

Концепция микроуровневого анализа физико-механических свойств модифицированных поверхностей

В.И. Шастин^{1 а}, С.К. Каргопольцев^{2 б}

¹Сибирская академия права, экономики и управления, ул. Сурикова 21, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^аsmwmnf@gmail.com, ^бkck@irgups.ru

Статья поступила 5.05.2016, принята 12.05.2016

В последнее время поверхностное модифицирование конструкционных материалов используется для разработки новых технологических процессов, в которых необходимое качество продукции обеспечивается за счет формирования высокопрочной износостойчивой микроструктуры гетерогенного поверхностного слоя. Особую актуальность в этом направлении приобретают технологии лазерного модифицирования. Статья посвящена актуальным вопросам исследования эксплуатационных и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей машин, имеющих неоднородное структурное строение. Предлагается методология комплексной оценки параметров, оказывающих влияние на процессы изнашивания модифицированных поверхностей на примере лазерного термоупрочнения и наплавки. Концепция предусматривает дифференциальный микроанализ физико-механических и трибологических свойств гетерогенной системы поверхностного слоя. В основу методик исследования положены процессы, происходящие в жидких средах при возбуждении в них ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. В работе приведены результаты экспериментальных исследований по оценке эрозивной стойкости, параметров гидроабразивной износостойкости и определения микротвердости отдельных микрообъектов и монослоев. Приводится краткое описание экспериментального оборудования, методик проведения экспериментов и анализ исследуемых параметров. Апробированные способы запатентованы и ориентированы на применение в области технического диагностирования гетерогенных поверхностей и покрытий.

Ключевые слова: поверхностный слой; микроанализ; износостойкость; комплексная оценка параметров; лазерное излучение; эрозивная стойкость; микротвердость.

Concept of micro-level analysis of physical and mechanical properties of modified surfaces

V.I. Shastin^{1 а}, S.K. Kargapotsev^{2 б}

¹Siberian Academy of Law, Economics and Management; 21, Surikov St, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevskiy St., Irkutsk, Russia

^аsmwmnf@gmail.com, ^бkck@irgups.ru

Received 5.05.2016, accepted 12.05.2016

Currently surface modification of structural materials has been used for development of new technological processes. In these processes necessary quantity of products is provided by formation of high-strength wear-resistant microstructure of a heterogeneous surface layer. Technologies of laser modification are of special importance in this direction. The article is devoted to topical questions of research of operational and physical and mechanical properties of a surface layer of machine parts with heterogeneous structural formation. On the example of laser thermal strengthening and surfacing, methodology has been offered for complex estimation of the parameters, influencing wear processes of modified surfaces. The concept provides differential microanalysis of physical and mechanical and tribological properties of the heterogeneous system of a surface layer. Processes in liquid mediums and under ultrasonic oscillations of high intensity have been used in research. Results have been presented for experimental research on estimation of erosion behaviour, parameters of hydroabrasion wear resistance and identification of microhardness of individual microscopic objects and monolayers. Short description has been given for experimental equipment, techniques for conducting experiments and the analysis of research parameters. The techniques approved have been patented and focused on the application in technical diagnostics of heterogeneous surfaces and coatings.

Key words: surface analysis; microanalysis; wear resistance; complex estimation of parameters; laser radiation; erosion behavior; microhardness.

Введение

Состояние поверхностного слоя деталей является одним из основополагающих показателей качества и надежности машин. Оценка состояния учитывает не только все виды неровностей, но также химические и

физико-механические свойства, включая структурный, фазовый, химический составы, остаточные напряжения, микродеформации, микротвердость и др. [1–4]. Это положение дало начало достаточно новому учению об инженерии поверхности [5].

В работах отечественных и зарубежных ученых по трению и износу [6–10] установлено, что увеличение чистоты поверхности не всегда снижает силу трения и износ. Она может быть как меньше, так и больше исходной [4]. Это вытекает также из молекулярно-механической теории трения И.В. Крагельского, откуда следует, что снижение неровностей шероховатости приводит к уменьшению механической составляющей коэффициента трения и увеличению ее молекулярной или когезионной составляющей.

Исследованию влияния физико-механических свойств поверхностных слоев при трении посвящено достаточно много работ [11–14]. В теории износа все большее распространение получают комплексные параметры для оценки качества поверхности деталей машин, включающие в себя параметры как шероховатости, так и физико-механических свойств. Последним в данной работе уделено наибольшее внимание в силу их значимости на большинстве этапов жизненного цикла изделия, особенно в технологической подготовке процесса, контроле и испытании, эксплуатации и восстановительном ремонте.

