

УДК 621.791.92:620.178

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННЫХ ПАР ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

С. А. АСТАПЧИК^а, Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО^{б*}, А. Л. ЛИСОВСКИЙ^б, В. И. СОРОГОВЕЦ^б

Исследована пара трения коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания (ДВС) — вкладыш. Проводился поиск оптимального по износостойкости и технологичности способа и материала для нанесения покрытия с последующей механической обработкой шеек коленчатого вала ДВС. Выявлены оптимальные твердость, шероховатость поверхности вала, при которых пара трения скольжения имеет наибольшую износостойкость. На основании проведенных исследований предложена технология восстановления коленчатого вала ДВС, включающая в себя плазменную наплавку, ультразвуковую и лазерную обработку.

Ключевые слова: самофлюсующийся диффузионно-легированный порошковый материал на железной основе, ультразвуковая обработка, лазерная обработка, интенсивность изнашивания.

Введение. Важное значение для работы пары трения скольжения имеет качество поверхности деталей, которое характеризуется микро- и макрогеометрией поверхности, упрочнением поверхностного слоя и возникающими в нем остаточными напряжениями.

Известно, что при работе пары трения, реальная поверхность не является гладкой и площадь фактического контакта даже при высоких нагрузках не превышает 40% номинальной площади [1].

Наиболее интенсивное изнашивание пар трения скольжения наблюдается в период приработки, пуска и остановки, реверса [1]. Анализ работы коленчатых валов в системе ДВС показывает, что увеличение их износостойкости возможно при применении материалов, обладающих противоречивыми свойствами: достаточной твердостью, чтобы уменьшить величину абразивного износа и относительной пластичностью, чтобы улучшить прирабатываемость пары трения и уменьшить величину усталостных повреждений. Поэтому при проведении исследований исходили из того, что применение наплавки твердосплавного слоя самофлюсующимися сплавами на основе железа, имеющими как твердую составляющую, противостоящую абразивному изнашиванию, так и мягкую матрицу, улучшающую прирабатываемость и усталостные свойства, позволит разрешить данное противоречие. При этом естественно учитывали, что главное влияние на износостойкость оказывает материал покрытия, а не основы.

Известно, что на интенсивность изнашивания, величину силы трения большое влияние оказывает исходная шероховатость поверхностей трения [2, 3]. Причем новая шероховатость, образованная после приработки, может быть как больше, так и меньше первоначальной [2], т. к. ее образование и установление конечных значений во многом зависит от нормального давления, использования смазочно-охлаждающей жидкости и других параметров работы пары трения. Поэтому нами исследовалось влияние исходной шероховатости на характер работы пары трения. В работе также решалась задача оценки влияния регулярного рельефа, поскольку имеются сведения о том, что создание на поверхности пары трения маслосдерживающего рельефа в виде лунок и канавок, растравливание сетки пор или вытравливание

^а Физико-технический институт АН Бела руси. 220141, г. Минск, ул. Жодинская, 4.

^б Полоцкий государственный университет, кафедра ТКМ. Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.

* Автор, с которым следует вести переписку.

сотовых ячеек через перфорированный алюминиевый экран повышает сопротивление задиру [3, 4].

Поскольку влияние твердости материалов пары трения на ее износостойкость неоднозначно [5–7], для практики весьма важно определение оптимальной твердости покрытия вала, наплавленного с применением высококонцентрированных источников нагрева (плазма, лазерное излучение). Ранее проведенные нами исследования позволили определить, что при трении скольжения по методу Шкода—Савина лучшей износостойкостью обладает диффузионно-легированный самофлюсующийся сплав ПР-сталь 45Р4. Однако необходимо определить и уточнить его свойства (в частности, зависимость износостойкости от твердости) при работе пары трения в реальных режимах смешанного и граничного трения.

