

УДК 537.6:620

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛОВ К ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ

**О. В. Малахов**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: olegm1@list.ru

**А. В. Кочергин**

Заведующий отделом

Научно-исследовательский отдел информационно-аналитического моделирования

Научно-исследовательский и

проектно-конструкторский институт "Искра"\*\*\*

E-mail: kav\_lg@mail.ru

**Д. С. Девяткин**

Аспирант\*

E-mail: 9dyustudio@gmail.com

\*Кафедра автоматизации и

компьютерно-интегрированных технологий

\*\*\*Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля  
кв. Молодежный, 20-а, г. Луганск, Украина, 91034

*У статті представлено інформаційно-аналітичний огляд застосування методу МПМ при оцінці напружено-деформованого стану металокопункцій. Коротко дані теоретичні основи методу і зроблено попередні оцінки рівня корисного сигналу. За результатами огляду оцінені перспективи методу, стосовно до діагностики преддефектного стану напружених металокопункцій*

*Ключові слова: магнітна пам'ять металу, напружено-деформований стан металу, неруйнівний контроль*

*В статье представлен информационно-аналитический обзор применения метода МПМ при оценке напряженно-деформированного состояния металлокопункций. Кратко даны теоретические основы метода и сделаны предварительные оценки уровня полезного сигнала. По результатам обзора оценены перспективы метода, применительно к диагностике преддефектного состояния напряженных металлокопункций*

*Ключевые слова: магнитная память металла, напряженно-деформированное состояние металла, неразрушающий контроль*

## 1. Вступление

Все традиционные методы неразрушающего контроля направлены на поиск уже развитых дефектов и по своему назначению не могут предотвратить внезапные усталостные повреждения оборудования - основные причины аварий и источники травматизма обслуживающего персонала. А сегодня очень важно предотвращать дефекты, определять места их наиболее вероятного развития, точно определять время износа конструкций для их надлежащего ремонта либо замены.

Одним из методов, позволяющих решить данную задачу, является метод магнитной памяти металла (МПМ). Метод МПМ - метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПП) на поверхности изделий с целью определения зон концентрации напряжений, дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений.

Собственное магнитное поле рассеяния изделия (СМПП) - магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности изделия в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений или в зонах максимальной

неоднородности структуры металла на новых изделиях [1].

Практическое применение метода МПМ распространено на территории России, его экспериментальное подтверждение проводится в Польше, Китае и др. странах [2 - 4]. Данный метод получил признание не так давно, является новым и физические принципы, лежащие в его основе, недостаточно изучены. Как следствие, метод требует более тщательного исследования, более подробного анализа физики, подтверждения его эффективности в как можно большем количестве испытаний. Согласно выше сказанного, целью данной статьи является анализ теоретических аспектов понятия магнитной памяти металла и обоснование принципов, заложенных в данный метод неразрушающего контроля.

## 2. Физические принципы метода МПМ

Хотя само явление остаточной намагниченности известно с середины прошлого века, понятие магнитной памяти металла и метод диагностики на его основе появились совсем недавно, что и потребовало подробного обоснования эффектов, положенных в его

основу [5]. Для отдельных деталей и изделий, а также для сварных соединений, метод МПМ основан на регистрации СМНР, возникающих в зонах концентрации остаточных напряжений после их изготовления и охлаждения в магнитном поле Земли. В процессе изготовления любых ферромагнитных изделий (плавка,ковка, термическая и механическая обработка) механизм формирования реальной магнитной текстуры происходит одновременно с кристаллизацией при охлаждении, как правило, в магнитном поле Земли. В местах наибольшей концентрации дефектов кристаллической решётки (например, скоплений дислокаций) и неоднородностей структуры образуются доменные границы с выходом на поверхность изделия в виде линий смены знака нормальной составляющей СМНР. Эти линии соответствуют сечению детали с максимальным магнитным сопротивлением и характеризуют зону максимальной неоднородности структуры металла и, соответственно, зону максимальной концентрации внутренних напряжений (ЗКН).