На стадии проектирования, исходя из функционального назначения детали, задаются такие свойства поверхности, которые обеспечивали бы максимальную долговечность с минимальными затратами. В процессе технологической подготовки производства целесообразно использовать новейшие технологии формирования высокопрочных и износостойчивых поверхностных слоев деталей, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства, включая возможность их восстановления при ремонте. При этом необходимо учитывать также возможность управляемого формирования качества поверхности. Этим условиям в достаточной мере удовлетворяют технологии поверхностного лазерного модифицирования, такие как термоупрочнение, легирование и наплавка [15–17]. Их практическое применение, по сравнению с другими видами поверхностной обработки, позволяет обеспечить наиболее оптимальное значение комплексного параметра качества поверхности. Для оценки составляющих этого параметра используются разнообразные методы и средства контроля и испытаний. Однако большинство из них являются пассивными, констатирующими отдельные показатели свойств, например контактную жесткость, прочность, коррозионную стойкость и различные виды износостойкости [5; 18]. Кроме этого, их применение зачастую приводит к значительному отклонению и рассеиванию результатов исследования по одним и тем же изучаемым параметрам. Естественно, это говорит о необходимости создания более универсальных методик исследования физико-механических свойств гетерогенного поверхностного слоя деталей машин.

Для контроля и испытания модифицированного слоя необходимы надежные методы контроля качества поверхности на основе комплексного анализа основных физико-механических свойств и несущей способности. Фактически необходим унифицированный ме-

тод исследования, который обеспечил бы моделирование большинства параметров нагружения и условий работы поверхностного слоя, включая процесс его изнашивания.

В рамках исследования без учета влияния параметров шероховатости была предложена альтернативная методология испытания при одновременном изучении всех монослоев гетерогенной поверхности в процессе их изнашивания и дифференциальном анализе полученных экспериментальных данных [19]. При таком подходе становится возможным получить целый ряд экспериментальных данных о механизме износа каждого монослоя по отдельности и при комплексном исследовании. Кроме этого, становится возможным оценить целый ряд физико-механических свойств, таких как эрозионная и износостойкость, адгезионная и когезионная прочность, несущая способность, микротвердость и другие свойства поверхностного слоя.

В статье рассматриваются возможности предлагаемого подхода к формированию методологического базиса технологий микроуровневого анализа физико-механических свойств поверхностей металлов при их модификации.

Некоторые общие положения и развитие методики дифференциального анализа эрозионной стойкости модифицированных поверхностей. В основу предлагаемой методики положены процессы, происходящие в жидких средах при возбуждении в них ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Известно, что при этом большая часть процессов в жидкостях сопровождается явлениями ультразвуковой кавитации и акустическими течениями. Несмотря на недостаточную изученность кавитационных процессов [20; 21], использование предложенных методик позволило получить ряд объективных показателей, характеризующих как прочностные, так и трибологические свойства исследуемых поверхностей. Это стало возможным при микроуровневом подходе к изучению, используя в качестве исследуемого объекта микрошлиф, подвергнутый тем или иным видам поверхностной модификации. Данная методика применима также для изучения свойств различных покрытий и оценки влияния практически всех методов поверхностной обработки, а также для изучения композиционных материалов [22].

Одновременное, равномерное и дозированное гидродинамическое воздействие на исследуемую, в том числе многослойную структуру поверхности позволяет дифференцированно, на основе сравнительного анализа, получить объективную оценку эрозионной стойкости исследуемой зоны. Сопоставляя показатели стойкости с микроструктурой отдельных монослоев и их физико-механическими свойствами, становится возможным наглядно и объективно интерпретировать взаимовлияние исследуемых параметров.

На рис. 1 показана принципиальная схема экспериментальной установки для испытания на эрозионную стойкость.

