

И.В. Парсаданов, д.т.н., профессор, каф. «ДВС» НТУ «ХПИ», г. Харьков.
С.А. Кравченко, к.т.н., ст.научн.сотр. каф. «ДВС» НТУ «ХПИ», г. Харьков.
Н.А. Ткачук, д.т.н., профессор, зав. каф. «ТММиСАПР» НТУ «ХПИ», г. Харьков.
В. Н. Шеремет, аспирант каф. ТММиСАПР, НТУ «ХПИ», г. Харьков.

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Введение

Современные машины работают в условиях интенсивных механических нагрузок, что приводит к выходу из строя наиболее нагруженных деталей. Долговечность и надёжность работы этих деталей во многом определяется надёжностью работы поверхностей трения. Практика эксплуатации транспортных средств показывает, что выход их из строя происходит в 80 случаях из 100 именно по этой причине [1, 2].

Для повышения износостойкости рабочих поверхностей используют различные способы поверхностного упрочнения. Наряду с традиционными методами химико-термической обработки высоконагруженных поверхностей трения, электролитических покрытий, различных видов наплавки применяются новые технологии с высокой концентрацией энергии: ионноплазменные методы, лазерное упрочнение, детонационное напыление. Каждый из вышеупомянутых методов нанесения износостойких покрытий и упрочнения поверхности имеет свои достоинства, но у них у всех есть несколько общих недостатков:

- высокая стоимость технологического оборудования;
- большие капитальные вложения для организации производственных участков и изготовления технологической оснастки;
- сложность управления процессом нанесения износостойких покрытий;
- упрочняющие способы и традиционные методы нанесения износостойких покрытий, в большинстве своём, не обеспечивают требуемого уровня повышения износостойкости и усталостной прочности деталей одновременно;
- высокая энергоёмкость;
- наличие технологического концентратора напряжений [3, 4, 5].

Наиболее распространённым видом силовых установок транспортных средств являются двигатели внутреннего сгорания. Работая в жёстких условиях эксплуатации с частыми пусками и остановками, в условиях зимних и летних перепадов температур, трущиеся детали двигателей периодически попадают в условия сухого и полусухого трения, что в итоге приводит к повышенным износам трущихся поверхностей. Одной из наиболее трудоёмких и дорогостоящих деталей двигателя работающих в таких жестких условиях является коленчатый вал. В эксплуатации энергетических установок, оснащённых среднеоборотными двигателями применяется два вида ремонта коленчатых валов. В первом случае применяется перешлифовка коренных и шатунных шеек на ближайший ремонтный размер. Конструкторской документацией завода-изготовителя предусмотрено несколько ремонтных градаций, отличающихся одна от другой на 0,25 – 0,5 мм. Как показала практика эксплуатации и ремонта коленчатых валов, начиная уже со второго ремонтного размера при перешлифовке коренных и шатунных шеек на их рабочей поверхности практически отсутствует упрочнённый слой, что впоследствии ведёт к резкому износу пары шейка-вкладыш и резко сокращает ресурс двигателя [6]. Для устранения этого дефекта рекомендуется применять закалку ТВЧ или повторное азотирование. Исследования восстановленных таким способом коленчатых валов показали, что при закалке токами высокой частоты наряду с высокой энергоёмкостью наблюдается обезуглероживание приповерхностного слоя, снижение усталостной прочности, наличие технологического концентратора напряжений, коробление, снижение ремонтпригодности. При

повторном азотировании, наряду с высокой энергоёмкостью и технологической сложностью процесса, происходит ещё и разрушение основного материала коленчатого вала [7].

Во втором случае для восстановления размера коренных и шатунных шеек на их рабочую поверхность наносят слой металла с последующей обработкой в нужный размер. При ремонте коленчатых валов применяются газотермические методы нанесения покрытий: - электродуговая металлизация, газоплазменное, детонационное и плазменное напыление, электролитические (хромирование и железнение). Необходимо учитывать, что все газотермические способы нанесения покрытий не исключают коробления восстанавливаемого коленчатого вала. В настоящее время широкое применение при восстановлении рабочих поверхностей шеек коленчатых валов получило железнение. Несмотря на относительную технологическую простоту получения этого покрытия и ряд положительных свойств, недостатками процесса железнения является то, что покрытия, полученные этим методом очень чувствительны к изменению скорости скольжения поверхностей трения. Так, повышение скорости до 3 м/с вызывает рост коэффициента трения до 0,25 и температуры околосредоточной зоны до 200 °С и выше. Дальнейший рост скорости скольжения приводит к росту температур и к схватыванию поверхностей трения [8]. Таким образом, используемые при ремонте коленчатых валов известные технологии упрочнения и нанесения износостойких покрытий не позволяют получить удовлетворительные характеристики трибосистем с приемлемыми технологичностью, ремонтпригодностью и экономичностью процесса.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что наиболее приемлемой технологией восстановления работоспособности коренных и шатунных шеек коленчатых валов является технология, разработанная на базе электроискрового метода: - технология электроискрового упрочнения.

