

Г. В. Кирик, д.т.н., проф., президент, Лауреат Государственной премии; П. Е. Жарков, к.т.н., доцент, академик УТА, вице-президент, Лауреат Государственной премии (Концерн «NІСМАС», г. Сумы, Украина); Е. В. Коноплянченко, к.т.н., доц.; Т. П. Волошко, ст. преподаватель (СНАУ, г. Сумы, Украина); В. В. Домашенко, директор (Ахтырский колледж СНАУ, г. Ахтырка, Украина)

# Проблемы и решения реновации роторов винтовых компрессоров комбинированными технологиями. Часть 1

Описана новая комбинированная технология реновации роторов винтовых компрессоров, повышающая их надежность и долговечность за счет целенаправленного сочетания отдельных способов повышения качества поверхностей деталей комбинированными технологиями, включающими: электроэрозионное легирование (ЭЭЛ), ионное азотирование, цементацию методом ЭЭЛ, метод безабразивной финишной обработки, нанесение полимерных материалов.

**Ключевые слова:** винтовой компрессор, ротор, износ, поверхностный слой, электроэрозионное легирование, микротвердость

Описана нова комбінована технологія реновації роторів гвинтових компресорів, що підвищує їх надійність і довговічність за рахунок цілеспрямованого поєднання окремих способів підвищення якості поверхонь деталей комбінованими технологіями, що включають: електроерозійне легування (ЕЕЛ), іонне азотування, цементацію методом ЕЕЛ, метод безабразивної фінішної обробки, нанесення полімерних матеріалів.

**Ключові слова:** гвинтовий компресор, ротор, знос, поверхневий шар, електроерозійне легування, мікротвердість

Described a new combined technology of screw compressors rotors renovation, which increases their reliability and durability due to purposeful combination of separate methods of parts surfaces quality improving by combined technologies include: electroerosive alloying (EEA), ion nitriding, cementation by method EEA, method nonabrasive finishing, coating of polymer materials.

**Key words:** screw compressor rotor, wear, surface layer, electroerosion alloying, microhardness.

## Введение

Расчеты себестоимости продукции промышленных предприятий показывают, что одной из главных затратных статей являются расходы на электроэнергию, в структуре которых одними из самых больших являются затраты на производство сжатого воздуха.

Мировой тенденцией развития технологии сжатого воздуха является все более широкое применение винтовых компрессорных установок, которые повсеместно вытесняют другие типы компрессоров, что подтверждается структурой выпуска воздушных компрессоров в такой технически развитой стране, как Япония [1]. Винтовые компрессоры (ВК) применяются в металлургической, горнодобывающей, химической, машиностроительной, транспортной, перерабатывающей, сельскохозяйственной и других отраслях народного хозяйства. Их экономичность, компактность, мобильность, регулируемость в полной мере отвечают энергосберегающим технологиям.

При соблюдении необходимых условий эксплуатации ресурс ВК достигает 40 и более тысяч часов. Узлами, которые ограничивают их ресурс, являются подшипники, в которых установлены ведущий и ведомый винты (роторы). Для нормальной и длительной работы подшипников необходимо выполнение двух условий: обеспечение их температурного режима в допустимых пределах (не больше 80 °С) и высококачественное масло.

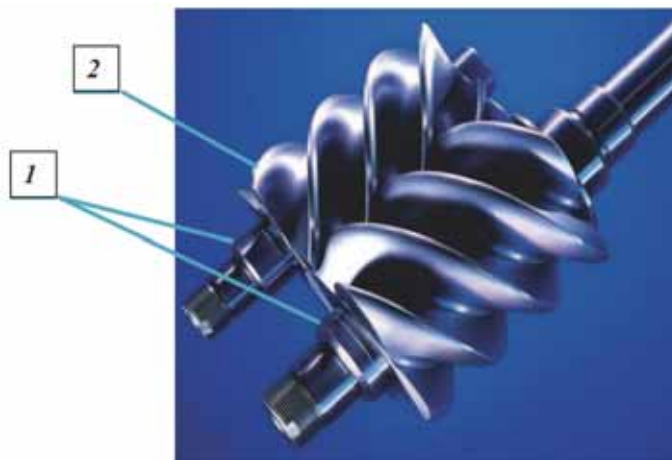
Если при эксплуатации компрессора имеют место длительная работа на горячем масле и (или) производятся его частые пуски и остановки, а также другие перегрузки, то подшипники качения могут преждевременно выйти из строя. Это может повлечь за собой аварию, связанную с заклиниванием роторов, «схватыванием» материалов роторов и корпуса, разрушением касательных поверхностей роторов (лент). Ремонт такого компрессора может быть выполнен только в заводских условиях, а в отдельных случаях необходима замена компрессорного блока на новый. Поэтому работы,

направленные на совершенствование технологии реновации ВК весьма актуальны и своевременны.