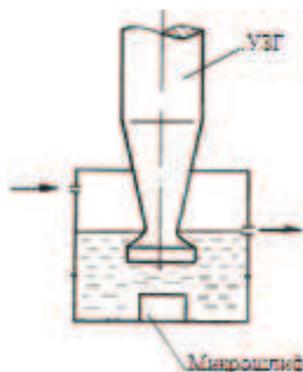


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Уникальность метода состоит в сравнительном анализе эрозионной стойкости поверхностных слоев исследуемого образца, включая эталонный, не подвергнутый обработке слой, например основы материала, в корреляционной связи с их структурными и фазовыми превращениями. Состояние поверхности объекта, подвергнутого какому-либо виду обработки, отражает реальную дифференциальную зависимость устойчивости к эрозионному (кавитационному) износу всех модифицированных и не подвергнутых обработке слоев, исследуемого образца в его поперечном сечении при одинаковых условиях внешнего воздействия. Полученные при анализе сравнительные данные об изменении параметров шероховатости и рельефа поверхности позволяют дать оценку таких важных показателей, как эрозионная стойкость, когезионная и адгезионная прочность и вместе с тем ее несущей способности. Кроме оценки этих параметров для металлов и сплавов, а также неметаллических материалов способ позволяет косвенно оценить характеристики различных структурных составляющих, межфазных границ, покрытий, элементов композиций, что не всегда возможно с применением традиционных способов.

Анализ исследуемых параметров осуществляется путем изучения профиля обработанной поверхности, исходя из сопоставления записанных профилограмм или оптическими методами. Их анализ позволяет не только дать качественную оценку стойкости исследуемых зон, но и количественно оценить прирост или снижение относительных показателей, таких как эрозионная стойкость ε по отношению к эталонному материалу (слою): $\varepsilon = \Delta h_3 / \Delta h_n$, где Δh_3 — глубина эрозионного износа слоя эталонной зоны образца; Δh_n — глубина износа исследуемой зоны. В качестве эталонной можно использовать показатели исходного материала, не подвергнутого какому-либо воздействию, одновременно сопоставляя показатели стойкости с микроструктурой исследуемых зон микрошлифа.

Предложенный способ [23] позволяет вести обработку в стоячих или близких к стоячим звуковых волнах, обеспечивающих равномерный износ исследуемой поверхности в широком диапазоне плотности звуковой мощности. Для интенсификации кавитационных процессов обработки целесообразно использование повышенного гидростатического давления.

Лабораторные испытания подтвердили перспективность данного метода.

В качестве ультразвукового генератора применялся магнитострикционный диспергатор УЗДЛ-1 с частотой колебаний 22 кГц. В качестве рабочей среды использовалась дистиллированная вода. Обработка полученных данных велась путем анализа записанных профилограмм исследуемой зоны. Полученные таким образом усредненные кривые профиля поверхности микрошлифов, изготовленных из стали ШХ15 и подвергнутых лазерному упрочнению, хорошо согласуются с кривой зависимости показателя микротвердости по глубине зоны термического влияния и исходного материала (рис. 2).

H, МПа

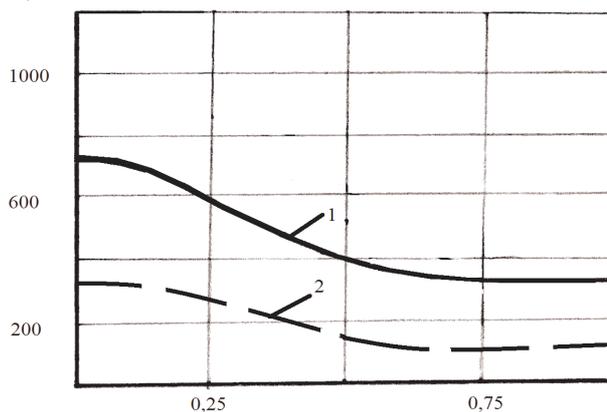


Рис. 2. Кривая 1 — зависимость микротвердости по глубине поверхностного слоя; кривая 2 — усредненная кривая профиля поверхности после эрозионной обработки, полученная с помощью профилографа

Аналогичные результаты исследований получены при испытании износостойкости этого материала, проведенные с использованием лабораторной трибологической установки, при послойном изнашивании образцов.

Целью предлагаемого исследования является разработка средств комплексного анализа физико-механических свойств гетерогенной поверхностной системы различных конструкционных материалов.

На основе предлагаемой концепции микро- и наноуровневого анализа были разработаны и защищены патентами РФ способы и методики исследования. Ниже приводятся их описание и возможные варианты реализации.

Особенности акустического гидроабразивного микроанализа износостойкости. Предлагаемая методика [24] в основном аналогична вышеизложенной и позволяет дополнительно моделировать процессы абразивного изнашивания. При определенных условиях она может быть адаптирована к комбинированному виду износа, т. е. эрозионно-абразивному воздействию на исследуемый объект. Это реализуется путем введения в зону обработки частиц абразивного материала однородного гранулометрического состава. При возбуждении ультразвуковых колебаний в жидкой среде частицы абразива переходят во взвешенное состояние и совершают колебательные движения между рабочей поверхностью ультразвукового излучателя и исследуемой поверхностью образца. Динамическое воздействие этих частиц имитирует абразивные трибологические

процессы, равномерно воздействуя на исследуемую поверхность микрошлифа.

