

Н. А. Ткачук, О. В. Веретельник, А. В. Грабовский, С. А. Кравченко, С. Ю. Белик

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВС, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*В работе описан общий подход и решение актуальной задачи совершенствования математических и численных моделей для исследования НДС и условий контактного взаимодействия элементов машиностроительных конструкций с учетом наличия тонкого слоя оксидированного материала и дискретного упрочнения поверхности ответной детали. Представлены результаты численных и экспериментальных исследований деталей ДВС, изготовленных с применением комбинированных технологий.*

**Введение.** Для повышения трибомеханических характеристик деталей ДВС, находящихся в условиях подвижного контакта, применяется большое количество технологических способов модификации их приповерхностных слоев. Для оценки влияния данных способов модификации требуется проводить исследование физико-механических процессов и состояний аналитическими, численными и экспериментальными методами. В частности, представляет интерес исследование контактного взаимодействия на микроуровне деталей, изготовленных с применением технологий дискретного упрочнения и гальвано-плазменного преобразования трущихся поверхностей высоконагруженных пар (т. н. комбинированной технологии) [1-4]. В данной статье это осуществлено без снижения общности на примере элементов пары "коленчатый вал - вкладыш".

При численном исследовании напряженно-деформированного состояния получаемой пары деталей, обработанных методами дискретного упрочнения и корундирования, соответственно, использовался подход и математическая модель, предложенные в статье [1]. На этой основе для механической системы, представленной на рис. 1, разработана конечно-элементная модель, содержащая представительный объем (рис. 2). Данный объем (ячейка) дает возможность на микроуровне промоделировать напряженно-деформированное состояние взаимодействующих тел, распределение контактных давлений, оценить трение и износ в сопряжении деталей, переведя исследования на реальный макромасштаб.

**Постановка задачи.** При задании механических свойств корундового слоя учитывалось влияние двух факторов: микрогеометрии выступов-впадин на поверхности слоя и его пористость. В зависимости от режимов технологического процесса эти величины могут изменяться в достаточно широких пределах. Для расчетных исследований используемые материалы имели модули упругости  $E_2 = 3,45 \cdot 10^{11}$  Па, остальные материалы имели

свойства  $E_1 = 7 \cdot 10^{10}$  Па,  $E_3 = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па (высоколегированная сталь).  $E_4 = 1,1 \cdot 10^{11}$  Па (чугун), жесткое основание – моделировалось как жесткое закрепление.

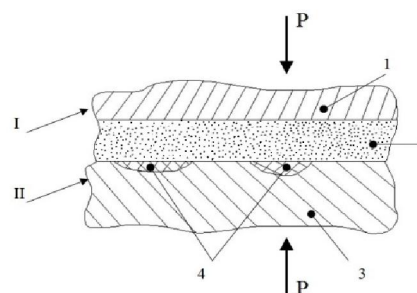


Рис. 1. Схема контактного взаимодействия деталей:

1 – деталь из сплава АК4 (1), упрочненная путем гальвано-плазменного преобразования поверхности с образованием корундового слоя (2); 2 – деталь (основной материал – сталь, чугун (3)), обработанная методом дискретного упрочнения (ДУЗ – дискретно-упрочненная зона (4))

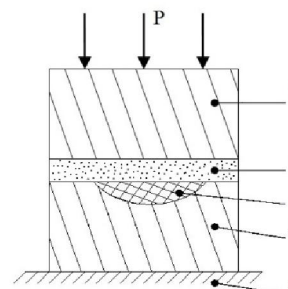


Рис. 2. Схема модели представительной ячейки механической системы: 1 – АК4; 2 – слой  $Al_2O_3$ ; 3 – ДУЗ; 4 – основной материал, 5 – основа (жесткое основание)

На рис. 3 представлена геометрическая и конечно-элементная модели (конечно-элементная модель насчитывала 200 тыс. гексагональных элементов) представительной ячейки механической системы, а также геометрическая модель с прило-

женными внешними нагрузками (прикладываемая нагрузка – давление 100 МПа).

По итогам расчетов определялись поля распределения компонент напряженно-деформированного состояния и контактные давле-

ния в рассматриваемой области контактного взаимодействия элементов системы. Ниже на рис. 4 представлены эквивалентные напряжения и контактные давления для элементов системы.