## Анализ основных достижений и публикаций

Роторы ВК вращаются внутри охватывающего их корпуса. Точная шлифовка профилей зубьев, например, в компрессорах типа CF фирмы GHH-Rand позволяет допустить очень малые зазоры между сопряженными зубьями роторов (0,02 – 0,03 мм) и свести к минимуму протекания рабочей среды из полостей с повышенным давлением на всасывание [2, 3].

Как отмечалось выше, в процессе работы у роторов изнашиваются посадочные места под подшипники и рабочие поверхности лент (рис. 1). Износ лент, как правило, не превышает 0,3 мм на диаметр, тем не менее, учитывая изначально малые зазоры, это может привести к значительному снижению производительности компрессора.



**Рис. 1. Места износа роторов винтового компрессора:** 1 – посадочные места под подшипники; 2 – рабочие поверхности лент

Современные ремонтные технологии, позволяют значительно повысить физико-механические характеристики поверхностей деталей. Основной их задачей, наряду с восстановлением изношенных участков поверхности, является повышение таких качественных параметров поверхностного слоя, как твердость износостойкость, снижение шероховатости, изменение величины и знака остаточных напряжений, увеличение усталостной прочности и др. [4].

Одним из путей улучшения качества поверхностного слоя и снижения стоимости ремонта машин является многократное восстановление формы деталей металлопокрытиями и обеспечение их взаимозаменяемости.

Анализ научно-технической литературы показал, что нет однозначно определенного метода повышения качества поверхностного слоя деталей машин, который был бы применим при любых заданных условиях.

Одним из наиболее простых с технологической точки зрения методов поверхностного упрочнения, восстановления деталей и нанесения защитных покрытий является электроэрозионное легирование (ЭЭЛ). Технологическая сущность ЭЭЛ состоит в перенесении легирующего материала анода на легируемую поверхность при искровом разряде в воздушной среде. Перенесенный материал анода легирует катод и, соединяясь химически с атомарным азотом воздуха, углеродом и материалом упрочняемого изделия, образует на поверхности последнего диффузионный износостойчивый слой. Благодаря значительной гамме металлов, которые можно использовать при ЭЭЛ, участию межэлектродной среды в процессе формирования поверхностных слоев, этим методом можно в широких пределах изменять механические, термические, электрические, термоэмиссионные и другие свойства рабочих поверхностей деталей.

К основным особенностям ЭЭЛ следует отнести локальную обработку поверхности; высокую прочность сцепления нанесенного материала с основой; отсутствие нагрева детали в процессе обработки; возможность использования в качестве обрабатываемых материалов как чистых металлов, так и их сплавов, металло-керамических композиций, тугоплавких соединений и т. п.; диффузионное обогащение поверхности катода (детали) составными элементами анода (электрода) без изменения размеров детали; отсутствие необходимости специальной подготовки поверхности [5].

Однако ЭЭЛ термообработанных деталей не всегда приводит к желаемому результату. Причиной выхода из строя некоторых из них является то, что под слоем повышенной твердости после ЭЭЛ появляется зона отпуса – зона сниженной твердости. Это приводит к продавливанию упрочненного слоя и, как следствие, к быстрому износу детали. ЭЭЛ в данном случае принесет вред, особенно если допустимый износ легированной поверхности превышает толщину слоя повышенной твердости [6].

Согласно [7] «провал» твердости в зоне термического влияния можно устранить путем применения после ЭЭЛ дополнительной обработки для создания наклепа методом поверхностного пластического деформирования. Однако, следует отметить, что в данном случае общего повышения твердости в переходной зоне не наблюдается.

Согласно [8] проведение ионного азотирования (ИА) до или после ЭЭЛ позволяет устранить зоны пониженной твердости при использовании электродов из чистых твердых износостойких металлов. Кроме того, наблюдается плавное изменение твердости упрочненного слоя и увеличение общей глубины зоны повышенной твердости.

