

УДК 621.891

И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Б.Ф. Зюзин

**УПРАВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЛОКАЛЬНЫМ
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ПРИ РЕМОНТЕ ГОРНЫХ МАШИН**

Рассмотрен новый способ восстановления локально изношенных подшипников скольжения пластическим деформированием по прилегающим поверхностям и приведены результаты сравнительных триботехнических испытаний восстановленных и контрольных образцов.

Ключевые слова: восстановление, ремонт, трение, износ, пластическая деформация.

Энергообеспечение Тверского региона можно существенно улучшить за счёт местных ресурсов, которые за последнее время становятся вполне конкурентоспособными в сравнении с газом и мазутом из-за постоянного роста на них цен. Кроме энергообеспечения, восстановление торфяной промышленности поможет в решении проблемы занятости местного населения, так как в недавнем прошлом здесь были трудоустроены тысячи человек. При решении задачи возобновления функционирования торфяной индустрии Тверского региона необходимо восстановить практически весь комплекс добывающих и перерабатывающих машин. Однако оборудование для добычи и переработки торфа в настоящее время в нашей стране почти не производится, так как торфяное машиностроение находится в упадке. Эту проблему можно решить закупкой новой техники за рубежом в Белоруссии или Финляндии, что потребует огромных материальных затрат, поэтому реальной альтернативой закупки может стать ремонт оборудования находящегося на балансе торфопредприя-

тий. Но решить эту задачу можно только за счёт внедрения инновационных технологий ремонта и восстановления машин торфяного комплекса.

Из ремонтной практики известно, что большинство выбракованных по износу деталей теряют не более 1–2 % исходной массы. При этом прочность деталей практически сохраняется. Например, 95 % деталей двигателей внутреннего сгорания выбраковываются при ремонте имеют износ не превышающем 0.3 мм [1], и большая часть их может быть вторично использована после восстановления.

Во всём мире ремонтное производство непрерывно развивается. Для повышения качества ремонта необходимо разрабатывать новые методы восстановления изношенных деталей, обеспечивающих длительный ресурс вторично используемым узлам.

Одним из возможных методов восстановления локально изношенного подшипника скольжения является пластическое деформирование по прилегающей поверхности (ПДПП). В отличие от широко применяемых методов восстановления пластическими

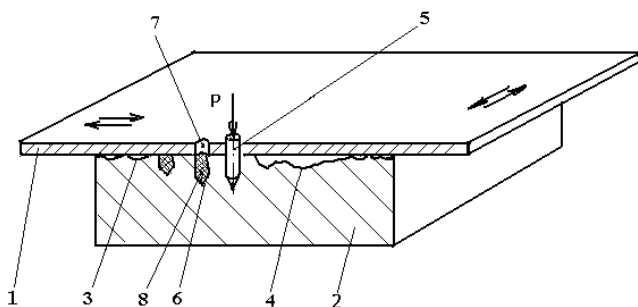


Рис.1. Способ восстановления локально изношенной поверхности.
Пат. РФ, МКП 7 В 23 Р 6/00, 6/02

деформациями [1], при которых после деформирования требуется дополнительная механическая обработка, предлагаемый метод восстановления ПДПП позволяет получить требуемые параметры реконструируемой поверхности без дополнительных затрат, обеспечивая при этом улучшение триботехнических свойств опорных поверхностей [2]. Принципиальная схема устройства для восстановления изображена на рис. 1.

Способ реализуется следующим образом (рис. 1). Ограничитель деформации 1 размещают на детали 2. Снимают топограмму изношенной части 4 восстанавливаемой поверхности. По топограмме определяют точки и величины необходимого пластического деформирования. Поэтапно усилиями P внедряют индентор 5 в восстанавливаемую поверхность причем пластически деформированный материал вытесняемый из углублений 6, поднимает участки изношенной поверхности 4 до упора в ограничитель деформации и образуют восстановленную поверхность номинального профиля, не требующую дальнейшей механической обработки. После завершения всех этапов, пластического деформирования, углубления 6 заполняют антифрикционным материалом 8 (аналог антифрикцион-

ного полимера УП-5-251 [3, 4]) и снимают ограничитель 1 с восстанавливаемой детали 2.