Рис. 3. Геометрическая (нижняя часть модели: ДУЗ и основной материал) и конечно-элементная модели, модель с приложенной нагрузкой

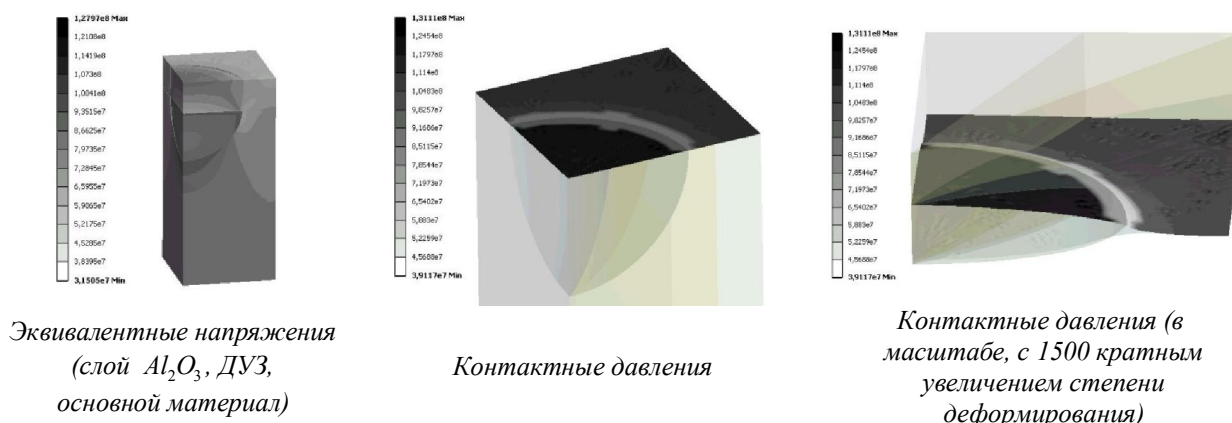


Рис. 4. Эквивалентные напряжения по von-Mises и контактные давления

Из анализа представленных данных видно (см. рис. 4), что в области ДУЗ (см. рис.1) наблюдается более высокий уровень контактных давлений, чем в области контактирования с основным материалом детали II. Соответственно, если в паре "корундовый слой – сталь" коэффициент трения ниже, чем в паре "корундовый слой – основной материал детали II", то при их взаимном движении возникает два эффекта. Первый связан с уменьшением суммарной величины трения в сопряжении деталей I и II (оценочно – в 1,2-1,8 раза). Второй определяет понижение износа, что объясняется более низкой интенсивностью износа высоколегированной стали по сравнению с чугуном.

Еще одним важным обстоятельством является механизм обеспечения устойчивого благоприятного комплексного эффекта от взаимодействия фак-

торов "распределение контактного давления" – "трение" – "износ". В традиционных технологиях данная линейная последовательность факторов находится в "положительной" обратной связи: наличие значительных контактных давлений в сопряжении взаимно движущихся деталей приводит к касательным силам трения, которые вызывают износ; при износе, как указывалось выше, растут нагрузки, что, в свою очередь, приводит к росту контактных давлений и т.д. В результате получаем циклически прогрессирующий процесс по "спирали" P (рис. 5, А), который удаляется от номинального (исходного цикла) в процессе эксплуатации. В противовес этой тенденции для предложенной технологии реализуется также иная, конкурирующая тенденция (см. рис. 5, В).