В кавитационной области воздействия ультразвуковых колебаний происходит имитация эрозионно-абразивного износа, а в докавитационной — превалирует абразивный вид изнашивания. Частицы свободного абразива в суспензии, ударяясь с большой скоростью о поверхность твердого тела, существенно ускоряют процесс износа. При этом размеры частиц абразива должны быть соизмеримы с размерами исследуемых структурных составляющих объекта исследования. При совместном воздействии кавитации и гидроабразивного изнашивания размеры частиц, кроме этого, должны быть того же порядка, что и размеры кавитационных пузырьков.

Процессы кавитационно-механического воздействия на объект исследования еще более активизируются при повышенном гидростатическом давлении. Это обусловлено большим ростом интенсивности ударных волн от схлопывания кавитационных пузырьков [25], а также ростом их концентрации за счет образования дополнительных газовых микрополостей с введением в состав суспензии абразивных частиц, имеющих сложную геометрическую форму.

Качественная и количественная оценка параметров износостойкости исследуемых микрообъектов осуществляется по аналогии с методикой эрозионного износа, т. е. путем анализа профиля поверхности образца посредством записи профилограмм.

На рис. 3 а показаны кривая профиля поверхности микрошлифа, подвергнутого лазерной наплавке, и график зависимости микротвердости наплавленного и основного материала в поперечном сечении микрошлифа (кривая на рис. 3 б).

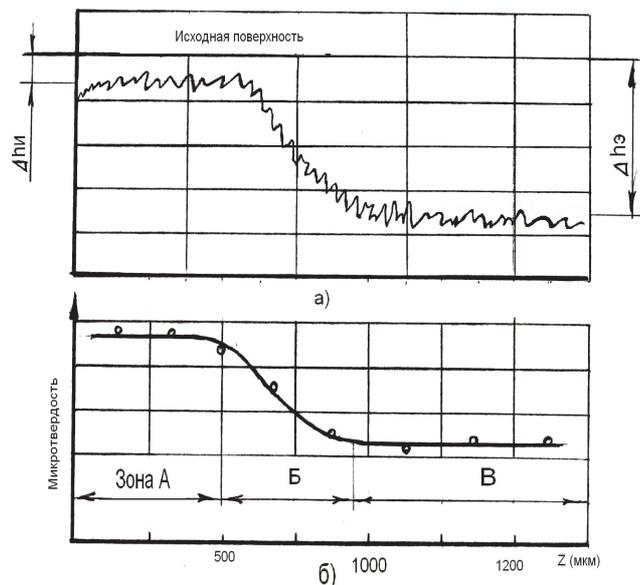


Рис. 3. Профилограмма поверхности микрошлифа — а; распределение микротвердости по глубине зоны термического влияния — б. Зона А — наплавленный слой; Б — зона перемешивания; В — исходный материал

Ультразвуковая гидроабразивная обработка образца осуществлялась на лабораторной установке (рис. 5) при избыточном давлении воздуха в рабочей камере 0,3

МПа. Кроме дистиллированной воды, в камеру помещали абразивный порошок однородного гранулометрического состава. В качестве исследуемого образца использовался микрошлиф с наплавленным с использованием лазерного излучения присадочным порошком ПГСР–2. Наплавка осуществлялась на лазерной технологической установке, по отработанной технологии.

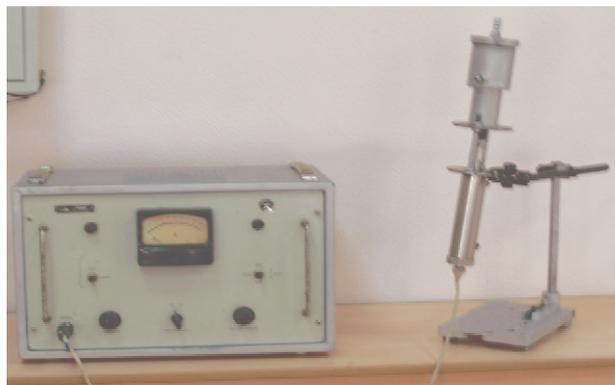


Рис. 4. Общий вид установки

Анализ полученной профилограммы и зависимости показателя микротвердости в зоне термического влияния (ЗТВ) свидетельствуют об увеличении износостойкости наплавленного слоя (зона А) по отношению к зоне перемешивания (зона Б) и исходного материала (зона В). Кривая профиля поверхности при этом практически дублирует кривую распределения твердости по глубине ЗТВ модифицированной поверхности.