Известен способ цементации стальных деталей

электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [9, 10], когда при ЭЭЛ в качестве электрода используют графит (углерод). Способ ЦЭЭЛ имеет ряд достоинств, основными из которых являются:

- достижение 100% сплошности упрочнения поверхностного слоя;
- повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов;
- легирование можно осуществлять в строго указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность детали;
- отсутствие объемного нагрева детали, а, следовательно, поводок и короблений.

С целью снижения шероховатости поверхности деталей машин, с сохранением качества поверхностного слоя (отсутствие микротрещин, наличие слоя повышенной твердости, 100%-я сплошность и др.) и таким образом расширения области их применения, предложено ЦЭЭЛ проводить поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда [11, 12].

В [13] описан ремонт роторов ВК, работающего в АП «Шахта им. А.Ф. Засядько». В результате аварии компрессорной установки КУ ВВ 50/8 - УЗ, произошел осевой сдвиг ведомого винта (материал сталь 40, твердость ~ 150 НВ) компрессорного блока CF 246 G (заводской №497457), что привело к задиру поверхностей кромки зубьев по наружному диаметру ( $\varnothing 277$  мм) и посадочной шейки подшипника ( $\varnothing 70,03$  мм) со стороны всасывания. Изнашивание наружной поверхности кромок зубьев отмечено на протяжении всей их длины, с постепенным возрастанием к торцу со стороны всасывания. Износ достигал 2,5 мм на сторону.

Наружные поверхности кромок зубьев были восстановлены на установке с ручным вибратором модели «ЭЛИТРОН - 52А». В качестве электродов использовали бронзу О10Ц1,5Н.

После шлифовки шейки подшипника и наружной поверхности кромок зубьев в «размер» компрессорный блок был собран, испытан и отправлен заказчику.

Для восстановления поверхности лент роторов можно использовать механические установки ЭЭЛ типа «Элитрон 347», «ЭИЛ-9» и другие, базирующиеся на токарно-винторезных станках. В качестве материалов электродов кроме бронзы можно использовать нержавеющие стали: 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т и др.

Для снижения при касании поверхностей роторов, таких негативных факторов, как износ, схватывание, заедание и т.п. на контактирующие поверхности можно нанести прирабатывающие покрытия [14-16]. Кроме этого, изменение защитных и трибологических свойств поверхностей деталей можно достичь, как за счет образования специального рельефа поверхностного слоя [17, 18], так и нанесением специальных покрытий [19, 20].

В последнее время в ремонтном производстве находят все большее применение новые технологии ремонта оборудования с помощью металлополимерных материалов (МПО), которые обладают следующими свойствами [21]: хорошей адгезией с металлом; близкими к металлу деформационными характеристиками; незначительным изменением свойств с изменением температуры; минимальной усадкой при отверждении; стойкостью к воздействию внешних факторов и др.

#### **Постановка задачи**

С целью повышения таких эксплуатационных характеристик деталей машин как износостойкость и усталостная прочность, упрочнению подвергают, как правило, их поверхностный слой. При этом сердцевина остается более мягкой и пластичной.

После поверхностного упрочнения (цементацией, газовым азотированием, карбонитрацией, ионным азотированием и др.), с целью устранения отклонения деталей от правильной геометрической формы, нередко

возникает необходимость в удалении части поверхности, причем наиболее твердой, так как при поверхностном упрочнении величина твердости снижается по мере углубления.

При ремонте изношенных поверхностей шеек роторов под подшипники нередко возникает проблема восстановления их твердости. Причем если износ значительный (до 1 мм на диаметр), изношенные шейки валов под подшипники качения растачивают до определенного размера, а затем напрессовывают на них втулки, которые предварительно подвергают поверхностному упрочнению. После чего наружную поверхность втулки обтачивают и шлифуют под номинальный размер подшипника.

По сравнению с цементацией и закалкой процесс азотирования протекает при более низкой температуре. Азотированная поверхность имеет более высокую твердость, износостойкость и коррозионную стойкость, лучшую полируемость; свойства азотированной поверхности практически не изменяются при повторных нагревах вплоть до 500 - 600 °С, в то время как при нагревах цементированной и закаленной поверхности до 225 - 275 °С твердость ее снижается.