Имеются сведения о том, что при контактном давлении 30 МПа, что характерно для таких деталей как коленчатый вал ДВС, износостойкость пары трения, прошедшей лазерную обработку, на порядок выше, чем после закалки ТВЧ, т. е. в результате лазерной обработки можно дополнительно повысить износостойкость многих деталей [9, 10]. Характерная особенность этого процесса — число циклов до разрушения повышается на один — два порядка [11]. Важно поэтому оценить влияние лазерной обработки на механические и триботехнические характеристики поверхностных слоев за счет изменения микро- и макротопографии поверхности и структуры материала реальной пары.

Методика испытаний. Для определения оптимального по износостойкости коленчатого вала ДВС использовали машину трения СМЦ-2. Схема испытаний “вал с покрытием — вкладыш” серийного двигателя внутреннего сгорания СМД-14. Для этого модернизировали узел закрепления образцов. Согласно рекомендациям работы [12] определяли максимально допустимую нагрузку на подшипник скольжения, определяемую прочностью материала вкладыша, которая составила в нашем случае 10,1 Н для вкладыша размером 12×12 мм. Материал вала — сталь 40Х, вкладыша — сплав АСМ. В качестве смазочного материала использовали масло М10В2 (ГОСТ 8581—78), чаще всего применяемое в системе смазывания среднефорсированных ДВС. Масло вводили в зону трения, путем окунания образцов в масляную ванну, т.е. создавали режим смешанного трения, при котором на основании анализа работы подшипников скольжения ДВС имеет место наибольший износ. С целью ужесточения режимов испытаний в масло добавляли (до 30 об.%) абразивные частицы SiO_2 и Al_2O_3 размером ≤ 30 мкм. Эти частицы постоянно имеются в масле, т.к. практически не удаляются из него фильтрующими устройствами системы смазки ДВС. Скорость скольжения также устанавливалась на основании анализа работы ДВС во время его пуска, которая составляла в нашем случае 2,1 м/с. Для получения регулярного микрорельефа использовалась установка для ультразвуковой обработки, собранная на базе токарного станка 1К62 [13, 14]. Ромбовидный регулярный микрорельеф на поверхности образцов получали двумя инструментами, расположенными напротив друг друга, движущимися параллельно оси детали в противоположных направлениях. Инструментом для обработки служил цилиндр диаметром 6 мм из твердого сплава ВК6, закрепленный на торце концентратора магнитострикционного преобразователя ПМС1-1. Обработку поверхности трения проводили боковой поверхностью цилиндра. Амплитуда перемещения цилиндра — 12 мкм, статическая сила прижатия им детали — 40 Н. В процессе испытания для смазывания использовали индустриальное масло И-20. Изменения шероховатости проводили, варьируя скорость подачи ультразвукового инструмента и число проходов.

Наплавку проводили на плазменной установке УПС-304 диффузионно-легированным порошком ПР-сталь 45Р4. Величину твердости задавали температурно-временными параметрами диффузионного легирования порошка, определяемыми режимами, описанными в работе [15]. После наплавки проводили токарную обработку вала и с помощью ультразвука по разработанной методике до шероховатости $R_a = 0,16...0,5$ мкм. Шероховатость обработанных поверхностей измеряли на профилометре-профилографе модели 252. Твердость изменяли в пределах 20...55 $HRC_{\text{с}}$. Поверхность трения — шейку коленчатого вала обрабатывали CO_2 -лазером “Кипр-1” ($W = 1$ кВт, $d = 2...3$ мм, $h = 0,5...1,0$ мм без оплавления), при этом исходную шероховатость поверхности образца вала оставляли без изменения. Обработку проводили так, что дорожки перекрывались и с расстоянием между ними $l = 0,5...3$ мм.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Исследования изнашивания коленчатого вала ДВС, наплавленного самофлюсующимся диффузионно-легированным порошковым сплавом ПР-сталь 45Р4 в зависимости от исходной шероховатости показали, что меньшая

интенсивность изнашивания наблюдается при исходной шероховатости поверхности вала, созданной ультразвуком, $R_a = 0,32...0,50$ мкм. Очевидно, что при данных условиях работы эта шероховатость обеспечивает и минимальную силу трения. Путь трения в этом случае составлял 16 тыс. м.