Постановка задачи и анализ путей решения

В ходе исследований рассматривалось решение двух типов задач. Во-первых, это лабораторно-технологическое обоснование технологии электроискрового упрочнения. Во-вторых, это численное моделирование напряженно-деформированного состояния фрагментов упрочненных таким способом деталей.

Совместный анализ результатов этих двух исследований даёт основу для научного обоснования параметров предлагаемого технологического процесса.

Как уже отмечалось, одной из наиболее напряжённых и сложных в конструктивном отношении деталей двигателя является коленчатый вал. Основной причиной ухудшения технического состояния коленчатого вала является повышенный износ трибосистемы шейки коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения. При износе шеек коленчатых валов увеличивается зазор между шейкой коленчатого вала и вкладышем подшипника скольжения. Это в свою очередь приводит к снижению давления масла и, по мере расширения зазора, – к возрастанию динамических нагрузок, которые постепенно приобретают ударный характер. В результате существенно повышается износ поршневых пальцев, верхних головок шатуна, поршня и т. д.

Неравномерный износ коренных и шатунных шеек коленчатого вала по его длине приводит к образованию завышенной ступенчатости между смежными шейками, что приводит к увеличению изгибающих нагрузок на коленчатый вал и может быть причиной его поломки.

Таким образом, долговечность и ресурс работы коленчатых валов определяются двумя параметрами – усталостной прочностью и износостойкостью. Если вопрос повышения усталостной прочности коленчатого вала и, в общем, всех элементов трибосистем двигателя решается в основном на стадии его проектирования, то износостойкость деталей в целом зависит от многих факторов, начиная с конструкции коленчатого вала, методов упрочнения коренных и шатунных шеек и заканчивая режимами работы двигателя и качеством применяемых смазочных материалов.

В ходе исследования было проанализировано несколько наиболее распространённых методов упрочнения трущихся поверхностей [5]. Общим и наиболее существенным их недостатком является то, что все они сводятся к повышению лишь твёрдости материала

поверхностного слоя детали, а, как известно, прямая зависимость между износостойкостью и твёрдостью отсутствует. Твёрдость не может однозначно характеризовать износостойкость материала, как известно, на неё оказывают влияние и другие характеристики механических свойств, например, пластичность и ударная вязкость.

Это объясняет тот факт, что ресурс двигателей до отправки в капитальный ремонт в реальных условиях эксплуатации оказывается существенно ниже нормативного.

Целью исследования, является обоснование и последующее внедрение в производство новых комплексных энергосберегающих технологий изготовления и ремонта высоконагруженных деталей машин и механизмов транспортных средств на базе технологий дискретного упрочнения.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- дана экспериментальная оценка повышения ресурса, ремонтпригодности и работоспособности трибосистемы шейки коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения после дискретного упрочнения;

- проведены теоретические исследования и обоснован новый способ упрочнения трущихся поверхностей деталей методом дискретного упрочнения, как альтернатива наиболее распространённым стандартным технологиям нормализации, закалки ТВЧ, азотированию и др.

Решение поставленных задач нуждаются также в обосновании с точки зрения распределения компонент напряженно-деформированного состояния дискретно упрочнённых деталей.

Результаты исследования триботехнических характеристик

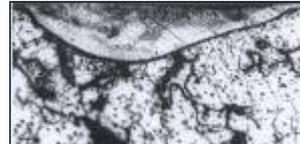
Предложенная технология дискретного упрочнения высоконагруженных трущихся поверхностей деталей при существенном повышении твёрдости приповерхностного слоя не оказывает влияния на его пластичность. Суть технологии состоит в том, что на поверхность детали электроискровым способом с электрода, выполненного из легирующего материала, на катод (поверхность детали) переносятся легирующие частицы в виде островков или линий всевозможной конфигурации, которые при попадании на поверхность быстро остывают, что приводит к появлению каверн (углублений) [6]. В дальнейшем при шлифовании детали имеющиеся макро- и микродефекты удаляются, что исключает возможность появления концентраторов напряжений и улучшает качество поверхности.