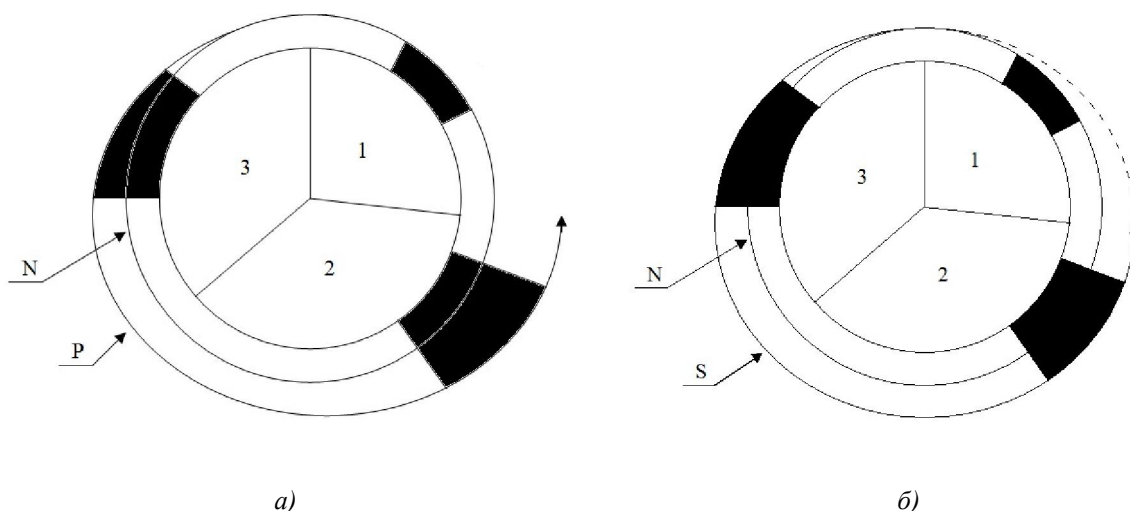


Рис. 5. Механизмы развития процессов контактного взаимодействия (КВ), трения (Т) и износа (И): а) – традиционные технологии; б) – предложенная технология; 1 – Контактное взаимодействие; 2 – износ, 3 – трение

В этом случае действие усилий трения вызывает рост износа основного материала 4 по сравнению с износом материала ДУЗ 3. При этом материал корундового слоя 2 при достижении прирабочного предела в дальнейшем изнашивается слабо. В этих условиях происходит перераспределение контактных давлений преимущественно на область ДУЗ, общая сила трения растет медленнее, сила трения в зоне сопряжения с основным материалом уменьшается, что приводит к уменьшению его износа. Таким образом, реализуется сценарий "отрицательной" обратной связи, и развитие процессов идет по линии *S*, которая удаляется от линии *N* медленнее, чем *P* (см. рис. 5). В определенных условиях это может приводить к превращению *S* в практически стабильную окружность, что означает реализацию установившихся процессов "контактное взаимодействие–трение–износ".

Естественно, что в реальных условиях действительные процессы сочетают тенденции *A* и *B* (см. рис. 5). Однако важен сам механизм стабилизации *B*, поскольку он характеризует тенденцию к установившемуся самоповторению исследованных процессов, а не их интенсификации (что характерно для традиционных процессов обработки поверхностных слоев материалов двигателей ДВС).

Первичные оценки материалов полученных результатов дают рекомендации относительно выбора параметров технологического процесса: относительная площадь ДУЗ – 65-75%, толщина корундового слоя до 0,1 мм; пористость – 10-20 %.

**Экспериментальные исследования.** Для проведения испытаний на износостойкость при трении скольжения в условиях граничной смазки и смазки с абразивом были изготовлены опытные

образцы из материалов "колодка" – вкладыша и "диск" – коленчатого вала.

"Диск" был изготовлен из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, поверхность которого была упрочнена методом электроискрового упрочнения с последующим шлифованием до шероховатости, соответствующей  $R_a = 0,63-0,32$  мкм.

"Колодка" изготавливалась из сталеалюминиевой полосы с алюминиевой поверхностью АМО1-20, которая была модифицирована гальвано-плазменным методом на глубину порядка 0,03 мм. Поверхность "колодки" шлифовке не подвергалась.

Режим испытаний моделировали условия работы шатунно-поршневой группы двигателя.

Испытания проводились на машине трения 2070 СМТ-1 при скорости скольжения 1,3 м/с. Используются стандартные образцы: "диск" диаметром 50 мм, ширина 12 мм; "колодка" с площадью рабочей поверхности  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Схема испытаний приведена на рис. 6.

В результате испытаний также определялся коэффициент трения ( $f_{TP}$ ) и было установлено, что, несмотря на повышенную твердость "колодки", введение диспергированной добавки оксидов магния в модифицированный приповерхностный слой вкладыша из АМО1-20 приводит к снижению коэффициента трения при граничной смазке во всем исследованном диапазоне нагрузок, что может быть связано с улучшением процессов микроприработки рабочей поверхности вала с образованием на его поверхности аморфированного слоя [1, 5-7].

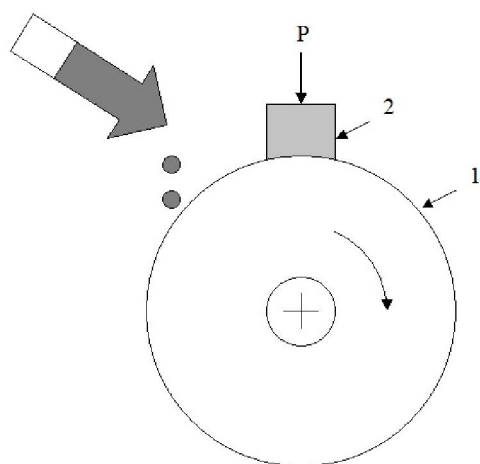


Рис. 6 Схема испытаний на машине трения 2070 СМТ-1

1 – подвижный образец "диск", 2 – неподвижный образец "колодка"

Полученные результаты испытаний (Таблица 1) могут свидетельствовать об изменении характера приработочных процессов в результате существенного изменения свойств приповерхностного слоя исследуемых образцов вкладышей. Как известно [1, 5-7], приработка сталеалюминиевых вкладышей состоит в переносе мягкой структурной

составляющей антифрикционного сплава (олова) на сопрягаемую поверхность вала, что фактически не исправляет его макрогеометрию в процессе приработки.