Аналогичная характеристика получена при исследовании интенсивности изнашивания сопряженного с валом стандартного вкладыша, имеющего шероховатость $0,1...0,32$ мкм. Полученные результаты дают основание считать, что исходная шероховатость вкладыша оказывает меньшее влияние на интенсивность изнашивания пары трения из-за его лучшей прирабатываемости. Во время приработки условия на поверхности трения постоянно изменяются по мере увеличения пути трения. Изменяется также и интенсивность изнашивания. В начальный период контакт двух обработанных поверхностей трения происходит по вершинам наиболее выступающих участков микронеровностей, которые образовались в результате предшествующей механической обработки. Под действием нагрузки выступы на поверхности трения деформируются и образуется новая шероховатость, отличная от исходной. Началу приработки соответствуют весьма высокие давления на площадке контакта, превышающие допустимые значения для материала вкладыша. На его поверхности образование новой шероховатости происходит более интенсивно, что влечет за собой и более интенсивное изнашивание вкладыша. Малая шероховатость также увеличивает величину износа, т. к., видимо, ухудшаются условия смазывания поверхности трения масляной пленкой и связанные с этим гидродинамические процессы, которые ведут к увеличению площади контакта движущихся относительно друг друга поверхностей трения. В этом случае, по-видимому, большую роль в интенсивности процесса изнашивания играют абразивные частицы и продукты износа, находящиеся в масле. Размер их имеет один и тот же порядок как и толщина слоя масляной пленки. Шаржирование поверхностей трения этими частицами оказывает решающее влияние на величину износа. Вопреки устоявшимся представлениям об увеличении времени приработки при увеличении исходной шероховатости поверхности пары трения скольжения, время приработки практически во всех случаях исследований было примерно одинаково (рис. 2) как для вала, так и для вкладыша и путь трения составил около 4 тыс. м, после чего каких-либо изменений шероховатости не наблюдалось.

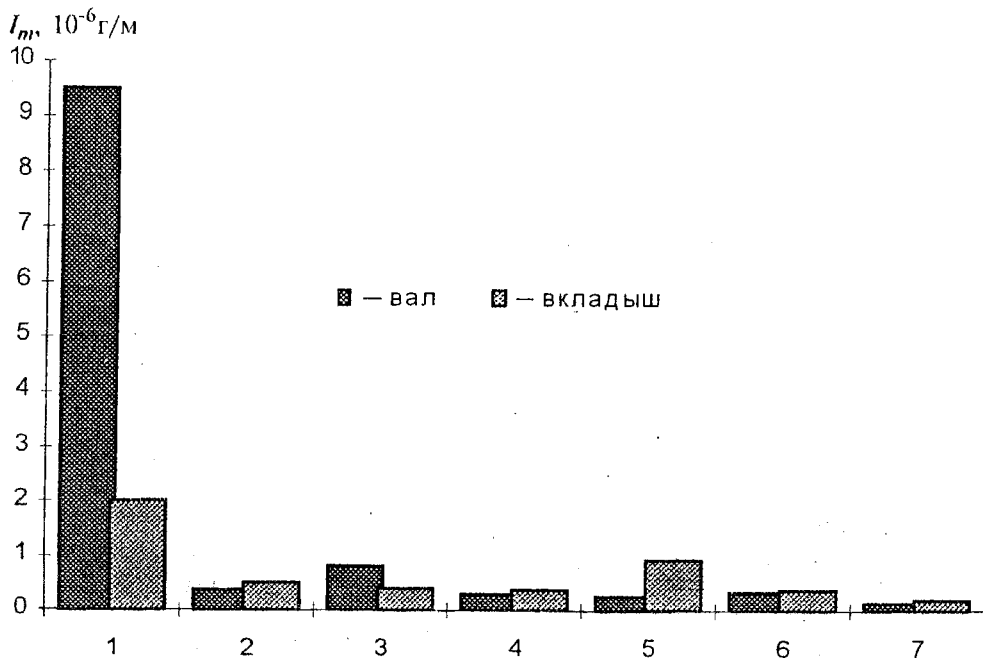


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания коленчатого вала ДВС и сопряженного с ним вкладыша от вида упрочнения и обработки вала: 1 — коленчатый вал шлифованный в ремонтный размер по заводской технологии; 2 — восстановленный разработанным сплавом и шлифованный по заводской технологии; 3 — восстановленный разработанным сплавом, шлифованный и обработанный ультразвуком до $R_a = 0,050...0,063$ мкм; 4 — то же до $R_a = 0,32...0,40$ мкм; 5 — то же до $R_a = 0,2...0,25$ мкм; 6 — то же до $R_a = 0,125...0,160$ мкм; 7 — то же и дополнительно обработанный лазерным лучом без оплавления