Для выявления основных закономерностей процесса деформирования во время восстановления локального износа по прилегающей поверхности использовалось решение задачи определения силовых и геометрических параметров пластического формоизменения на основе энергетического метода [5]. Энергия, необходимая для обеспечения такой схемы деформации, превышает действительную энергию внутренних сил при пластическом формоизменении. Следовательно, удельные усилия, вычисленные при помощи этого метода, являются верхней границей их действительных значений, но могут быть использованы для оценки основных закономерностей процесса пластического деформирования.

При развитом пластическом течении для мало упрочняющихся металлов в первом приближении можно использовать зависимости, полученные для жестко-идеально-пластичного материала. Соответствующее удельное усилие на рабочую поверхность клина для плоской деформации рассчитывается по формуле

$$q/2k = 0,5 \left(\sum_n^1 v_i l_i + 2\mu \sum_m^1 v_j l_j \right). \quad (1)$$

Исходные величины v_i и l_i могут быть легко определены из принятого кинематически возможного поля и соответствующего плана скоростей.

При решении поставленной задачи рассматривалось два этапа:

первый этап – определение давления на рабочую поверхность индентора и геометрических параметров

зоны деформаций до момента касания вытесненным материалом ограничивающей поверхности;

второй этап – определение давления на рабочую поверхность индентора и геометрических параметров пластической зоны после деформирования вытесняемого материала об ограничивающую поверхность.

Контактное давление на рабочую часть индентора на первом этапе деформирования будет равно

$$q = 4k(1 + \mu). \quad (2)$$

На второй стадии внедрения происходит касание вытесненным материалом детали ограничивающей деформации и начинается формирование восстановленной поверхности. При этом контактное давление на рабочую поверхность индентора увеличивается за счёт деформирования вытесненного материала о прилегающую поверхность. Величину контактного давления в этом случае можно определить с помощью выражения

$$q = 4k(1 + \mu) + kL(4,5 + \mu). \quad (3)$$

При большей глубине внедрения, когда индентор будет выходить своей цилиндрической частью из кондукторной плиты, произойдёт изменение полей скольжения, а соответствующее значение контактного давления рассчитывается по формуле

$$q = 4k(1 + \mu) + 2kL(1 + \mu). \quad (4)$$

По рассчитанному контактному давлению на рабочую поверхность индентора, определяется соответствующая сила внедрения необходимая для осуществления восстановления по предложенному методу.

Представленное выше решение справедливо для внедрения клина и не может быть использовано без учёта некоторых особенностей при решении осесимметричной задачи для конического индентора, но многие авторы применяли метод линий сколь-

жения для аналогичных исследований. Так Шилд [6] показал, что в некоторых случаях для материала, находящегося в состоянии пластического течения согласно критерию Треска, можно построить поле линий скольжения, определяющее напряжённое состояние. Такое поле должно быть согласовано с полем скоростей. Следуя методу Шилда, Локетт [7] построил поля линий скольжения в задаче внедрения гладкого жесткого конуса в полупространство. При этом среднее давление на грань конуса получается несколько больше чем у клина, но общие закономерности сохраняются.

Предложенный метод восстановления пластическими деформациями имеет некоторое сходство с процессом прошивки металла.

В книге А.Д. Томленова [5], показано, что при значительной глубине прошивки соответствующая сила внедрения растёт только за счёт трения деформируемого материала о цилиндрическую часть пуансона, что существенно влияет на соотношение силовых и геометрических параметров при деформировании.

Для проверки принятой теоретической модели проведено эмпирическое исследование пластического деформирования изношенной поверхности при восстановлении в локальной точке.

Для моделирования процесса восстановления (ПДПП) в зоне локальной деформации использовалось специально разработанное устройство (рис. 2).

Исследования на устройстве проводятся следующим образом. На основание 2 укладывалась восстанавливаемая деталь 1 и прижималась через прокладку 4 прилегающей поверхностью 5 (восстанавливаемый зазор имитировался прокладкой толщиной

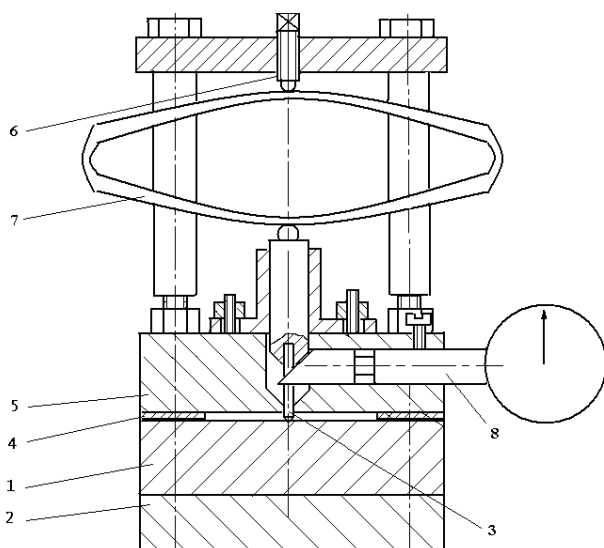


Рис. 2. Схема деформирующего устройства (пружина, компенсирующая вес динамометра и индентора, не показана)