При наличии на рабочей поверхности вкладыша корундового слоя, образованного в результате гальвано-плазменной обработки, в процессе приработки сопряжения коленвал–вкладыш, прежде всего, исправляется макрогеометрия рабочей поверхности коленчатого вала. При этом также происходит полировка и процессы микроприработки с образованием аморфизированных приповерхностных рабочих слоев, обеспечивающих высокие антифрикционные характеристики сопряжения. Наличие тонкого оксидно-корундового слоя на рабочей поверхности вкладыша в процессе приработки за счет пониженной теплопроводности корундового слоя дает возможность уменьшения относительно больших зазоров на масло, принятых при установке вкладыша коленчатого вала с антифрикционным слоем из алюминиевого сплава [6, 7]. Уменьшение величины гарантированного зазора повышает давление в системе смазки дизеля, снижает потери на трение, температуру головки поршня, шум при работе дизеля, также способствует увеличению ресурса узла коленчатый вал – вкладыш и поршень – гильза до капитального ремонта.

Таблица 1. Результаты испытаний по определению весового износа

Материал и покрытие "колодки"	Износ "колодки", см $10^{-4}$	Износ "диска", см $10^{-4}$
АМО1-20	7,5 (2,5 мкм/час)	0,07 (0,023 мкм/час)
АМО1-20 + МДО	3,4 (1,1 мкм/час)	0,20 (0,07 мкм/час)

**Заключение.** По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Численное моделирование процессов контактного взаимодействия, трения и износа продемонстрировало наличие механизма их стабилизации в системе сопряженных деталей, обработанных методами дискретного упрочнения и корундирования. Так, применение пары трения – сталеалюминиевые вкладыши из АМО1-20 с корундовым слоем и коленчатый вал, изготовленный из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, поверхности коренных и шатунных шеек которого упрочнены методом дискретного упрочнения, существенно повышает стойкость пары к задираобразованию.

2. При образовании на рабочей поверхности вкладыша такого корундового слоя, твердость которого существенно превышает твердость поверхности шеек коленчатого вала, в процессе приработки сопряжения коленчатый вал – вкладыш, прежде всего исправляется макрогеометрия рабочей поверхности шеек коленчатого вала. Введение дис-

пергированной добавки оксида магния в модифицированный приповерхностный слой вкладыша АМО1-20 приводит к снижению коэффициента трения при граничной смазке во всем исследованном диапазоне нагрузок, что связано с улучшением процессов микроприработки рабочей поверхности шеек коленчатого вала с образованием на их поверхности аморфизированного слоя.

3. Результаты проведенных численных исследований и экспериментальных испытаний свидетельствуют о целесообразности применения гальвано-плазменной обработки сталеалюминиевых вкладышей в паре с чугунным коленчатым валом, шейки которого упрочнены методом дискретного упрочнения. При этом на микроуровне наблюдается сильная неравномерность в распределении контактных давлений, уровень которых в зоне дискретного упрочнения выше, чем в неупрочненной зоне. Это, безусловно, является положительным фактором, приводящим к интегральному повышению трибомеханических характеристик пары контактирующих деталей. Эти выводы справедливы не

только для исследованной пары, но и для широкого множества пар трущихся деталей.

4. Применение исследованных методов модифицирования рабочей поверхности вкладыша и упрочнения шеек коленчатого вала позволит снизить относительно высокие зазоры на масло, принятые при установке сталеалюминиевых вкладышей.

В дальнейшем предполагается применить предложенные подходы к исследованию контактного взаимодействия различных деталей, изготавливаемых с применением комбинированных технологий.

