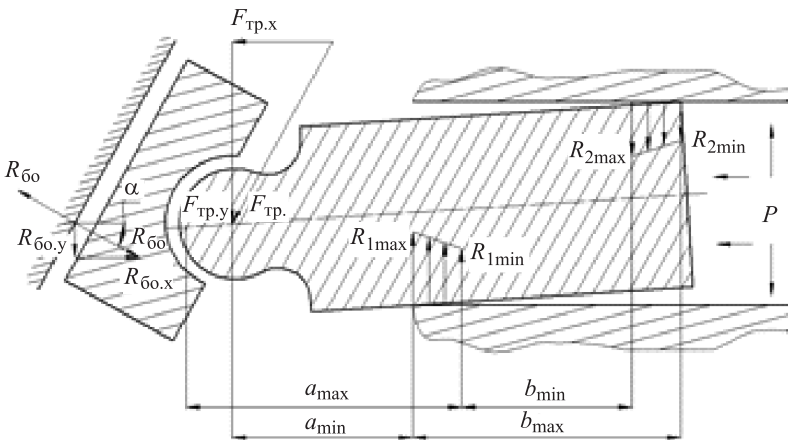


Рис. 1. Схема сил в паре трения поршень—стенки отверстий блока цилиндров

На выбранную пару трения оказывают воздействие силы, возникающие от взаимодействия поршня с башмаком и башмака с наклонным диском. Во время работы насоса между башмаком и поршнем возникает сила трения  $F_{тр}$ , с противоположной стороны на поршень действует сила давления рабочей жидкости  $P$ , и, как следствие, возникает сила реакции опоры между башмаком и диском  $R_{60}$  и между поршнем и стенками отверстий блока цилиндров  $R_1$  и  $R_2$ . Максимальное контактное давление составляет 131,6 МПа, относительная скорость скольжения 2,38 м/с, температура работы  $-70...+130$  °С.

В процессе трения происходит пластическая деформация поршня и стенок отверстий блока цилиндра до снижения давления до значения предела текучести трущихся поверхностей за счет увеличения длины контакта. При достижении значения давления, равного пределу текучести трущихся поверхностей, деформации становятся упругими. Так как предел текучести фторопластового покрытия ниже по сравнению с данной характеристикой других материалов (см. ниже), то приработка и наступление устоявшегося износа такого покрытия наступит гораздо быстрее, следовательно, и износ будет значительно меньше.

#### Предел текучести материалов

Материал ....	Фторопласт 4	ЛМцСКА	БрОФ7-0,2	М1М
$\sigma_T$ , МПа .....	10	245	140	70

В предложенной паре трения преобладает абразивный износ. Поршень после длительной работы изображен на рис. 2.

Поршень работает в условиях граничного трения, однако при пуске гидромашины наблюдается полужидкостное трение, что неблагоприятно сказывается на износостойкости деталей и способствует возможности возникновения адгезионного износа.



Рис. 2. Гидроабразивный износ поршня [11]

Проанализировав изложенные выше данные, можно предположить, что усовершенствования конструкции можно добиться путем замены латунных втулок на фторопластовое покрытие. Оно в значительной степени предохранит сопряженные детали от преобладающего абразивного износа, улучшит неблагоприятные условия смазки и выдержит режимы нагружения этой пары трения.

Для данных сопряженных деталей была разработана уточненная блок-схема методики выбора материалов поверхностного слоя деталей пар трения.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- снижения трения и повышения износостойкости деталей пар трения можно достичь за счет применения антифрикционных покрытий и поверхностной обработки;
- при правильном подборе покрытий и материалов можно обеспечить значительное снижение потерь на трение и стабильную работу механизмов для заданных режимов работы;
- выбор покрытий необходимо осуществлять исходя из анализа условий работы пар трения, к основным характеристикам которых можно отнести: вид износа, условия смазки и режимы нагружения;