0.1 мм). Нажимным болтом 6 задавалась нагрузка, которая контролировалась с помощью динамометра 7, а соответствующие глубины внедрения индентора 3 измерялись индикатором 8. Показания индикатора 8 снимались после снятия нагрузки на каждом этапе нагружения, чтобы упругие деформации не влияли на измерения. Для увеличения точности измерения повторялись несколько раз на каждом из испытуемых материалов.

Для сравнения теоретических и эмпирических результатов осуществлён переход к безразмерным величинам, глубина внедрения h выражена через относительное внедрение $\delta = h/d$, где d – диаметр индентора, остальные линейные параметры определяются в пропорции от глубины внедрения δ .

Сила внедрения P выражена в относительных величинах в виде $\Delta = P/P_0$, где P_0 сила при внедрении индентора на глубину 0.5δ . Такая величина принята по результатам экспе-

римента и расчётам, так как в этой точке эмпирическая и теоретическая кривые пересекаются [2].

По результатам вычислений и эмпирических исследований построен график зависимости относительной глубины внедрения δ от относительной нагружающей силы Δ , приведённый на рис.3.

На рис. 3 интервал **а** – деформирование до касания восстанавливаемым материалом ограничивающей поверхности, интервал **б** – до выхода цилиндрической части индентора из ограничивающей поверхности, интервал **в** – после выхода цилиндрической части индентора из ограничивающей поверхности,

интервал **г** – сила внедрения растёт только за счёт трения по цилиндрической части индентора. Кривая 1 построена при максимальном значении коэффициента пластического трения $\mu=0.5$, а график 2 при $\mu=0.1$. На рис.3 в интервалах **б**, **в** и **г** экспериментальные точки расположились в зависимости от величины коэффициента пластического трения (в пределах от 0.1 до 0.5), что объясняет разброс результатов в этой части графика.

В целом эмпирическое исследование показало, что полученные теоретические зависимости (для случая деформирования при восстановлении по прилегающей поверхности), основанные на закономерностях, определённых с помощью энергетического метода, адекватно отражают процесс пластического формоизменения и могут быть использованы для его описания.

На основе полученных исследований разработан алгоритм расчета

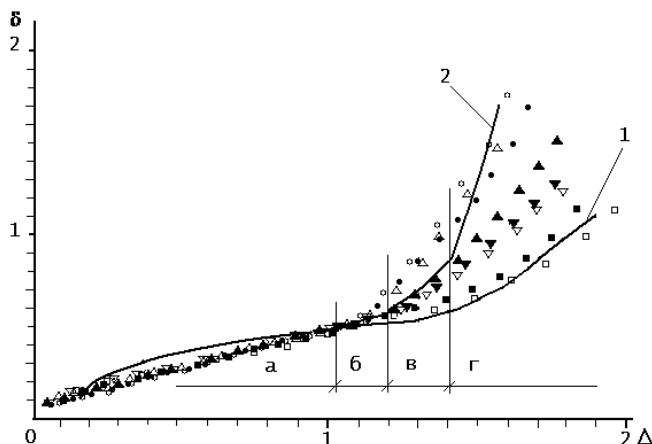


Рис. 3. Зависимость относительного внедрения δ от относительного усилия Δ : теоретические кривые и экспериментальные точки (○ - свинец; ● - баббит Б83; □ - АМЦ; ■ - АК-9; △ - ОЦС5-5-5; ▼ - СЧ-18; ▽ - СТ-3)

глубин внедрения, обеспечивающих гарантированное восстановление изношенной поверхности на основе топографирования с оптимизацией процесса по силовым параметрам. Вытесняемый объем материала легко определяется исходя из формы и размеров индентора, внедренного на глубину h . Этот объем перераспределяется в зону восстановления, формируя номинальный профиль и постепенно убывающую к изношенному участку свободную поверхность,

форму которой сложно определить теоретически. Описание формы свободной деформированной поверхности получено на основе экспериментальных данных, в виде функции $f(x) = a \cdot 2^{-0.85x}$ (5)

В представленном выражении x – расстояние от края восстановленной площадки в мм, а $f(x)$ – высота деформированного участка в мм. Так как в каждой конкретной точке реконструируемой поверхности величина износа разная, то для определения значений высот свободно деформированной поверхности при ПДПП необходимо в функцию $f(x)$ подставить a (соответствующее значение восстанавливаемого зазора в мм).