Учитывая это свойство, в предварительно азотированной поверхности не следует ожидать снижения твердости в зоне термического влияния после ЦЭА.

При ЦЭА стальной азотированной поверхности происходит процесс аналогичный нитроцементации, только насыщение поверхности азотом и углеродом протекает поочередно, а при традиционной нитроцементации – одновременно.

Преимущества ИА по сравнению с обычным жидкостным (карбонитрация) и газовым азотированием состоят в возможности целенаправленного контроля структуры получаемого поверхностного слоя, применении относительно низких температур (до 500 °С), отсутствие поводок и коробления, исключение наводороживания и предотвращение развития процессов отпускной хрупкости в основном металле, безвредность и экологическая безопасность процесса, сокращение продолжительности обработки. Длительность ИА колеблется от 0,5 - 36 ч в зависимости от необходимой глубины упрочненного слоя [22].

Нередко упрочненный поверхностный слой детали удаляют после ее сборки с другими деталями, например, после напрессовки втулки на вал. В данном случае может быть удалено от 0,05 до 0,15 мм. Увеличить твердость поверхностного слоя такой детали, без необходимости предварительной разборки, вышеуказанными технологиями практически невозможно.

Для этого может быть использован способ ЦЭА, одним из достоинств которого является возможность проведения процесса в локальном месте, не защищая при этом другие поверхности. При необходимости, шероховатость поверхности после ЦЭА можно снизить методом поверхностной пластической деформации. В последнее время для этих целей применяют метод безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО).

Следует отметить, что в отдельных случаях, хотя и крайне редко, когда после первого этапа ЦЭА величина шероховатости поверхности детали находится в необходимых пределах технического задания, т.е. удовлетворяет требованиям чертежа, можно ограничиться одним этапом ЦЭА.

Предлагаемый способ может быть применен для ремонта отдельных узлов деталей без их демонтажа, в частности для восстановления твердости упрочненного поверхностного слоя напрессованной втулки под подшипник.

Учитывая выше сказанное, возникает научный и практический интерес в проведении металлографиче-

ских и дюрOMETрических исследований стальных поверхностей после их ИА, удаления части поверхностного слоя и последующей ЦЭА.

Для проведения ремонта изношенных поверхностей ленточек роторов может быть использована комбинированная технология, состоящая из ЭА и метода восстановления деталей современными МПМ.

Следует отметить, что для достижения хорошей адгезии пластика с поверхностью обрабатываемого изделия на последней необходимо создать соответствующую шероховатость.

Учитывая характерные особенности метода ЭА, а также то, что варьируя режимами легирования, можно в широких пределах изменять шероховатость поверхности (Rz) от 1 до 200 мкм, для ремонта изношенных поверхностей ленточек роторов может быть использована интегрированная технология, включающая в себя метод ЭА и нанесение МПМ [23]. В данном случае отдельно взятые технологии не в коей мере не снижают достоинства друг друга, а дополняют их и устраняют недостатки каждой в отдельности. Так поверхностный упрочненный слой, либо покрытие из твердого износостойкого материала, сформированные методом ЭА после нанесения полимерного материала, заполняющего пустоты между микронеровностями поверхности, будут иметь 100% сплошность и значительно меньшую шероховатость, а также большую твердость и износостойкость, чем при использовании МПМ автономно.

Роторы ВК, предназначенных для сжатия коррозионно-агрессивных сред, например H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, нитрозные газы и эксплуатации в тропических условиях, изготавливаются из тех же сталей и сплавов, применяемых для деталей и узлов на коррозионные среды [24].

Роторы ВК для некоррозионноагрессивных сред изготавливаются из конструкционных, качественных среднеуглеродистых сталей сталь 40, сталь 45, хромистой стали 40X и др.

Для защиты стальных поверхностей лент роторов ВК от износа, схватывания и заедания при возможном касании, можно использовать метод сульфидирования, который представляет собой термохимический процесс обработки изделий, изготовленных из сплавов на железной основе, для обогащения поверхностных слоев серой. Эффект сульфидирования сводится к созданию на поверхности детали пленки сульфидов. Последние повышают поверхностную активность металлов и сплавов, а также смачивание поверхности активными веществами и сопротивление схватыванию. Сульфидная пленка, имеющая меньшую прочность чем основной металл, легко разрушается при трении и отделяется от основания без пластического его деформирования, предотвращая схватывание поверхностей трения. Пленка сульфида железа (FeS) повышает износостойкость трущихся поверхностей и улучшает их прирабатываемость. Ферросульфидное покрытие обладает довольно высокой пористостью и впитывает большое количество смазки, сообщая материалу свойство самосмазывания [25].