Согласно [6], в основу метода МПМ положен магнитоупругий эффект и эффект магнитоластики. Магнитоупругий эффект – это изменение намагниченности ферромагнитного тела при деформации. Он является термодинамически обратным магнитострикции, и его иногда называют обратным магнитострикционным эффектом.

Структурная схема магнитоупругого эффекта показана на рис. 1. При воздействии на кристаллы ферромагнетика механических усилий на кристаллографическую анизотропию накладывается магнитоупругая анизотропия, вызванная дополнительным магнитным взаимодействием атомов вследствие искажения атомной решетки кристалла.

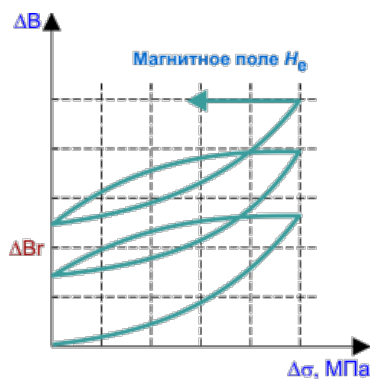


Рис. 1. Зависимость изменения остаточной индукции магнитного поля  $\Delta B$  от напряжений в металле  $\Delta\sigma$  (структурная схема магнитоупругого эффекта)

Магнитоупругий эффект в сталях, находящихся в слабых магнитных полях ( $H \ll H_c$ , где  $H_c$  – коэрцитивная сила) под действием упругих растягивающих напряжений  $\sigma < \sigma_T$  (где  $\sigma_T$  – предел текучести), изучен достаточно хорошо и экспериментально, и теоретически [7 – 10].

С ростом  $\sigma$  в начале при  $\sigma < \sigma_i$  (где  $\sigma_i$  – средняя величина внутренних напряжений первого рода) при росте намагниченности  $M_c(H, \sigma)$  (где  $H_i$  – внутреннее магнитное поле; в источнике принято за 0,4 А/см) обусловлен обратимыми и необратимыми смещениями

$90^\circ$  доменных границ. При этом вектора магнитных моментов в каждом зерне находятся в своих легких направлениях типа  $\langle 100 \rangle$ ; в результате величина магнитоупругого эффекта  $M_c$  в этой области напряжений пропорциональна положительной константе магнитострикции  $\lambda_{100} > 0$  и с ростом  $\sigma$  только увеличивается. Вклад в  $M_c$  процессов вращения магнитных моментов в этой области напряжений пренебрежимо мал.

При  $\sigma \approx \sigma_i$  процессы смещения  $90^\circ$  доменных границ практически заканчиваются, благодаря чему магнитные моменты доменов занимают те из легких направлений типа  $\langle 100 \rangle$ , которые наиболее близки к направлению действия нагрузки  $F$  (а, значит, и поля), и образуют два противоположно ориентированных конуса с углом раствора при вершине порядка  $110^\circ$  (наведенная напряжением анизотропия типа «легкой оси»). Из этого следует, что отличная от нуля намагниченность  $M_c$  может возникнуть при действии напряжений только при наличии хотя бы слабого магнитного поля.

При дальнейшем росте напряжений  $\sigma > \sigma_i$  главную роль в изменении величины  $M_c$  начинают играть процессы вращения магнитных моментов, связанные с отрицательной константой магнитострикции  $\lambda_{111} < 0$  и приводящие к уменьшению намагниченности  $M_c$ . В точке  $\sigma = \sigma_i$ , где величина  $M_c(\sigma)$  максимальна при данном поле, вклады положительных процессов смещения  $90^\circ$  доменных границ по своей величине сравниваются с отрицательным вкладом процессов вращения, и далее при  $\sigma > \sigma_i$  намагниченность  $M_c$  убывает вплоть до предела текучести. Малость этих поворотов (и, соответственно, малость уменьшения намагниченности  $M_c$  в области процессов вращения) обусловлена малостью магнитоупругой энергии по сравнению с энергией магнитной кристаллографической анизотропии в железе.