Комплексный анализ результатов металлографического и микрорентгеноспектрального исследования образцов свидетельствует о том, что метод дискретного упрочнения повышает физико-механические свойства поверхностных слоёв стали и чугуна. На поверхности детали после дискретного упрочнения возникают зоны, которые резко отличаются от основного материала. Условно их можно назвать «белым» слоем, толщина которого составляет 200 – 400 мкм, а микротвёрдость превышает микротвёрдость основного материала и находится в пределах 500 – 1000 МПа.

Данные фазового, микрорентгеноспектрального и металлографического анализа дают возможность утверждать, что «белым» слоем является смесь материалов электрода и образца, которые перемешались в момент разряда (в пламени дуги), а потом кристаллизовались при охлаждении с большой скоростью (рис. 1) [1 – 7].

Экспериментальные исследования показали, что дискретное упрочнение образцов выполненных из высокопрочного чугуна, обеспечивает повышение их износостойкости в 8 – 10 раз по сравнению со стандартной технологией нормализации и в 1,3 – 1,5 раза по сравнению с технологией закалки ТВЧ, а стальных образцов в 1,6 – 3,5 раза по сравнению с азотированием. Одновременно как у чугунного, так и у стальных образцов улучшаются приработочные характеристики поверхностей, повышается износостойкость, снижаются коэффициент трения (рис. 2) [1 – 7].

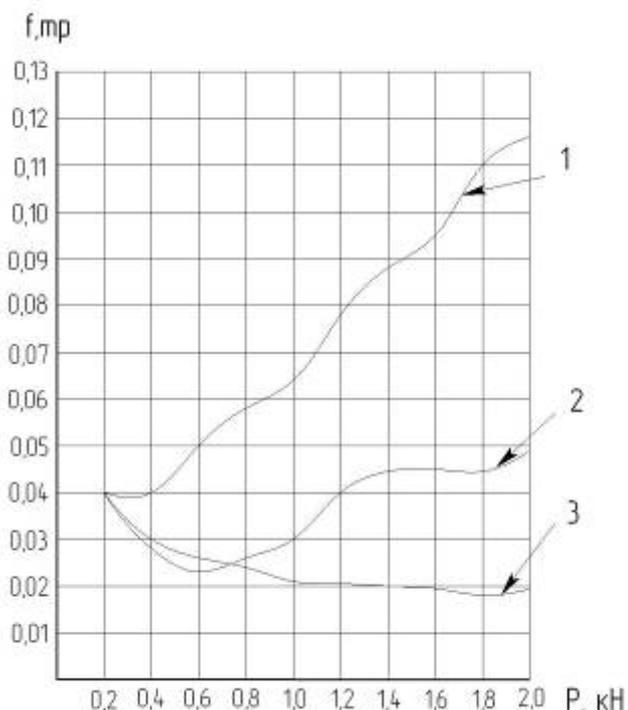
Рисунок 1. Упрочнённые зоны:
а – чугунные образцы; в –
стальные образцы (x 100)



а

в

Рисунок 2. Зависимость коэффициента трения от нагрузки:
 1 – образцы серии 1 (нормализация); 2 – образцы серии 2 (закалка ТВЧ);
 3 – образцы серии 3 (дискретное упрочнение)



Одним из основных преимуществ разработанной технологии является то, что при нанесении дискретного упрочнения поверхность детали не подвергается большим температурным нагрузкам. Это позволяет при изготовлении коленчатых валов упрочнение коренных и шатунных шеек производить на последних операциях, а при ремонтах осуществлять повторное упрочнение восстановленной поверхности без опасности потери её геометрии или механических свойств.

В настоящее время технология дискретного упрочнения деталей находит широкое применение на многих предприятиях Украины. На ГП «Завод им. В.А. Малышева» упрочняются коренные и шатунные шейки коленчатых валов двигателей типа Д80, которые успешно эксплуатируются на предприятиях «Укрзалізниці». На ОАО «Изюмский тепловозремонтный завод» технология дискретного упрочнения применяется при ремонте коленчатых валов двигателей типа Д49. При поступлении двигателя 5Д49 на капитальный ремонт установлено, что после шлифовки шеек коленчатого вала под второй ремонтный размер, а иногда и первый ремонтный размер, практически отсутствует упрочнённый (азотированный) слой. Поэтому для продления срока эксплуатации двигателя 5Д49 возникла необходимость повторного восстановления упрочнённого слоя трущихся поверхностей коренных и шатунных шеек [1 – 7].