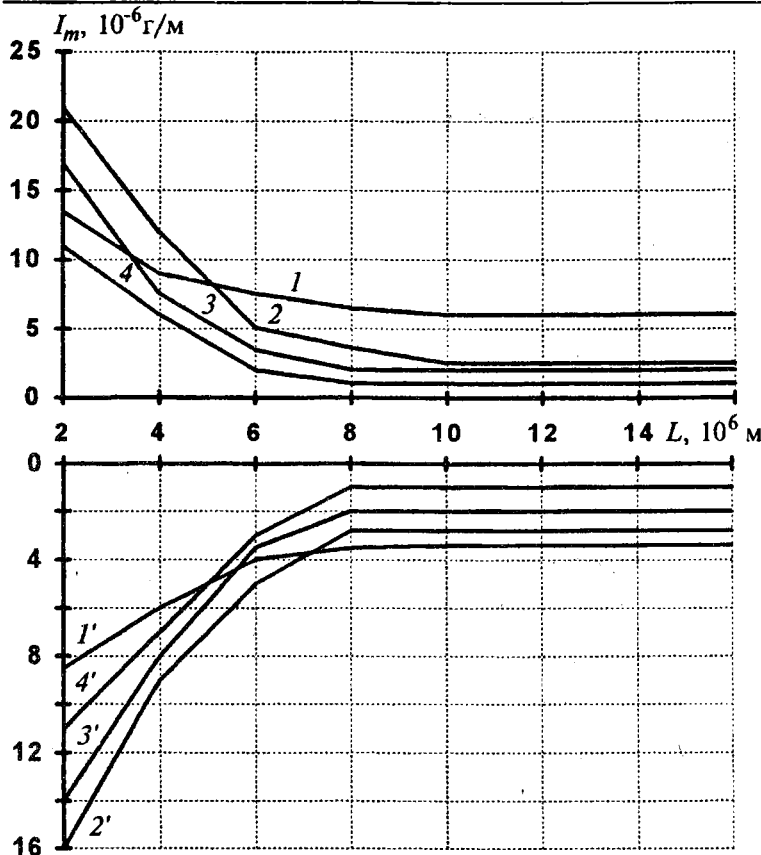


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания коленчатого вала (1–4) и сопряженного с ним вкладыша (1'–4') от пути трения: 1 – вал шлифованный в ремонтный размер по заводской технологии; 2 – вал с плазменной наплавкой диффузионно-легированным сплавом ПР-сталь 45, и шлифованный по заводской технологии; 3 – тоже и дополнительно шлифованный и обработанный ультразвуком до $R_a = 0,050 \dots 0,063$ мкм; 4 – то же до $R_a = 0,32 \dots 0,50$ мкм

разования новой шероховатости в результате работы пары трения служат закономерности изменения исходного качества поверхностей трения в их рабочее эксплуатационное состояние.

Исследования зависимости интенсивности изнашивания от твердости наплавленного покрытия (рис. 3) показали, что наименьшей интенсивностью изнашивания обладает покрытие с твердостью $30 \dots 40 HRC_3$. При твердости $\geq 45 HRC_3$ в поверхностном слое возрастает количество микротрещин, которые увеличивают интенсивность изнашивания вкладыша. Увеличение износа при твердости $< 25 HRC_3$ объясняется также низкими физико-механическими свойствами и высокой пластичностью поверхностного слоя, который обладает и меньшей износостойкостью. Установлено, что лазерная обработка без оплавления повышает износостойкость вала по сравнению с необработанным в 5,4 раза за счет изменения структуры поверхностного слоя, которая увеличивает несущую способность поверхности трения как в режиме приработки, так и в режиме стабилизации условий трения.