Снятие нагрузки же, вызвавшей пластическую деформацию, приводит, как было показано в [11], к возникновению в значительной части зерен больших остаточных сжимающих напряжений, ориентированных вдоль направления действия нагрузки  $F$ , что стало причиной резких (в разы) скачков величин таких магнитных параметров, как коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная намагниченность  $M_r$  и начальная магнитная проницаемость,  $\mu_a$  при разгрузке. Физической причиной этих скачков является кардинальное изменение доменной структуры, вызванной упомянутыми выше большими остаточными сжимающими напряжениями, а они приводят к магнитной анизотропии типа «легкая плоскость».

Есть и опытные подтверждения проявления магнитоупругого эффекта в металлах. Так, в [12], проводился анализ такового в армо-железе и конструкционной стали 10ХСНД. Намагничивание происходило в слабых полях (0,4 А/см). На рис. 2, а, б показаны полученные экспериментально кривые зависимости  $M_c(\sigma)$  (в упругой области  $\sigma < \sigma_T$ ) и в  $M_c(\epsilon)$  (в пластической области  $\sigma > \sigma_T$ ) в нагруженном состоянии (светлые кружки) для образцов из армо-железа (рис. 2, а) и стали 10ХСНД (рис. 2, б). А также соответственно кривые для разгруженного состояния (черные точки).

В результате такого исследования авторами экспериментально получено объяснение резкого уменьшения магнитоупругого эффекта в слабых полях при

разгрузке стальных образцов после их пластического растяжения. Интервал деформаций, в котором происходит скачок  $M_{\sigma}$ , совпадает с таковым у других магнитных параметров:  $H_c$ ,  $M_r$  и  $\mu_a$ . Постоянство  $M_{\sigma}$  после разгрузки при всех деформациях объясняется сохранением в значительной части зерен больших остаточных сжимающих напряжений и, следовательно, наведенной напряжениями анизотропии типа легкой плоскости.

Авторами польского и китайского изданий были проведены многочисленные опыты по применению метода МПМ [2 – 4]. Однако важно отметить не только эмпирические исследования, но и математические модели, положенные в основы метода магнитной памяти металла. Опытным путем получены зависимости намагниченности металлического образца от приложенного напряжения к нему. На их основании смоделированы математические зависимости, что в пределах опыта отлично вписываются в поставленную задачу.

Для описания изменения остаточной намагниченности  $I_{r\sigma}$  в зависимости от величины прикладываемых напряжений  $\sigma$  в работе [13] была предложена формула:

$$\frac{1}{I_{r\sigma}} - \frac{1}{I_{r0}} = \beta\sigma, \tag{1}$$

где  $I_{r0}$  и  $I_{r\sigma}$  — остаточная намагниченность материала до нагружения и после нагружения соответственно;  $\beta$  — постоянная, зависящая от материала и его структуры. Однако достаточно строгой экспериментальной проверки зависимости не было сделано. Авторами предложено экспоненциальное описание зависимости остаточной намагниченности от величины приложенных напряжений:

$$I_{r\sigma} = I_{r0} \exp(-\alpha_1 \chi_r \lambda_{100} |\sigma|), \tag{2}$$

$\lambda_{100}$  — константа магнитострикции;  $\chi_r$  — магнитная восприимчивость остаточного намагниченного состояния;  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности. Однако справедливость этой формулы проверялась в достаточно узком диапазоне напряжений.

В упругой стадии влияние напряжения на намагниченность может рассматриваться как эффективное поле, и таким образом, изменение магнетизма с приложенным напряжением в соответствии с постоянным магнитным полем на основе теории магнитомеханического эффект дают:

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{1}{\epsilon^2} \sigma (M_{an} - M) + c \frac{dM_{an}}{d\sigma}, \tag{3}$$

где  $\epsilon$  и  $c$  являются константами,  $M_{an}$  представляет безгистерезисную компоненту намагниченности, а намагниченность  $M$  содержит обратимый компонент  $M_{rev}$  в связи с гибкостью доменных стенок и необратимый  $M_{irr}$  компонент из-за стенок смещения [14].

Как следует из этого выражения, намагниченность связана не только с напряжением  $\sigma$ , но также и со смещением  $M_{an} - M$ . Иными словами, намагниченность в образце всегда будет двигаться в сторону безгистерезисной кривой намагничивания, в которой безгистерезисная намагниченность, это состояние с наименьшей

энергией доменов. Когда преодолены все закрепления слабых доменных стенок, намагниченность достигает в основном обратимого процесса.