Пробег тепловозов после ремонта двигателей с применением технологии дискретного упрочнения коренных и шатунных шеек коленчатых валов в настоящее время составляет 270 – 780 тыс. км, и все они находятся в эксплуатации, хотя гарантийный пробег после ремонта коленчатого вала по нормативно-технической документации составляет 240 тыс. км.

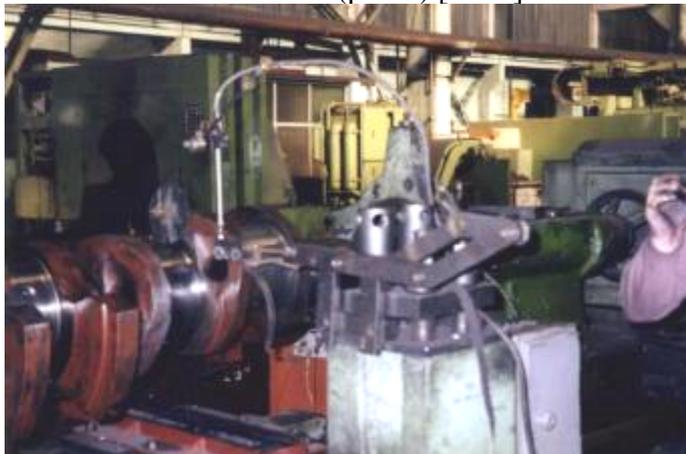
Таким образом, как показали результаты многолетней эксплуатации отремонтированных коленчатых валов двигателей типа Д49, их ресурс практически восстановлен и не уступает ресурсу новых двигателей.

Преимущество технологии дискретного упрочнения деталей двигателей является и то, что оборудование достаточно компактно и не требует дополнительных производственных площадей. Система регулирования и управления процессом обеспечивает стабильность режима упрочнения по всей поверхности детали, увеличивает или уменьшает кавернообразование на поверхности детали, что автоматически приводит к изменению глубины макролигированного слоя и припуска под его механическую обработку. Одновременно с этим регулируется диапазон

разрядного тока (U_p) до 350 А. Так, при изготовлении или ремонте коленчатых валов двигателей упрочнение коренных и шатунных шеек выполняется на токарном станке. Для этого разработана технологическая оснастка, позволяющая выполнять операцию с одной установки. На суппорт станка устанавливается специальная штанга на которой крепится электрододержатель. Упрочнение шатунных шеек выполняется при наличии специального приспособления, которое позволяет производить смещение вала на величину радиуса кривошипа.

Размещение оборудования по упрочнению шеек коленчатого вала, которое эксплуатируется на ГП «Завод им. В.А. Малышева» показано на (рис 3) [1 – 7].

Рисунок 3. Оборудование нанесения дискретного упрочнения



Кроме выше названных, предприятий проведены производственные испытания двигателей транспортных средств, детали которых были упрочнены методом дискретного упрочнения на ОАО «Харьковский завод тракторных самоходных шасси» при ремонте коленчатых валов двигателей Д120, заводах Министерства обороны Украины и угольной промышленности.

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния дискретно упрочненных деталей машин

Рассмотрение триботехнических свойств дискретно упрочненных деталей в лабораторных и производственных условиях, требует анализа их прочностных и жесткостных характеристик с помощью аналитических или численных методов.

Аналитические методы вследствие сложности исследуемого объекта трудноприменимы, и поэтому было предложено использовать для этих целей метод конечных элементов (МКЭ) [3, 4].

Некоторые аспекты решаемой задачи исследования напряженно-деформированного состояния дискретно упрочненных деталей описаны в работах [3, 4]. В то же время более тщательного изучения требуют вопросы перераспределения контактных нагрузок и изменения профиля первоначально плоской или цилиндрической поверхности, упрочненной предложенным способом. Именно этот аспект и был предложен в работе.

Рассматривались две задачи: 1) о действии на поверхность фрагмента дискретно упрочненной детали равномерно распределенного давления $P = 100$ МПа; 2) о контактном взаимодействии дискретно упрочненной детали с неупрочненной.

Материал зоны дискретного упрочнения имеет модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², материал основы – $1,1 \cdot 10^{11}$ Н/м². Размеры зоны дискретного упрочнения в плане – 0,8 мм. Глубина фрагмента деталей 5 мм. На рис. 4 – расчетные схемы для задачи 1), на рис. 5 – для – 2). На упрочненной поверхности (и в случае 1), и в случае 2)) выделены 5 путей (см. рис. 4), по которым в дальнейшем исследуется профиль деформированной поверхности (рис. 6, 7). Кроме того, на рис. 8 – 10 приведены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, а также – для случая 2) – контактные давления.

Геометрическая модель (1/4 с учетом симметрии): на верхнюю грань детали действует равномерно распределенное давление

Конечно-элементная модель – 225 тыс. эл., симметрия на всех вертикальных плоскостях

Рисунок 4. – Расчетные схемы для задачи анализа НДС фрагмента детали с зоной дискретного упрочнения при действии на поверхность распределенного давления $p=100\text{MPa}$

Геометрическая модель (1/4 с учетом симметрии): на неконтактирующую горизонтальную грань детали действует равномерно распределенное давление

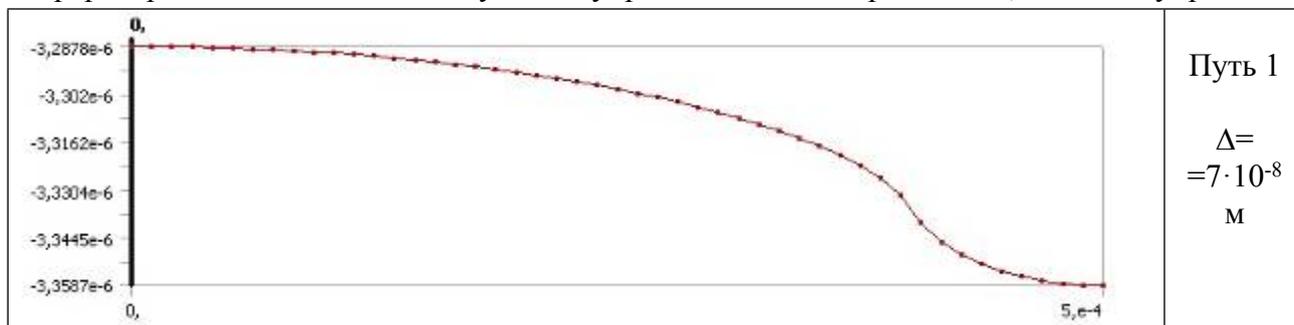
Конечно-элементная модель – 380 тыс. эл., симметрия на всех вертикальных плоскостях, по горизонтальной грани сопряжения – контактные условия

Рисунок 5. – Расчетные схемы для задачи анализа НДС фрагмента детали с зоной дискретного упрочнения при контактировании с сопряженной деталью, на поверхность которой действует равномерно распределенное давление $p=100\text{MPa}$

Анализ полученных распределений дает основание для следующих выводов.

1. Первоначально прямолинейная поверхность дискретно упрочненных деталей при нагружении приобретает бугристый профиль – проявляется так называемый « Δ – эффект» [3,4]. При этом учет контактного взаимодействия приводит к двукратному уменьшению Δ – бугристости, хотя характер ее остается таким же.

2. При контакте дискретно упрочненной детали с неупрочненной происходит резкое перераспределение давлений: на участке упрочнения они в 2 раза выше, чем на неупрочненном.



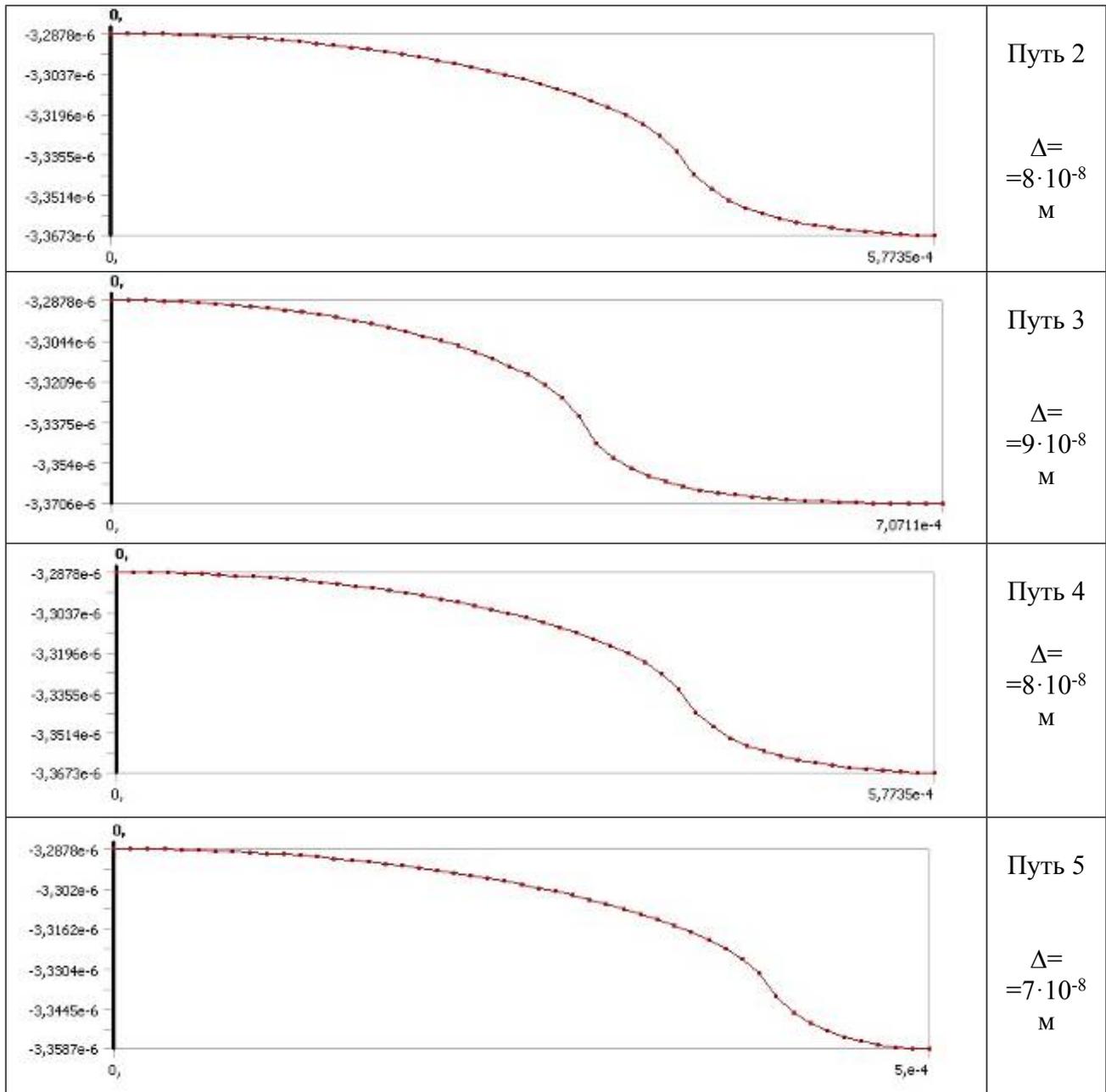
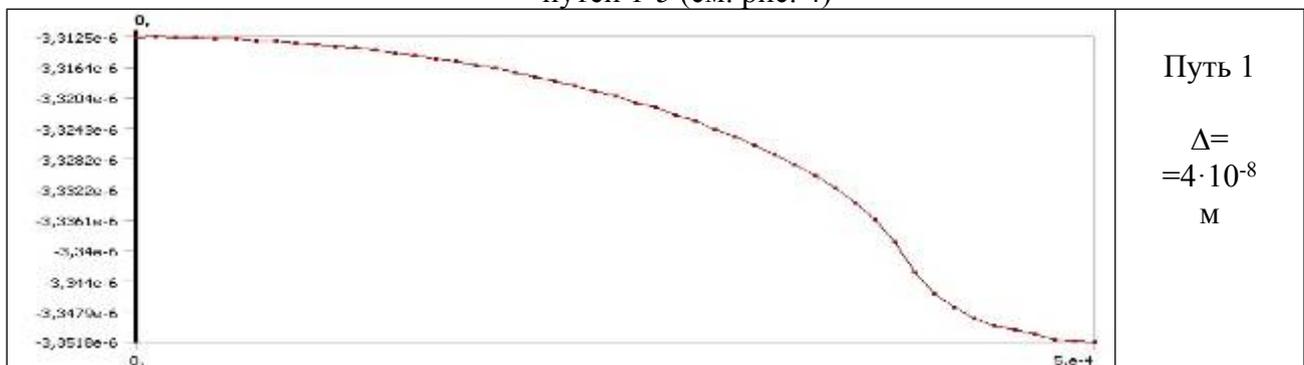