Обращая внимание на параметры шероховатости поверхности на полученной профилограмме (рис. 3 а), отметим, что в зоне А средняя величина неровностей заметно ниже, чем в зоне Б, и еще ниже, чем в зоне В. Данная закономерность свидетельствует не только об увеличении износостойкости наплавленного слоя по отношению к расположенным ниже слоям ЗТВ, соизмеримой с их твердостью, но и об увеличении когезионной и, косвенно, стабильной адгезионной прочности монослоев в пределах ЗТВ. Данное заключение также нашло свое подтверждение в результатах трибологических испытаний, проведенных на лабораторных триботехнических установках [22]. Это свидетельствует о практической приемлемости предложенных методик исследования и актуальности предлагаемой концепции микроуровневого анализа прочностных и трибологических свойств модифицированных поверхностей.

Наряду с объективной оценкой износостойкости, данная методика исследования позволяет выявить корреляционную связь между такими важными свойствами и параметрами исследуемых материалов, как структурная неоднородность и твердость в пределах исследуемых зон.

Гидроабразивное определение микротвердости. Возвращаясь к анализу профилограмм поверхности микрошлифа (рис. 3 а) и учитывая неравнозначную шероховатость в различных зонах А, Б и В ЗТВ от воздействия ЛИ, можно говорить о предпосылках для использования этого наблюдения при определении показателя микротвердости. Данный факт можно отнести к сопутствующим явлениям, пригодным для использова-

ния в технике исследования физико-механических свойств микро- и нанообъектов.

Сущность метода [26] состоит в следующем. По аналогии с вышеизложенной методикой, в качестве исследуемого объекта используется микрошлиф или иной микрообъект с различными структурными составляющими, либо образцы с покрытиями или модифицированной поверхностью. Одна из структурных составляющих объекта исследования является эталонной, т. е. с известными параметрами микротвердости. Исследуемая поверхность образца подвергается размерной, гидроабразивной акустической обработке. Отпечатки на поверхности объекта получают за счет соударения твердых частиц абразива однородного гранулометрического состава и геометрической формы. Их размеры должны быть также соизмеримы с размерами исследуемого объекта. Энергия и частота соударения определяются мощностью и частотой ультразвукового излучателя. Однородное распределение звукового поля в рабочей зоне обеспечивает равномерность поверхностного воздействия твердых частиц на единицу площади. Время испытания зависит от концентрации частиц и ограничено количеством (плотностью) отпечатков, необходимых для расчета средней величины диаметра, площади или диагонали, в зависимости от формы частиц абразива (индентора).

Оценка показателя микротвердости определяется в относительных единицах путем вычисления среднего значения того или иного геометрического показателя отпечатка в исследуемой зоне к его величине в эталонной зоне. За эталонную принимается поверхность с известным показателем микротвердости, например зона исходного материала, лежащая вне ЗТВ при лазерном модифицировании. Предложенный способ был опробован в лабораторных условиях (рис. 6).

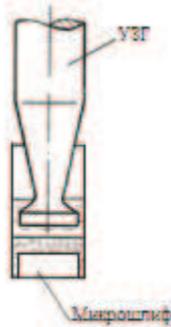


Рис. 5. Принципиальная схема лабораторной установки

В качестве рабочей среды использовалась двухфазная смесь — дистиллированная вода и абразив (кварцевый песок), который просеивался через набор сит с выделением однородных гранул. Затем абразив в течение 10 мин подвергался предварительной ультразвуковой обработке при максимальной мощности диспергатора. Такая обработка, в результате соударения частиц абразива друг о друга, придавала им форму, близкую к сферической, сглаживая при этом острые кромки и придавая им однородную форму. В качестве ультразвукового генератора был использован тот же магнито-стрикционный диспергатор УЗДЛ-1. Наружный диа-

метр микрошлифа соответствовал внутреннему диаметру кварцевой кюветы.