• в частном случае для пары трения поршень—стенки отверстий блока цилиндров аксиально-поршневой гидромашины можно рекомендовать покрытие фторопласт 4.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лужков Л.П. *Материалы в машиностроении, Т. 1. Цветные металлы и сплавы*. Москва, Машиностроение, 1997, 304 с.
- [2] Сидоров А.В. *Восстановление деталей машин напылением и наплавкой*. Москва, Машиностроение, 1987, 192 с.
- [3] Беленький М.А., Иванов А.Ф. *Электроосаждение металлических покрытий*. Москва, Металлургия, 1985, 288 с.
- [4] Гарбар М.И. *Пластмассы в машиностроении*. Сб. ст. Москва, Машиностроение, 1964, 344 с.
- [5] Зильберг Ю.А., Бигиджанова А.П., Хрущов М.М. Ускоренные испытания на усталость биметаллических образцов с антифрикционными сплавами. *Усталость металлов. Сб. ст.* Москва, Изд-во АН СССР, 1960, 213 с.
- [6] Шлугер М.А. *Гальванические покрытия в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1988. Т. 1, 278 с.
- [7] Сатель Э.А. *Проблемы развития технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 1968, 592 с.
- [8] Макаров А.В., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. Влияние лазерной обработки на структуру, износостойкость и усталостные свойства высокопрочного чугуна. *Физика и химия обработки материалов*, 2006, № 4, с. 46–55.
- [9] Петрова Л.Г., Александров В.А., Демин П.Е., Дробков В.П. Формирование композиционных наноструктурных покрытий на стальных деталях методами химико-термической обработки. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 2010, вып. 51, X, с. 7–13.
- [10] Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. *Материаловедение*. Москва, Машиностроение, 1972, 528 с.
- [11] Инновационный проект: Участок ремонта аксиально-поршневых гидрососов. ГОСНИТИ. URL: <http://www.gosniti.ru> (дата обращения 26.06.15).

Статья поступила в редакцию 12.10.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гаврилова В.С., Воронов С.А. Анализ факторов, влияющих на выбор поверхностного слоя материала сопряженных деталей пар трения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 11.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/fwm/1447.html>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Восьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23–26 сентября 2015 г.*

**Гаврилова Вероника Сергеевна** — АО «Всероссийский научно-исследовательский институт “Сигнал”». e-mail: [Nika18081991@mail.ru](mailto:Nika18081991@mail.ru)

**Воронов Сергей Андреевич** — д-р техн. наук, профессор Ковровской государственной технологической академии имени В.А. Дегтярева.

## Analysis of the factors influencing on the choice of the surface layer of the material for the conjugated parts of friction pairs

© V.S. Gavrilova<sup>1</sup>, S.A. Voronov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “All-Russian Scientific-research institute ‘Signal’”,  
Kovrov town, Vladimir region, 601903, Russia

<sup>2</sup>The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev,  
Kovrov town, Vladimir region, 601910, Russia

*The article analyses general data on making choice of coatings and of surface hardening methods of friction pairs. On the basis of common recommendations on choosing material surface layers we analyzed loading modes and coating selection for the friction pair piston—holes of block of cylinders for axial piston hydraulic machine; the recommendations take into consideration operating conditions of the friction pairs. It is established that it is better to use Teflon coating for the friction pair considered.*

**Keywords:** friction pair, Teflon coating, surface layer, loading mode.

### REFERENCES

- [1] Luzhkov L.P. *Materialy v mashinostroyenii. T. 1. Tsvetnyye metally i splavy* [Materials in mechanical engineering. Vol. 1. Non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997, 304 p.
- [2] Sidorov A.V. *Vosstanovleniye detaley mashin napyleniyem i naplavkoy* [Restoration of machine parts by spraying and welding]. Moscow, Mashinostroenie, 1987, 192 p.
- [3] Belenkiy M.A., Ivanov A.F. *Elektroosazhdeniye metallicheskih pokrytiy* [Electrodeposition of metallic coatings]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 288 p.
- [4] Garbar M.I. *Plastmassy v mashinostroyenii. Sbornik statei* [Plastic materials in mechanical engineering. Coll. Articles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 344 p.
- [5] Zilberg Yu.A., Bigidzhanova A.P., Khrischov M.M. *Uskorennyye ispytaniya na ustalost' bimetallicheskih obraztsov s antifriktsionnymi splavami* [Accelerated fatigue tests of bimetallic samples with anti-friction alloys]. In: *Ustalost' metallov. Sbornik statei* [Metal fatigue. Coll. Articles]. Moscow, Publishing House of the USSR AS, 1960, 213 p.
- [6] Shluger M.A. *Gal'vanicheskiye pokrytiya v mashinostroyenii* [Electroplating in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, vol. 1, 278 p.
- [7] Satel E.A. *Problemy razvitiya tekhnologii mashinostroyeniya* [Problems of development of mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 592 p.
- [8] Makarov A.V., Malygin I.Yu., Osintseva A.L. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2006, no. 4, pp. 46–55.
- [9] Petrova L.G., Aleksandro V.A., Demin P.E., Drobkov V.P. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta, X. — Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2010, issue 51, pp. 7–13.

- [10] Lakhtin Yu.M., Leontyeva V.P. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 528 p.
- [11] *Innovatsionnyy proyekt: Uchastok remonta aksial'no-porshnevyykh gidronasosov* [Innovative project: Land repairs axial piston pumps]. GOSNITI. Available at: <http://www.gosniti.ru> (accessed 26 June 2015).

**Gavrilova V.S.**, JSC “All-Russian Scientific-research institute ‘Signal’”.  
e-mail: [Nika18081991@mail.ru](mailto:Nika18081991@mail.ru)

**Voronov S.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Engineering, Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev.