

©Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Белоус А.В., Павлов А.Г.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1. Постановка проблемы в общем виде

Для выполнения своих функций детали машин соответствующим образом соединяются между собой, образуя подвижные или неподвижные соединения.

Неподвижные соединения (сопряженных) деталей характеризуются невозможностью их взаимного перемещения. Неподвижность соединения обеспечивается натягом. Прочность соединения определяется посадкой и качеством точности. Неподвижные соединения могут быть выполнены по прессовых посадках (гарантированный натяг) или переходных посадках (натяг или зазор).

Одним из наиболее распространенных узлов в механизмах и машинах является прессовое соединение или соединение с гарантированным натягом. Такие соединения широко применяются в машиностроении при изготовлении роторов турбин, компрессоров и насосов, валов с зубчатыми колесами редукторов, осей и валов сельскохозяйственных машин и др.

Наиболее характерными случаями отказов работы прессовых и прессово-шпоночных соединений являются нарушение прочности сопряжения, фреттинг-усталостные повреждения и поломки вследствие усталости. Поэтому повышение работоспособности этих соединений является одной из важнейших задач в обеспечении надежности и долговечности деталей машин.

2. Анализ последних исследований и публикаций

Сборка неподвижных поверхностей может осуществляться запрессовкой вала в отверстие, нагреванием детали, которая имеет отверстие и охватывает или охлаждением вала [1].

Соединение деталей машин с натягом (разностью посадочных размеров) осуществляют за счет их предварительной деформации. С помощью натяга соединяют обычно детали с цилиндрическими и реже коническими поверхностями контакта. Такое соединение (как узел конструкции) представляет собой сопряжение, в котором передача нагрузки от одной детали к другой осуществляется за счет сил трения (сцепления) на поверхностях контакта, образующихся благодаря силам упругости. Вследствие этого соединение имеет нежесткую фиксацию деталей в осевом и окружном направлениях.

Согласно [2, 3] к достоинствам таких соединений можно отнести: возможность выполнения их для очень больших нагрузок и хорошее восприятие ими ударных нагрузок; цилиндрические и конические соединения сравнительно дешевы и просты в выполнении; обеспечивают хорошее центрирование сопрягаемых деталей; не требуют специальных крепежных деталей.

Недостатки соединений: относительная сложность сборки и разборки (особенно внутри неразъемного корпуса); возможность ослабления посадки и повреждения посадочных поверхностей при разборке; большое рассеяние сил сцепления в связи с рассеянием действительных посадочных размеров в пределах допусков и коэффициентов трения; высокая концентрация напряжений; склонность к контактной коррозии из-за неизбежных осевых микросмещений точек деталей вблизи краев соединения и, как следствие, пониженная прочность соединений при переменных нагрузках; отсутствие жесткой фиксации деталей; трудности неразрушающего контроля.

В связи с необходимостью сохранения точности под нагрузкой соединения должны удовлетворять условиям жесткости.

По признаку возможности разборки различают разъемные соединения, допускающие удобную разборку деталей машин без разрушения соединяющих или соединяемых элементов, и неразъемные, которые можно разобрать только после их частичного или полного разрушения. Хотя соединения деталей с натягом обычно относят к неразъемным, однако цилиндрические соединения допускают разборку (распрессовку) и сборку (запрессовку) деталей [4].

Как правило неподвижные соединения используют сравнительно часто для посадки на валы и оси зубчатых и рабочих колес, полумуфт, упорных дисков, шкивов, звездочек, шариковых и роликовых подшипников и др.

Следует отметить, что кроме обеспечения прочности для соединений элементов сосудов и трубопроводов, содержащих жидкости или газы, часто стоит задача обеспечения и их плотности (герметичности). Для этого контактирующие поверхности механических соединений должны быть сжаты давлением, существенно превышающим давление среды.

При сборке неподвижных соединений сопряженные поверхности деталей подвергаются пластическому деформированию, поэтому желательно, чтобы твердые металлические детали имели более мягкий поверхностный слой.