Проведенный лабораторный сравнительный анализ показателя микротвердости исходной зоны микрошлифа, термоупрочненной излучением лазера и предлагаемым способом, показал удовлетворительные результаты соответствия. Средняя величина отпечатка обработанной лазерным импульсом зоны, по сравнению с необработанной, изменилась соизмеримо изменению диагонали отпечатка, полученного при использовании микротвердомера ПМТ-3.

Таким образом, предложенный способ позволяет определять твердость различных структурных составляющих тонких покрытий и влияние различных видов обработки поверхности в относительных единицах.

Методика оценки эрозионной стойкости микро- и нанообъектов. Учитывая композиционное строение модифицированных гетерогенных поверхностей либо отдельных составляющих монослоя, очевидна актуальность изучения физико-механических свойств данных объектов. С этой целью, исходя из основных положений рассматриваемой концепции, была предложена альтернативная методика анализа микро- и нанообъектов, которая позволяет осуществлять контроль параметров в интересующих зонах, а также на границе раздела слоев и в мезослое [27].

На рис. 6 показана принципиальная схема экспериментальной лабораторной установки для исследования данных объектов. Она позволяет испытывать объемы, выделенные как из монослоя, так и из композиционного состава из двух и более слоев. Такая постановка эксперимента позволяет получить объективные данные исследуемого образца, равномерно воздействуя на него по всей несущей поверхности. Кроме показателей когезионной и эрозионной прочности, представляется возможным оценить адгезионные свойства отдельных монослоев, а также ряд физико-механических и триботехнических свойств композитов.

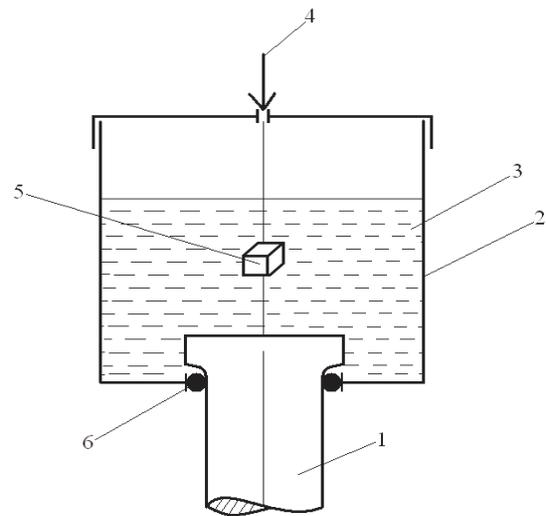


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментальной установки

Установка включает в себя ультразвуковой магнито-стрикционный излучатель 1, герметичную рабочую камеру 2 для визуального наблюдения, выполненную

из прозрачного пластикового материала, в которую помещается жидкость 3, в нашем случае — дистиллированная вода. Для имитации реальных условий, в которых может находиться исследуемый объект, допустимо использование других жидких сред, например, горюче-смазочных, коррозионных, химически активных и т. д.

В рабочую камеру для активизации процесса кавитации через штуцер 4 может нагнетаться сжатый воздух (возможно применение инертных газов, в зависимости от рабочей жидкости) при давлении 0,2...0,3 МПа. Исследуемый объект 5 изготавливался в виде куба или прямоугольной пластинки объемом 1...5 мм³ путем инструментального отделения от массивного образца.

Верхняя часть рабочей камеры герметизируется резьбовой крышкой, в которой имеется штуцер для подачи сжатого газа 4. После включения ультразвукового генератора его мощность увеличивается до уровня, когда образец переходит во взвешенное состояние (всплывает при визуальном наблюдении). Время испытаний устанавливается экспериментально, до появления видимых изменений формы и поверхности объекта.

Одна из граней объекта в нашем случае обрабатывалась излучением лазера с целью упрочнения либо наплавления с использованием ЛИ порошковым присадочным материалом, что позволяло проводить сравнительный анализ эрозии граней образца. Образец нужных размеров отрезался от заготовки электроискровым инструментом во избежание перегрева и изменения микроструктуры.

Качественная и количественная оценка стойкости производилась с помощью инструментальных методов измерения геометрических и весовых параметров образца, а также сравнительным анализом состояния граней, обработанных и не обработанных излучением лазера.

Лабораторные испытания и анализ полученных данных показали практическую приемлемость и хорошую сопоставимость исследуемых параметров.

Заключение

С учетом принципов предложенной концепции микроуровневого анализа физико-механических и трибологических свойств модифицированных поверхностей становится возможным проведение целого комплекса исследований. Основными этапами являются металлографический анализ и изучение микроструктуры модифицированной гетерогенной поверхности, а также оценка их реальной взаимосвязи с физико-механическими свойствами монослоев исследуемой зоны материала.