Таким образом, **целью** работы является повышение надежности и долговечности ВК, путем совершенствования технологии реновации их роторов за счет применения новых комбинированных технологий включающих в себя: ИА, ЭА, ЦЭА, БУФО, метод сульфидирования и нанесение МПМ.

#### **Методика исследований**

Для ИА и ЦЭА использовали специальные образцы из стали 40X, термообработанные на твердость 3000-3100 МПа. Образцы изготавливались в виде катушки, состоящей из двух дисков, диаметром 50 мм и шириной 10 мм, соединенных между собой проставкой диаметром 15 мм и имеющей два технологических участка та-



а



б

Рис. 2. ЦЭЭЛ (а) и установка ИА модели «НГВ - 6,6/6 - И1» (б)

Таблица 1. Режимы ЦЭЭЛ образцов стали 40X с удаленным поверхностным слоем

Глубина удаленного слоя, мм	Энергия разряда, Дж		Производительность, мин/см <sup>2</sup>	
	1-й этап	2-й этап	1-й этап	2-й этап
0,05	0,42	0,10	2	5
0,10	0,42	0,10	2	5
0,15	0,60	0,10	1	5
0,20	0,60	0,10	1	5

кого же диаметра. Поверхности дисков шлифовались до  $Ra = 0,5$  мкм.

Процесс ЦЭЭЛ производился с помощью установки модели «ЭИЛ – 8А». Образцы закреплялись в патроне, а вибратор в резцедержателе токарного станка. После чего производилась поэтапная ЦЭЭЛ, путем последующего легирования графитовым электродом марки ЭГ-4 (ОСТ 229-83) с энергией разряда 0,42 Дж (1-й этап) и 0,10 Дж (2-й этап) с производительностью, соответственно 2 и 5 мин/см<sup>2</sup> (рис. 2, а). ИА образцов проводили при температуре 520 °С в течение 12 ч на установке НГВ-6,6/6-И1 (рис. 2, б).

Упрочнение образцов производили в различной последовательности: ИА; ЦЭЭЛ; ЦЭЭЛ+ИА; ИА+ЦЭЭЛ. Кроме того, некоторые образцы после ИА шлифовали на различную глубину и проводили ЦЭЭЛ согласно режимам табл. 1.

С целью снижения шероховатости поверхности после ЦЭЭЛ применяли БУФО.

Из упрочненных образцов вырезали сегменты, из которых изготавливали шлифы, которые исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрометрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердо-

мере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н.

На всех этапах обработки измеряли шероховатость поверхности на приборе профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр».

Для проведения исследований, направленных на разработку технологии восстановления изношенных поверхностей ленточек роторов изготавливали плоские образцы размером 15 x 15 x 6 мм и цилиндрические из стали 40 диаметром 38 мм и длиной 25 мм, соединенные проставками диаметром 25 мм и длиной 15 мм (рис. 3). Поверхности образцов шлифовались до  $Ra = 0,5$  мкм.

ЭЭЛ плоских образцов производилось на установке с ручным вибратором модели «Элитрон-52А», а цилиндрических на механизированной установке модели «ЭИЛ-9», которая содержит источник технологического тока (генератор) и электропривод с электродной головкой, монтируемой на токарно-винторезных станках (рис. 4).

В качестве материала электродов использовалась проволока из бронзы, марки БрО10Ф1; баббита, марки Б88 и графит марки ЭГ-4 ОСТ 229-83.

Из образцов с покрытием изготавливали шлифы, для металлографических и дюрометрических исследований по методике описанной выше.

Сплошность покрытия оценивали визуально при помощи лупы 6-ти кратного увеличения.



а



б

Рис. 3. Плоские (а) и круглый (б) образцы из стали 40



а



б

Рис. 4. Плоские (а) и круглый (б) образцы из стали 40

#### Литература:

1. Takashima H. Current Trends in Rotary Screw Air Compressor Oils// Journal of Japan Society of Lubrication, 1987, v.32, p.171-174

2. Konka, Karl-Heinz. Schrauben kompressoren: Technik und Praxis.- Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1988.