Практического влияния величины расстояния между упрочненными дорожками на интенсивность изнашивания обнаружено не было, хотя при исследовании микротвердости поверхности наблюдается значительная неравномерность как по глубине упрочненного слоя, так и по ее поверхности. Такая же неравномерность микротвердости наблюдается и при лазерной обработке с перекрытием дорожек, где имеют место зоны с пониженной микротвердостью. Эти зоны возникают в результате того, что на закаленную предыдущим проходом дорожку воздействует периферийная часть лазерного луча при облучении следующей дорожки. Так как плотность светового потока в этой части снижается к краям дорожки, то происходит отпуск ранее закаленной лазерным излучением поверхности, что приводит к уменьшению микротвердости материала. Поэтому с целью повышения качества обработки

Вместе с тем упорядоченная с помощью ультразвука шероховатость поверхности вала также оказывает существенное влияние на величину интенсивности изнашивания. Так, шлифовка по заводской технологии обеспечивает получение шероховатости $0,32 \dots 0,50$ мкм, однако ультразвуковая обработка до такой же шероховатости уменьшает интенсивность изнашивания как в период приработки, так и на стадии установившегося режима работы. Видимо, такая поверхность улучшает процессы сложного динамического взаимодействия сил трения, смазочного материала и энергетических изменений поверхностного слоя металла. Таким образом, результаты проведенных экспериментов показывают, что создание на поверхности трения с помощью ультразвука упорядоченного микрорельефа с шероховатостью $0,16 \dots 0,50$ мкм увеличивает износостойкость наплавленного высококонцентрированным источником поверхностного слоя из саморасширяющихся сплавов на железной основе. Основой обра-

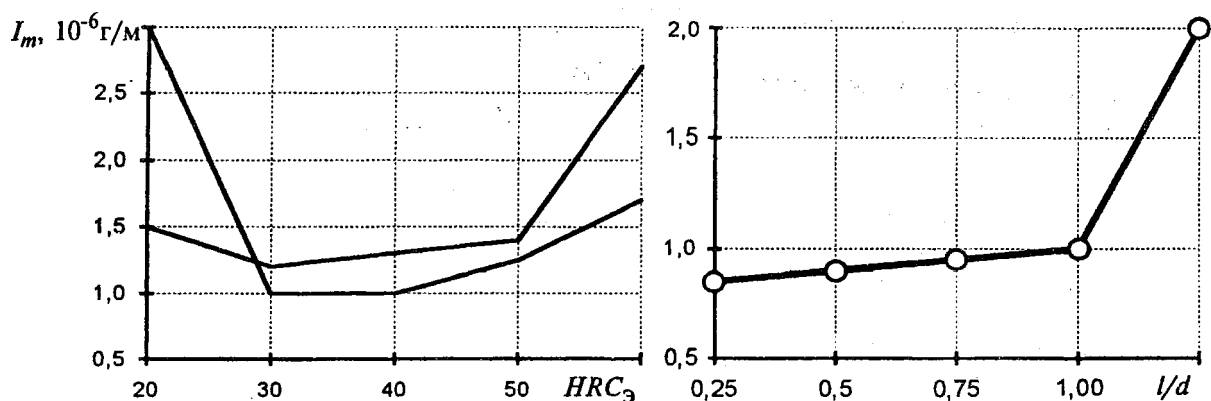


Рис. 3. Зависимость интенсивность изнашивания коленчатого вала, упрочненного плазменной наплавкой самофлюсующимся сплавом ПР-сталь 45, в паре трения с вкладышем ДВС от твердости наплавленного слоя

Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания I_m упрочненного лазером коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания от отношения расстояния между дорожками l к ширине лазерной дорожки d

желательно проводить ее без перекрытия, с расстоянием между дорожками, равным ширине самой дорожки. При дальнейшем увеличении расстояния между дорожками интенсивность изнашивания увеличивается (рис. 4.).