Последовательный комплексный анализ исследуемых параметров позволяет выявить влияние этих факторов на целый ряд таких важных показателей, как эрозийная и износостойкость, адгезионная и когезионная прочность, а также несущая способность модифицированной тем или иным способом поверхности материала. При исследовании всего лишь одного микрошлифа можно получить целый ряд важных структурных, физико-механических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев материала, что дает представление

о картине их взаимовлияния.

Предлагаемые методики позволяют не только сократить время на проведение подготовительных и экспериментальных работ, но и значительно повысить достоверность, объем и качественный состав полученных данных. При этом испытания могут осуществляться в различных жидких средах, имитируя разнообразные условия смазки и влияние коррозионных сред. Полученные результаты исследований дают основание для продолжения работ по совершенствованию методик и расширению сферы их использования при изучении различных покрытий, композиционных материалов, минералов, а также биологических объектов в медицине.

Литература

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.М. Дальского, А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2001. Т. 1. 856 с.
3. Качество машин: справочник. В 2 т. / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. Т.1. 256 с.
4. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
5. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
6. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
7. Сосновский Л.А., Махутов Н.А. Трибофатика: износостойкие повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин. В 2 т. М.; Гомель: ФЦНТП «Безопасность»: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2000. Т. 2. 304 с.
8. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 528 с.
9. Waters K.T. Production methods of cold working joint subjected for improvement of fatigue strength. Symposium in Fatigue of Aircraft Structures, ASTM Special Technical Publication. 1959. № 274. P. 99-111.
10. Sosnovskiy L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). Springer, 2004. 424 p.
11. Сосновский Л.А. Основы трибофатики. В 2 т. Гомель: БелГУТ, 2003. Т. 1. 246 с.
12. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.
13. Proc. Of III Intern Simposium on Tribo-Fatigue (ISTF 2000:Oct. 22-26, 2000. Beijing, china). Ed. By Gao Wanzhen and Li Jifn.-Hunan University Press, China, 2000. 653 p.
14. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под ред. А.Г. Суслова, М.: Машиностроение, 2005. 444 с.
15. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф., Подчерняева И.А. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. М.: Наука, 1986. 276 с.
16. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
17. Luft U., Bergmann H.W., Mordike B.L. Laser surface melting of aluminium alloys // Fachber. Metallbearb.1987. Vol. 64, № 2. P. 173-178.
18. Хейфец М.А. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. Полоцк: ПГУ, 2001. 156 с.

19. Шастин В.И., Коновалов Н.П. Микроанализ износостойкости поверхностных слоев материалов // Современные концепции научных исследований. 2015. № 4 (13). С. 28-30.

20. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. С. 266.

21. Rudenko M.G. On the possibility of thermodynamic equilibrium in the cavitation bubbles // EPJ Web of Conferences, 2015. Vol. 82. (Thermophysical Basis of Energy Technologies, Tomsk, Russia, October 15–17, 2014).

22. Шастин В.И. Ультразвуковой метод микроанализа эрозионной стойкости конструкционных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (24). С. 180-183.

23. Шастин В.И., Горовой А.М. Патент РФ. Способ определения кавитационной износостойкости: пат. 2359245 Рос. Федерация. № 2007134795; приоритет 18.09.2007; зарег. 20.06.2009.

24. Шастин В.И., Горовой А.М. Способ микроанализа износостойкости твердых материалов: пат. 2549895 Рос. Федерация. № 2007134796; приоритет 18.09.07; зарег. 20.03.09.

25. Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швевла Ш. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

26. Шастин В.И. Елисеев С.В., Сливинская Л.П., Коронатова И.П., Сигачев А.Л. Способ определения микротвердости: пат. 2465569 Рос. Федерация. № 2010137433; приоритет 08.09.10; зарег. 27.10.12.

27. Шастин В.И., Кострицкий И.Ю., Вязьмин А.Я. Способ определения эрозионной стойкости твердых микро- и нанообъектов. САПЭУ. № 2568167; приоритет 24 дек. 2013г.; зарег. 14 окт. 2015 г.

References

1. Suslov A.G. Quality of surface layer of machines details. M.: Mashinostroenie, 2000. 320 p.

2. Handbook of engineer-machine builder. In 2 v. V. 1 / pod red. A.G. Kosilovoi, R.K. Meshcheryakova, A.M. Dal'skogo, A.G. Suslova. M.: Mashinostroenie, 2001. T. 1. 856 p.