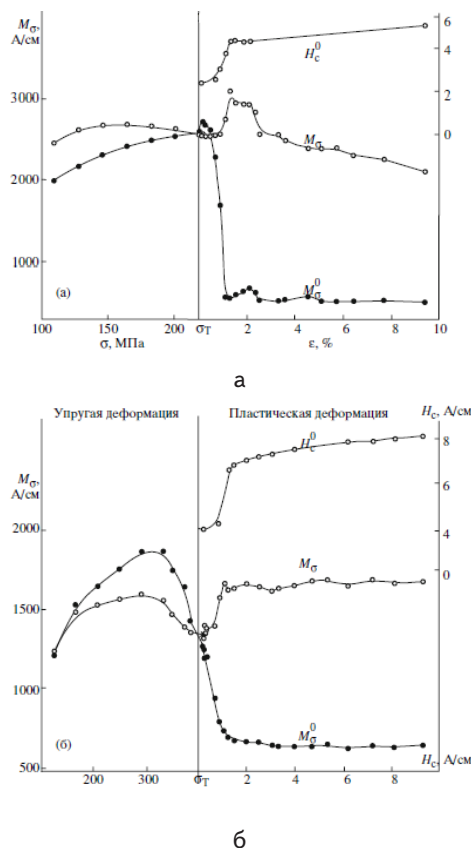


Рис. 2. Зависимости магнитоупругой намагниченности  $M_{\sigma}$  от напряжений  $\sigma$  (в упругой области) и деформаций  $\epsilon$  (в пластической области): пустые точки — в нагруженном состоянии, сплошные точки — в разгруженном состоянии: а — армо-железо, б — сталь 10XСНД

С другой стороны, магнитное поведение становится более сложным в пластической области. Пластическая деформация с помощью процессов скольжения приводит к размножению дислокаций, которые затем развиваются в подструктуры, такие как связки дислокаций и ячейки, образуя более сильные закрепления доменных стенок, чем у отдельных дислокаций [15]. Трудно количественно охарактеризовать степень, с которой закрепляются стенки доменов, что способствует изменению  $H_y$  сигнала. Тем не менее, интересно, что высота волны искривления на графике увеличивается с ростом пластической деформации. Представленные волны дают острые пики и впадины, когда образец подвергается большим деформациям, таким как сжатие. Эта характеристика может быть использована для различения зон концентрации напряжений и соответствующего опасного уровня.

В основу измерений по методу МПМ положено использование определенных датчиков (феррозондовые датчики с рабочей частотой до 400 Гц). Для исследований же также важно знать и другие физические параметры приборов, используемых в опытах. А именно: амплитуда сигнала, как в зоне концентрации, так и фоновая. Конкретных данных о сигнале не представлено во всех

приведенных работах, однако из экспериментальных работ можно получить среднюю оценку такой величины. Так, в [14] величина сигнала  $H_y$  в зоне дефекта или концентрации напряжений составляет 67-70 А/м (во всех опытах эта величина не превышает 100 А/м). Фоновая составляющая сигнала же находится в пределах 50 А/м, не более. Некоторые эксперименты [3] показывают и вообще величину фона в пределах 12-20 А/м.

### 3. Выводы

Несомненно, метод магнитной памяти металла является революционным среди традиционных методов неразрушающего контроля.

Основные практические преимущества нового метода диагностики, по сравнению с известными магнитными и другими методами неразрушающего контроля, следующие:

- применение метода не требует специальных намагничивающих устройств, так как используется явление намагничивания узлов оборудования и конструкций в процессе их работы;
- места концентрации напряжений от рабочих нагрузок, заранее не известные, определяются в процессе их контроля;
- зачистки металла и другой какой-либо подготовки контролируемой поверхности не требуется;
- для выполнения контроля по предлагаемому методу используются приборы, имеющие малые габариты, автономное питание и регистрирующие устройства;
- специальные сканирующие устройства позволяют контролировать трубопроводы, сосуды, оборудование в режиме экспресс - контроля со скоростью 100 м/час и более.
- Кроме того, метод МПМ и соответствующие приборы контроля позволяют:
- выполнять раннюю диагностику усталостных повреждений и прогнозировать надёжность оборудования;
- осуществлять экспресс-сортировку новых и старых деталей по их предрасположенности к повреждениям;
- определять на объекте контроля с точностью до 1 мм место и направление развития будущей трещины, а также фиксировать уже образовавшиеся трещины;

- в отдельных случаях контролировать трубопроводы, сосуды без снятия изоляции.