#### Список литературы:

1. Шпаковский В. В. Снижение коэффициента трения коленчатый вал вкладыш двигателей магистральных тепловозов применением дискретного упрочнения и гальваноплазменной обработки / В. В. Шпаковский, С. А. Кравченко, А. К. Олейник // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – №1 – С. 98-101. 2. Гончаров В.Г. Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: Автореф. канд. техн. наук: 05.22.20 / В.Г. Гончаров: Харківський національний автомобільно-дорожній ун-т. –Х.: 2008. 3. Белик С.Ю. Оценка механических потерь автотракторных дизелей с газотурбинным наддувом: дисс. канд. техн. наук : 05.05.03 / Белик Сергей Юрьевич. – Харьков. – 2013. – 178 с. 4. Шпаковский В.В. Научно технические основы улучшения показателей ДВС применением порш-

ней с корундовым слоем // дис. доктора техн. наук : 05.05.03 / Шпаковский Владимир Васильевич. – Харьков, 2010. – 425 с. 5. Дьяченко С. С. Исследование ремонтно-пригодности теплового коленчатого вала / С. С. Дьяченко, Б. В. Савченко, И. Г. Гончаров, И. В. Понамаренко, С. И. Аксенова, В. М. Сапожников // Локомотив-информ. – 2007. август.– С. 16-17. 6. Буше Н. А. Подшипниковые сплавы / Буше Н. А. – М.: Транспорт, 1967.– 224 с. 7. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах (транспортная техника) / Буше Н. А. – М.: Транспорт, 1987.– 223 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Shpakovskiy V. V. Snizhenie koeffitsienta tre-niya kolenchatyiy val vkladishy dvigateley magistralnykh teplovozzov primeneniem diskretnogo up-rochneniya i galvanoplazmennoy obrabotki / V. V. Shpakovskiy, S. A. Kravchenko, A. K. Oleynik // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2013. – №1 – S. 98-101. 2. Goncharov V.G. Pldvischennya resursu transportnoyi tehniky udoskonalenniam tehnologiyi remontu kollnchastih valliv: Avtoref. kand. tehn. nauk: 05.22.20 / V.G. Goncharov: Harkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhnyiy un-t. –H.: 2008. 3. Belik S.Yu. Otsenka mehanicheskikh poter avto-traktornykh dizeley s gazoturbinnyim nadduvom: diss. kand. tehn. nauk : 05.05.03 / Belik Sergey Yurevich. – Harkov. – 2013. – 178 s. 4. Shpakovskiy V.V. Nauchno tehicheskie osnovy uluchsheniya pokaza-teley DVS primeneniem porshney s korundovym sloem // dis. doktora tehn. nauk : 05.05.03 / Shpakovskiy Vladimir Vasilevich. – Harkov, 2010. – 425 s. 5. Dyachenko S. S. Issledovanie remontopri-godnosti teplovoznogo kolenchatogo vala / S. S. Dyachenko, B. V. Savchenko, I. G. Goncharov, I. V. Ponomarenko, S. I. Aksenova, V. M. Sapozhnikov // Lokomotiv-inform. – 2007. avgust.– S. 16-17. 6. Bushe N. A. Podshipnikovyie splavyi / Bushe N. A. – M.: Transport, 1967.– 224 s. 7. Bushe N. A. Trenie, iznos i ustalost v mashinah (transportnaya tehnik) / Bushe N. A. – M.: Trans-port, 1987.– 223 s.

Поступила в редакцию 26.06.2014

**Ткачук Николай Анатольевич** – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой ТММиСАПР Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

**Веретельник Олег Викторович** – младший научный сотрудник кафедры ТММиСАПР Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

**Грабовский Андрей Владимирович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры ТММиСАПР Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

**Кравченко Сергей Александрович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: dvskhpi@rambler.ru.

**Белик Сергей Юрьевич** – канд. техн. наук, младший научный сотрудник кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

### **ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДЕТАЛЕЙ ДВЗ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

*Н. А. Ткачук, О. В. Веретельник, А. В. Грабовский, С. А. Кравченко, С. Ю. Белик*

У роботі описаний загальний підхід і вирішення актуальної задачі вдосконалення математичних і чисельних моделей для дослідження НДС та умов контактної взаємодії елементів машинобудівних конструкцій з урахуванням наявності тонкого шару окисованого матеріалу і дискретного зміцнення поверхні відповідної деталі. Представлені результати чисельних і експериментальних досліджень деталей ДВЗ, виготовлених із застосуванням комбінованих технологій.

### **NUMERICAL SIMULATION OF CONTACT INTERACTION OF PARTS OF ENGINE MANUFACTURED BY USING THE COMBINED TECHNOLOGY**

*N. Tkachuk, O. Veretelnik A. Grabowski, S. Kravchenko, S. Belik*

In this paper we describe the general approach and solve the urgent task of improving the mathematical and numerical models for the study of VAT and conditions of contact interaction of elements of engineering structures based on the availability of a thin layer of oxidized material and surface hardening response of discrete parts. The results of numerical and experimental studies of the internal combustion engine was made using combined technologies.