3. Quality of machines: handbook. In 2 v. V. 1 / pod red. A.G. Suslova. M.: Mashinostroenie, 1995. T. 1. 256 p.

4. Kragel'skii I.V. Friction and wear. M.: Mashinostroenie, 1968. 480 p.

5. Engineering details surfaces / pod red. A.G. Suslova. M.: Mashinostroenie, 2008. 320 p.

6. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. Surface layer and operational properties of machines details. M.: Mashinostroenie, 1988. 240 p.

7. Sosnovskii L.A., Makhutov N.A. Tribo-Fatigue: wear-fatigue damages in problems of resource and safety of machines. V 2 t. M.; Gomel': FTsNTP «Bezopasnost'»: NPO «TRIBOFA-TIKA», 2000. T. 2. 304 p.

8. Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Bases of estimations on friction and wear. M.: Mashinostroenie, 1977. 528 p.

9. Waters K.T. Production methods of cold working joint subjected for improvement of fatigue strength. Symposium jn Fatigue

jf Aircraft Structures, ASTM Special Technical Publication. 1959. № 74. P. 99-111.

10. Sosnovskiy L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). Springer, 2004. 424 p.

11. Sosnovskii L.A. Bases of Tribo-Fatigue. V 2 t. Gomel': BelGUT, 2003. T. 1. 246 p.

12. Makhutov N.A. Strength and safety: fundamental and applied researches. Novosibirsk: Nauka, 2008. 528 p.

13. Proc. Of III Intern Simposium on Tribo-Fatigue (ISTF 2000: Oct. 22-26, 2000. Beijing, China). Ed. By Gao Wanzhen and Li Jifn.-Hunan University Press, China, 2000. 653 p.

14. Technological provision and rise of operational properties of details and them connecting / pod red. A.G. Suslova, M.: Mashinostroenie, 2005. 444 p.

15. Kovalenko V.S., Verkhoturov A.D., Golovko L.F., Podchernyaeva I.A. Laser and electroerosion hardening of materials. M.: Nauka, 1986. 276 p.

16. Grigor'yants A.G. Bases of laser proceeding of materials. M.: Mashinostroenie, 1989. 304 p.

17. Luft U., Bergmann H.W., Mordike B.L. Laser surface melting of aluminium alloys // Fachber. Metallbearb, 1987. Vol. 64, № 2. P. 173-178.

18. Kheifets M.A. Formation of properties of materials at stratified synthesis of details. Polotsk: PGU, 2001. 156 p.

19. Shastin V.I., Konvalov N.P. Microanalysis of wear resistance of surface layers of materials // Sovremennyye kontseptsii nauchnykh issledovaniy. 2015. № 4 (13). P. 28-30.

20. Powerful ultrasonic fields / pod red. L.D. Rozenberga. M.: Nauka, 1968. P. 266.

21. Rudenko M.G. On the possibility of thermodynamic equilibrium in the cavitation bubbles // EPJ Web of Conferences, 2015. Vol. 82. (Thermophysical Basis of Energy Technologies, Tomsk, Russia, October 15-17, 2014).

22. Shastin V.I. Ultrasonic method of microanalysis of erosion behavior of structural materials // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2009. № 3 (24). P. 180-183.

23. Shastin V.I., Gorovoi A.M. Patent RF. Patent of RF. Technique of identification of cavitation wear resistance: pat. 2359245 Ros. Federatsiya. № 2007134795; prioritet 18.09. 2007; zareg. 20.06.2009.

24. Shastin V.I., Gorovoi A.M. Technique of microanalysis of wear resistance of solid materials: pat. 2549895 Ros. Federatsiya. № 2007134796; prioritet 18.09.07; zareg. 20.03.09.

25. Abramov O.V., Khorbenko I.G., Shveгла Sh. Ultrasonic processing of materials. M.: Mashinostroenie, 1984. 280 p.

26. Shastin V.I. Eliseev S.V., Slivinskaya L.P., Koronatova I.P., Sigachev A.L. Technique of identification of microhardness: pat. 2465569 Ros. Federatsiya. № 2010137433; prioritet 08.09.10; zareg. 27.10.12.

27. Shastin V.I., Kostritskii I.Yu., Vyaz'min A.Ya. Technique of identification of erosion behavior of solid micro- and nanoobjects. SAPEU. № 2568167; prioritet 24 dek. 2013 g.; zareg. 14 okt. 2015 g.