Обзор материалов по данной тематике показал, что представленные промышленные применения метода МПМ не исчерпывают тему его использования. Его авторы в основном сосредоточены на приложениях, которые задокументированы публикациями. Кроме того, метод используется в электроэнергетике и промышленности в качестве вспомогательного метода для контроля трубопроводов, сосудов под давлением и поверхностей нагрева котлов. Метод магнитной памяти металла является неразрушающим методом испытания с большим потенциалом, и это идеально подходит для многих приложений. К сожалению, многие из его основных вопросов, таких как проблемы самого процесса диагностики или критерии оценки его показаний все еще остаются нерешенными. В каждом случае свои заявки на конкретный образец анализа методом МПМ требуют развития методологии исследования, которая принимает во внимание состояние нагрузки образца во время экспертизы, значения внешнего магнитного поля в месте, где проводится экспертиза, а также расположение образцов относительно других конструкций. В представленных приложениях, специалисты с помощью метода обычно, на собственном опыте, разрабатывают подходящие способы проведения испытаний и определения критериев оценки. Исследования в настоящее время делаются на изучении остаточного магнитного поля в качестве диагностического сигнала для надежной оценки состояния материала. Ожидаемые результаты включают возможность определения областей пластических деформаций в образцах, чтобы определить примерное распределение напряжений и деформаций, а также определить остаточный ресурс компонентов. Метод магнитной памяти металла является сравнительно новым, поэтому также важно провести его полное исследование на истолкование физических основ эффектов, положенных в его суть. Опытное подтверждение таких эффектов является также важным этапом исследований при становлении метода как образцового. Одной из возможных и многочисленных дальнейших задач также является создание компьютерных моделей для проверки как самого метода, так и диагностики образцов и конструкций по нему.

### Литература

1. Дубов, А. А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля [Текст] / А. А. Дубов, Ал. А. Дубов, С. М. Колокольников. – М. : ЗАО «ТИССО», 2008. – 365 с.
2. Li-hong, Dong. The Application of metal magnetic memory testing to the field of the life estimation of remanufacturing blanks [Text] / Li-hong Dong, Bin-shi Xu, Shi-yun Dong, Dan Wang. – Beijing.
3. Roskosz, M. The metal magnetic memory method in the diagnostics of power machinery component [Text] / M. Roskosz, A. Rusin, J. Kotowicz. – Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. – 2010. – Issue 1. – vol. 43.
4. Roskosz, M. Metal magnetic memory testing of welded joints of ferritic and austenitic steels [Text] / M. Roskosz. – NDE for safety: Defectoskopie. – 2010.
5. Власов, В. Т. Физические основы метода магнитной памяти металла [Текст] / В. Т. Власов, А. А. Дубов. – М.: ЗАО «ТИССО», 2004. – 424 с.
6. Магнитоупругий эффект. Физические основы получения информации. [Электронный ресурс] / Блог радиолюбителя. – Режим доступа: <http://cxembl.net/spravochnyie-materialyi/lekcii/magnitoupругij-e-ffekt-fizicheskie-os/>
7. Craik, D. J. Magnetisation changes induced bei stress in a constant applied field [Text] / D.J. Craik, M.J. Wood. – J. Appl. Phys. – 1970. – vol. 3. – pp. 1009-1016.