3. The worldwide supplier of rotary screw compressor blocks. Проспект фирмы GHH-Rand (Германия), 2001.- 7с.

4. Качество машин: справочник. В 2 т. Т. 2. / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский [и др.]. - М.: Машиностроение, 1995. - 430 с.

5. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. - Кишинев: Штинца, 1985. - 196 с.

6. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. - М. Машиностроение, 1976.- 45 с.

7. Андреев В.И. Повышение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей // Вестник машиностроения. - 1978.- №7.- С.71-72.

8. Патент Украины на винахід № 103701, 23Н 5/00. Спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей, підданих термічній обробці. / В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник / Опубл. 11.11.2013, бюл. № 21.

9. Патент Украины на винахід № 82948, 23С 8/00. Спосіб цементзації сталевих деталей електроерозійним легуванням/ В.С. Марцинковский, В.Б.Тарельник, А.В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10.

10. Патент Российской Федерации на изобретение № 2337796. МПК В 23Н 9/00.Способ цементации стальных деталей электроэрозийным легированием /Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В./ Опубл. 10.04. 2008, Бюл. № 31.- 3с.

11. Патент України на винахід № 101715, 23Н 9/00. Спосіб цементзації сталевих деталей електроерозійним легуванням/ В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братуцак / Опубл. 25.01.2013, бюл. № 8.

12. Патент Российской Федерации на изобретение № 2468899. МПК В 23Н 9/00.Способ цементации стальных деталей электроэрозийным легированием /Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., М.П. Братуцак/ Опубл. 10.12. 2012, Бюл. № 34.

13. В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, Богдан Антошевский. Повышение долговечности деталей роторных машин // Компрессорное и энергетическое машиностроение.- 2006.- № 4(6).- С. 66-70.

14. V. Tarellyk, V. Martsynkovskyy. Upgrading of Pump and Compressor Rotor Shafts Using Combined Technology of Electroerosive Alloying//Applied Mechanics and Materials Vol. 630 (2014). - Trans Tech Publications, Switzerland. - P. 397-412

15. Antoszewski B. The formation of antiwear surface layers on elements of machine parts //Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance. Tribology. Vol. 44.- №.2(158) - 2009. - P. 7-18.

16. N. Radek, J. Pietraszek, B. Antoszewski The Average Friction Coefficient of Laser Textured Surfaces of Silicon Carbide Identified by RSM Methodology// Advanced Materials Research Vol. 874 (2014) - P. 29-34.

17. Bogdan Antoszewski. Influence of Laser Surface Texturing on Scuffing Resistance of Sliding Pairs //Advanced Materials Research, V. 874, 2014, pp. 51-55.

18. Błasiak S., Kundera Cz. A numerical analysis of the grooved surface effects on the thermal behavior of a non-contacting face seal //Procedia Engineering, V.39, 2012, pp. 315-326.

19. Vasyly Martsynkovskyy, Volodymyr Yurko. Solutions for increasing the bearing capacity of thrust bearings // Applied mechanics and materials, v. 630, 2014, pp. 208-219.

20. Volodymyr Yurko, Vasyly Martsynkovskyy. Influence of changing the end floating seal dynamic characteristics on the centrifugal compressor vibration state // Applied mechanics and materials, v. 630, 2014, pp. 356-364.

21. А.А. Иценко. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами.- Мариуполь: ПГТУ, 2007.- 250 с.

22. Полевой С. Н., Евдокимов В. Д. Упрочнение металлов. Справочник. - М.: Машиностроение, 1986.- 319 с.

23. Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей (варіанти): Пат. 104664. Україна. МПК В23Н 5/00 /Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Павлов О.Г., Иценко А.О.; Опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4.-3 с.

24. И.Г. Галиахметов. Конструкционные материалы центробежных и винтовых компрессоров. Выбор и технология их применения / И.Г. Галиахметов. Казань: Изд-во «ФЭН», 2009.- 155 с.

25. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский, Э.Д. Браун; Отв. Ред. И.М. Федорченко. АН УССР. Ин-т проблем материаловедения. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Наук. думка, 1990. - 264 с.