Используя функцию 5, получены данные, отличающиеся от эмпирических результатов не более чем на 10 %.

Кроме получения номинальных размеров подшипника важно обеспечить его долговечность за счет улучшения характеристик рабочей поверхности. Применение прилегающей поверхности приводит к деформации

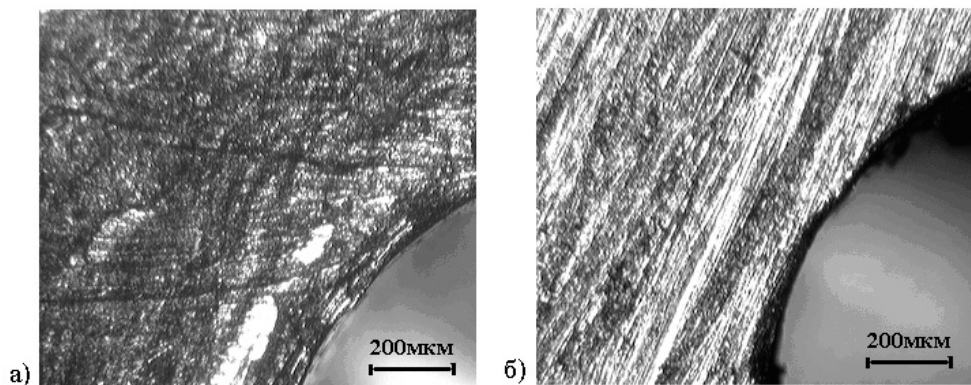


Рис. 4. Фотография деформированной поверхности (деформирование без ограничивающей поверхности (а) с ограничивающей поверхностью (б))

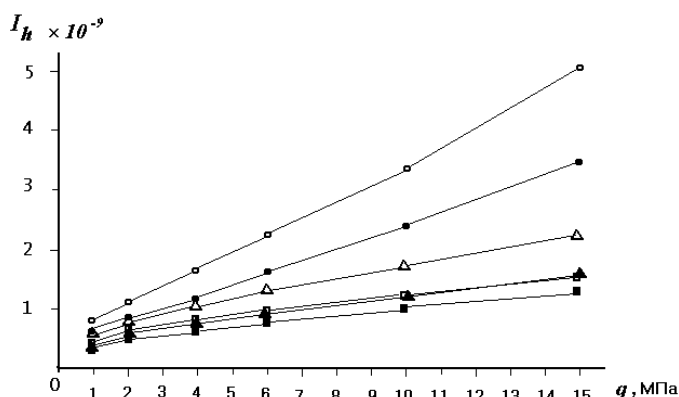


Рис. 5. Влияние контактного давления на интенсивность изнашивания некоторых подшипниковых материалов (схема трения торцом пальчика по плоскости, условия трения - $V = 0.2$ м/с, $T \sim 300-330$ К); (● ○ - АК-9; ■ □ - БрС30; ▲ △ - ЦАМ10-5. (● ■ ▲ - восстановленные образцы, ○ □ △ - контрольные образцы)

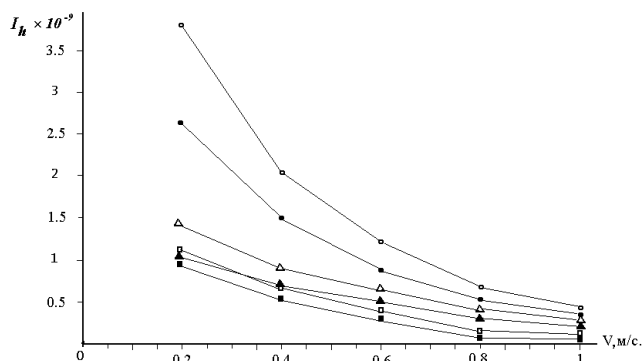


Рис. 6. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания некоторых подшипниковых материалов (схема трения торцом пальчика по плоскости, условия трения - $q = 10$ МПа, $T \sim 300-330$ К)
 ● ○ - АК-9; ■ □ - БрС30; ▲ △ - ЦАМ10-5 (● ■ ▲ - восстановленные образцы, ○ □ △ - контрольные образцы)

ям с образованием преимущественно напряжений сжатия в поверхностном слое. Об этом свидетельствуют результаты специального оптического исследования пластической зоны. Образец, обработанный без ограни-

чивающей поверхности, после деформирования имел на поверхности пластической зоны радиальные трещины (рис. 4, а), а на образце, полученном с применением ограничивающей поверхности, видимых трещин не наблюдается (рис. 4, б).