8. Atherton, D. L. Effect of stress on the magnetization of steel [Text] / D.L. Atherton, D.S. Jiles. – JEEE Trans. Magn. – 1983. – mag. 19. – vol. 5. – pp. 2012-2023.
9. Langman, R. A. The effect of stress on the magnetization of mild steel at moderate field strength [Text] / R.A. Langman. – JEEE Trans. Mag. – 1987. – vol. 21. – pp. 1314-1320.
10. Кулеев, В. Г. К проблеме контроля магнитного состояния ферромагнитных сталей при воздействии на них магнитных полей и упругих напряжений в зарэлеевской области [Текст] / В. Г. Кулеев, М. Н. Михеев, М. Б. Ригмант. – Дефектоскопия. – 1985. – №10. – С. 33-42.
11. Кулеев, В. Г. Исследование причин существенных различий величин коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и начальной магнитной проницаемости ферромагнитных сталей в нагруженном состоянии при их пластическом растяжении [Текст] / В.Г. Кулеев, Т.П. Царькова, А.П. Ничипурук. – ФММ. – 2007. – т. 103. – №2. – С. 136-146.
12. Царькова, Т. П. Особенности магнитоупругого эффекта в пластически деформированных ферромагнитных сталях в слабых магнитных полях [Текст] / Т.П. Царькова, В. Г. Кулеев. – ФММ. – 2009. – т. 108. – №3. – С. 227-236.
13. Новиков, В.Ф. Закономерности магнитоупругого изменения локальной остаточной намагниченности сталей [Текст] / В.Ф. Новиков, В.Ф. Дягилев, М.С. Бахарев, В.В. Нассонов, В.В. Прилуцкий. – Заводская лабораторий. Диагностика материалов. – 2006. – т. 72. – №2. – С. 34-37.
14. Leng, Jiancheng. Characterization of the Elastic-plastic region based on magnetic memory effect [Text] / Leng Jiancheng, Xu Min-qiang, Li Jianwei, Zhang Jiazhong. – Chinese Journal of mechanical Engineering. – 2010. – vol. 23. – №4. – pp. 1-5.
15. Kinser, E. Modeling the interrelating effects of plastic deformation and stress on magnetic properties of materials [Text] / E. Kinser, D.S. Jiles. – Journal of Applied Physics. – 2003. – vol. 93(10). – pp. 626-628.

*Досліджено процеси, які проходять в мастильному середовищі у разі його взаємодії з магнітним полем. Встановлено, що відновлення в магнітному полі найбільш активно проходить з напрямком S-N-S-N та величиною магнітної індукції 0,3 Тл. Визначено, що за умов впливу магнітного поля (МП) на робоче середовище при терті товщина поверхневої плівки досягає 2,5...4,5 мкм*

*Ключові слова: магнітне поле, мащувальне середовище, мастило, тертя, зношування, відновлення, робочий зразок*

*Исследовано процессы, которые проходят в смазочной среде в случае её взаимодействия с магнитным полем. Установлено, что восстановление в магнитном поле наиболее активно проходит с направлением S-N-S-N и величиной магнитной индукции 0,3 Тл. Определенно, что при условиях влияния магнитного поля (МП) на рабочую среду при трении толщина поверхностной пленки достигает 2,5...4,5 мкм*

*Ключевые слова: магнитное поле, смазочная среда, масло, трение, изнашивание, восстановление, рабочий образец*

УДК 621.537.611

## МЕХАНІЗМ ВІДНОВЛЕННЯ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ ДІЄЮ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РОБОЧЕ СЕРЕДОВИЩЕ МОДИФІКОВАНЕ ДІАМАГНЕТИКОМ

**М. М. Свирид**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: svirid\_mn@ukr.net

**І. Л. Трофімов**

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра екології\*\*

E-mail: troffi@ukr.net

**Л. Б. Приймак**

Кандидат технічних наук НАУ, аспірант\*

E-mail: Ludmila-joy@ukr.net

**В. Г. Паращанов**

Науковий співробітник, провідний фахівець

Кафедра безпеки життєдіяльності\*\*

\*Кафедра технологій виготовлення і

відновлення авіаційної техніки\*\*

\*\*Національний авіаційний університет

пр. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна 03058

E-mail: Ludmila-joy@ukr.net

### 1. Вступ

Дослідження, про які йдеться у статті, відносяться до галузі машинобудування. Розвиток машинобуду-

вання і умови експлуатації постійно удосконалюються, що збільшує питомі навантаження на деталі пар тертя. Значна частина машинного парку використовує механізми, які передають зусилля за допомогою гідравліч-