Рисунок 6. Распределение профилей деформированной поверхности (задача 1)) вдоль путей 1-5 (см. рис. 4)



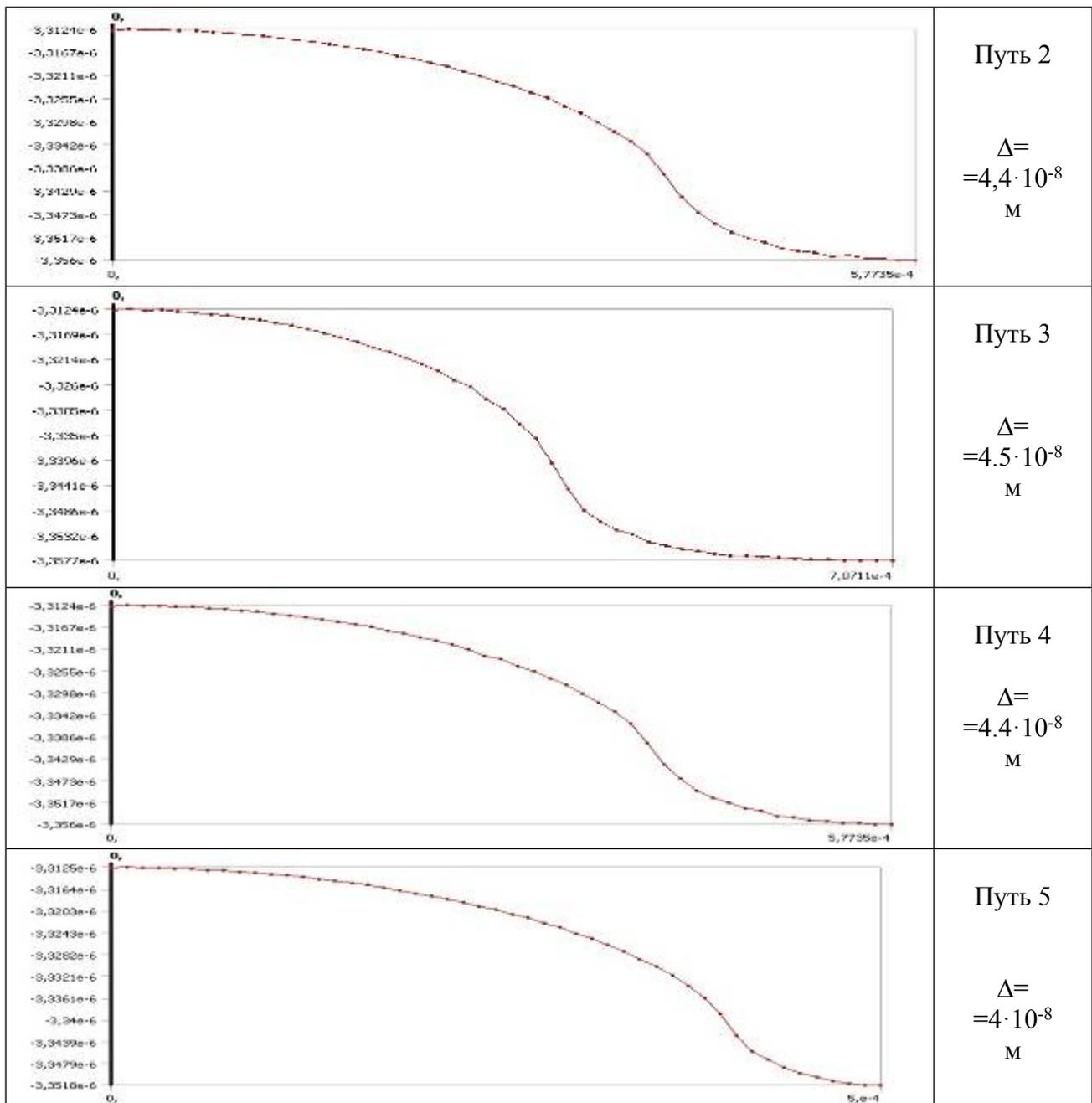


Рисунок 7. Распределение профилей деформированной поверхности (задача 2)) вдоль путей 1-5 (см. рис. 4)

3. Наличие зон дискретного упрочнения приводит к росту напряжений в них более чем в два раза по сравнению с неупрочненной деталью. Однако нужно учесть, что материал этих зон более прочен, и, соответственно, общий уровень прочности не ухудшается.