Для проверки триботехнических параметров реконструированных поверхностей подшипников скольжения проведены исследования зависимости интенсивности изнашивания от контактного давления (рис. 5) и скорости скольжения (рис. 6) для образцов, не требующих восстановления (контрольных) и восстановленных деталей.

Как видно из графиков, снижение интенсивности изнашивания восстановленных образцов по сравнению с контрольными, наблюдается во всех случаях.

Наиболее существенное снижение получило для алюминиевого сплава АК-9, до 40 %, у цинкового сплава ЦАМ10-5 до 25 %, а наименьшее у свинцовой бронзы БрС30 до 10 % [8].

Разработанный способ восстановления изношенных поверхностей, позволяет получать номинальные геометрические параметры узла трения без дополнительной механической обработки, а композицион-

ная структура обеспечивает реконструированной поверхности лучшие триботехнические свойства, по сравнению с поверхностями, не имеющими такого строения, что существенно влияет на работоспособность агрегатов, используемых после ремонта.

Обозначения:

q – контактное давление; k – пластическая постоянная материала; v_i , l_i – безразмерные величины разрывов скоростей и длин линий скольжения блоков деформируемого материала, v_j , l_j – безразмерные величины разрывов скоростей и длин линий скольжения по рабочим поверхностям деформирующего инструмента полу-

ченные по результатам исследования полей линий скольжения и соответственных планов скоростей; μ – коэффициент пластического трения; L – длина восстановленного участка изношенной поверхности, определяемая в пропорции от $l_{i,j}$ для принятого поля линий скольжения; h – глубина внедрения индентора; d – диаметр индентора в цилиндрической чисти; $\delta = h/d$ – безразмерная относительная глубина внедрения; P – сила внедрения индентора в восстанавливаемую поверхность; P_0 – сила внедрения при глубине внедрения $\delta = 0.5$; $\Delta = P/P_0$ – безразмерная относительная сила внедрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Канарчук Ф.Д.* Восстановление автомобильных деталей. Технология и оборудование [Текст] / Ф.Д. Канарчук, А.Д. Чигринец, О.Л. Голяк, П.М. Шоцкий. М.: Транспорт, 1995. 303 с.

2. *Болотов А.Н.* Восстановление изношенных поверхностей методом пластического деформирования [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика фрикционного контакта. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 9. Тверь. ТГТУ, 2002. С. 39-43.

3. *Ходус В.В.* Изготовление и эксплуатационные свойства деталей из триботехнических композиционных материалов [Текст]: Машиностроительное производство. Серия Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. Выпуск 1./ В.В. Ходус, А.С. Васильев. М.: ВНИИТЭМР, 1991. 47 с.

4. *Муляр Ю.Н.* Антифрикционные смазывающие материалы в машиностроении

[Текст]. Машиностроительное производство. Серия Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. Выпуск 3. / Ю.Н. Муляр М.: ВНИИТЭМР, 1991. 64 с.

5. *Томлёнов А.Д.* Теория пластического деформирования металлов [Текст] / А.Д. Томлёнов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.

6. *Shield R.T.* On plastic flow of metals under conditions of axial symmetry [Текст] / R.T.Shield. Proc. Roy. Soc., 1955. 267 p.

7. *Lockett F.J.* Indentation of a rigid-plastic material by a conical indenter [Текст] / F.J. Lockett. Mech. and Phys. of Solids, 1963, 345 p.

8. *Болотов А.Н.* Сравнительные триботехнические испытания материалов [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика фрикционного контакта. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 10. Тверь. ТГТУ, 2003. С 40-44. **ТГТУ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Горлов Игорь Васильевич – кандидат технических наук, доцент, gorloviv@yandex.ru,

Болотов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, alnikbltov@rambler.ru,

Зюзин Борис Фёдорович – доктор технических наук, профессор, (4822) 449389.

Тверской государственный технический университет.