Выводы. Таким образом проведенные исследования показали, что наибольшей износостойкостью при трении скольжения обладают поверхности трения, наплавленные при помощи плазмы диффузионно-легированным сплавом ПР-сталь 45P4, твердостью 30...40 HRC_3 , обработанные ультразвуком до шероховатости 0,16...0,32 мкм. В этом случае наибольшей износостойкостью обладает и сопряженный с ним стандартный вкладыш.

Установлено, что лазерная обработка покрытия из диффузионно-легированного сплава ПР-сталь 45P4 повышает износостойкость вала в 5,4 раза и вкладыша — в 2 раза.

На основании сопоставительной оценки вероятных способов упрочнения, разработана технология восстановления и упрочнения поверхностей скольжения коленчатых валов ДВС, включающая: плазменную наплавку покрытия из самофлюсующегося сплава ПР-сталь 45P4, твердостью 30...40 HRC_3 ; черновую лезвийную, чистовую ультразвуком до шероховатости 0,32...0,50 мкм и лазерную обработку без перекрытия лазерных дорожек до значения величины $l/d = 1$.

Обозначения

HRC_3 — твердость по Роквеллу; R_a — шероховатость; W — мощность лазерного излучения; l — расстояние между лазерными дорожками; d — ширина лазерной дорожки; h — глубина обработки; I_m — интенсивность изнашивания; L — путь трения.

Литература

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника. Москва: Машиностроение (1989)
2. Филяев А. Т. Изнашивание сталей в ультразвуковом поле. Минск: Наука и техника (1978)
3. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. Москва: Высшая школа (1991)
4. Пантелеенко Ф. И., Лисовский А. Л. Исследования упрочнения пар трения скольжения высококонцентрированными источниками нагрева с применением самофлюсующихся твердых сплавов на железной основе // Тез. докл. конф. "Современные материалы и технологии упрочнения и восстановления деталей машин". Новополоцк (1995), 71—72
5. Справочник по триботехнике: В 3-х т. // Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. Москва: Машиностроение (1990)
6. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Бершадский А. К. Надежность и долговечность машин. Киев: Техніка (1975)

7. Хрушов М. М., Бабичев М. А. Исследование изнашивания металлов. Москва: Машгиз (1960)
8. Пантелеенко Ф. И., Ворошнин Л. Г., Любецкий С. Н. Влияние структуры покрытий на их износостойкость // Трение и износ, 12 (1991), № 2, 310—314
9. Дубняков В. И., Козырев С. П., Пимков Н. Л. Повышение износостойкости трущихся поверхностей лазерным упрочнением // Трение и износ, 5 (1984), № 4, 713—717
10. Влияние лазерной закалки на механические свойства стали 45 / В. С. Великих, В. П. Гончаренко, А. В. Романенко, В. Ф. Терентьев // ФХОМ (1983), № 13, 21—25
11. Моряшев С. Ф., Воинов С. С. Влияние режима лазерной закалки на пределы выносливости и износостойкости стали // Поверхность (1984), № 2, 138—142
12. Трение, изнашивание и смазка. Справочник: В 2 кн. / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. Москва: Машиностроение (1979)
13. Булавин В. А., Клубович В. В., Пантелеенко Ф. И., Лисовский А. Л. Оптимизация процесса повышения износостойкости деталей машин // Весці АНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук. (1994), № 13. 70—73
14. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. Москва: Машиностроение (1980)
15. Пантелеенко Ф. И., Любецкий С. Н. Самофлюсующиеся порошки и износостойкие покрытия из них. Обзорная информация. Минск (1991)

Поступила в редакцию 05.09.96.

Astapchik S. A., Panteleenko F. I., Lisovskii A. L., Sorogovets V. I. Investigation of wear resistance of hardened sliding friction pairs.

An internal combustion engine (ICE) crankshaft -- bushing pair was investigated. An optimal wear-resistant coating material and efficient method to apply it to ICE journal with further machining was found. An optimal hardness and roughness of the crankshaft surface were determined at which the sliding pair has the highest wear resistance. The technique for restoring ICE crankshaft combining plasma facing, laser and ultrasonic treatment is proposed.