Рисунок 8. Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (задача 1))

Рисунок 9. Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (задача 2))

Рисунок 10. Распределение
контактных давлений
(задача 2))

Выводы

Ресурс деталей узлов и агрегатов, работающих в условиях больших динамических нагрузок, в основном определяется износом их рабочих поверхностей.

Широко распространённые способы повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей только за счёт увеличения их твёрдости не решают проблемы увеличения их моторесурса, а при их ремонте восстановление твёрдости трущихся поверхностей практически невозможно так как это требует высокого температурного воздействия на деталь, что ведёт к существенному снижению усталостной прочности и потере геометрии.

Предложенная технология дискретного упрочнения трущихся поверхностей высоконагруженных деталей не требует сложного специального оборудования и дополнительных производственных площадей. Восстанавливаемые детали не подвергаются большим термическим нагрузкам, что позволяет использовать их при восстановлении твёрдости трущихся поверхностей и снижает их коэффициент трения.

Упрочнённая зона состоит из «белого» слоя с повышенной твёрдостью HRC 50 – 60 единиц при твёрдости сердцевины HRC 20 – 30 единиц и подслоя зоны с изменённым химическим составом и промежуточным (между «белым» слоем и сердцевиной образца) значением твёрдости.

Дискретное упрочнение приводит к образованию бугристого профиля при нагружении деталей. Этим самым улучшаются условия работы пары сопряженных деталей. При этом данный «Δ – эффект» тем больше, чем выше нагрузка.

Таким образом, применение технологии дискретного упрочнения при изготовлении и ремонте поверхностей трения деталей транспортных средств позволяет существенно повысить их ресурс и снизить затраты на проведение внеочередных ремонтов.

Литература

1. Под ред. Чичинадзе А.В. Основы трибологии. Трение, износ, смазка. М., Центр «Науки и техники». 1995.- С. 400.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1989. – С. 328.: ил.
3. Шеремет В.Н. Повышение ресурса тяжело нагруженных элементов ДВС путём дискретного упрочнения деталей. Моделирование напряженно-деформированного состояния. / В.Н. Шеремет, Н.А. Ткачук, В.Г. Гончаров // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. - №2. – С. 118- 123.
4. Посвятенко Е.К. Підвищення ресурсу тепловозів на базі технології дискретного зміцнення деталей форсованих дизелів / Е.К. Посвятенко, В.Г. Гончаров, С.С. Д'яченко, М.А. Ткачук // Сучасні технології в машинобудуванні. Зб. Наукових праць. – Харків: НТУ «ХП», 2010. Вип. №5. – С. 60-75.
5. Гончаров В.Г. Повышение надёжности деталей двигателя методом дискретного упрочнения / С.А. Кравченко, В.Г. Гончаров // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. - №1. – С. 97- 99.
6. Тартаковский Э.Д. Анализ эффективности существующих методов ремонта коленчатых валов дизеля 5Д49 / Э.Д. Тартаковский, В.Г. Гончаров, В.М. Сапожников // Зб. Наукових праць. – Харків: УДАЗТ, - 2009. Вип. №107. – С. 71-79.
7. Дьяченко С.С. Исследование ремонтпригодности тепловозного коленчатого вала / С.С. Дьяченко, Б.В. Савченков, В.Г. Гончаров, И.В. Понамаренко, С.И. Аксёнова, В.М. Сапожников // Локомотив-информ. – 2007. август.- С. 16-17.
8. Долговечность трущихся деталей машин. Сб. статей. Выпуск №2. – М.: Машиностроение. 1987. – С. 304.

Анотації

У роботі описана розробка науково-технічних основ підвищення ресурсу та забезпечення високої надійності, довговічності і технічних характеристик форсованих двигунів військової і цивільної техніки за рахунок дискретного способу зміцнення. Досліджено напружено-деформований стан зміцнених деталей.

В работе описана разработка научно-технических основ повышения ресурса и обеспечения высокой надежности, долговечности и технических характеристик форсированных двигателей военной и гражданской техники за счет дискретного способа упрочнения. Исследовано напряженно-деформированное состояние упрочненных деталей.

In the paper it is described the development of scientific and technical bases of increase of resource and providing of high reliability, longevity and technical descriptions of the forced engines of military and civil technique due to the discrete method of work-hardening. The stress-strained state of strengthened details is investigational.

Ключевые слова:

Дискретне зміцнення, напружено-деформований стан, ресурс

Дискретное упрочнение, напряженно-деформированное состояние, ресурс

Discrete work-hardening, stress-strained state, resource