Современная технология располагает многочисленными способами изменения качества поверхности деталей, из которых одним из наиболее перспективных является метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), при помощи которого можно изменить твердость металлической поверхности:

- повысить нанесением на поверхность материала более высокой твердости или диффузионным введением в поверхностный слой необходимых химических элементов из окружающей среды или из материала анода;
- понизить, нанося на поверхность более мягкие материалы;
- повысить при обработке незакаленного, но закаливающегося материала, применяя импульсы с большей энергией или более длительные, разогревающие металл несколько глубже суммарной толщины нанесенного и диффузионного слоев [5].

3. Формулирование цели статьи (постановка задачи)

Таким образом целью работы было обеспечение необходимого качества сопрягаемых деталей неподвижных соединений за счет совершенствования технологии ЭЭЛ и направленного сочетания ее с другими технологиями, что в значительной степени повысит герметичность неподвижных соединений, а также их надежность и долговечность.

4. Изложение основного материала исследований

Ниже представлены результаты совместных исследований проводимых сотрудниками кафедры технического сервиса Сумского национального аграрного университета и предприятия ТРИЗ (товарищество решения инженерных задач) г. Сумы.

В литературных источниках практически отсутствуют сведения о применении ЭЭЛ с целью снижения твердости поверхностного слоя деталей, хотя перед технологами нередко ставится такая задача. Например, с целью увеличения герметичности торцового уплотнения при сборке термообработанных деталей требуется, чтобы одна или обе сопрягаемые поверхности были более пластичные, чего можно достичь снижением их микротвердости в строго определенном месте, не изменяя твердости всей детали.

В [6] предложен способ достижения поставленной цели, когда методом ЭЭЛ на сопрягаемой, предварительно обработанной поверхности детали, формируют поверхностный слой с использованием графитового электрода.

При ЭЭЛ графитовым электродом стальных катодов на поверхностях последних возникает «белый» слой, который обычно не поддается травлению реактивами, которые применяются к материалу основы. Микротвердость «белого» слоя значительно превышает микротвердость основного металла. Под «белым» слоем расположена переходная зона – подслой, который является участком термического воздействия импульсных разрядов и диффузионного взаимопроникновения элементов анода и катода. Подслой обычно является

зоной отпуска, величина которой определяется параметрами импульсного разряда. С увеличением энергии последнего эта зона расширяется. Твердость в зоне отпуска ниже твердости основного металла. При обработке стали графитовым электродом с использованием импульсов большой длительности – до $9 \cdot 10^{-4}$ с при энергии 0,4 – 4,0 Дж зона термического воздействия достигает 400 мкм.

Для получения на поверхностях стальных катодов зоны отпуска было бы возможно использование и других электродов: электродов из чистых металлов (хром, вольфрам, молибден и другие), сплавов различной степени легирования, твердых сплавов и т.п. Однако, при ЭЭЛ графитовым электродом меньше всего изменяется величина шероховатости обрабатываемого участка, достигается 100% - я сплошность легированной поверхности, не формируется покрытие из применяемого металлического электрода, отсутствует залипание электрода при ЭЭЛ и наконец, используется более дешевый электродный материал.

Глубина зон повышенной и пониженной твердости для каждого материала детали и режимов ЭЭЛ определяется экспериментально. Зону повышенной твердости удаляют любым известным способом, например, шлифованием.

При ЭЭЛ графитовым электродом термически обработанных деталей из цветных сплавов (например, бериллиевая бронза) в поверхностном слое непосредственно с поверхности образуется зона отпуска, глубина которой, как и при легировании стальных деталей, зависит от режимов легирования. Причем с увеличением энергии разряда и времени легирования увеличивается глубина слоя пониженной твердости.

На рис. 1 изображена микроструктура поверхностного слоя бериллиевой бронзы БрБ2, термообработанной на твердость 3700 МПа, после ЭЭЛ углеродом (графитом марки ЭГ - 4) с производительностью 1,0 (а); 2,0 (б) ;3,0 (в) и 4,0 (г) мин/см², а в табл. 1 показана глубина и распределение микротвердости сформированных слоев. ЭЭЛ производилось на установке

модели «УИЛВ-8», при этом параметры легирования соответствовали 5-му режиму (ток короткого замыкания $J_{к.з.} = 2,0...2,2A$; напряжение холостого хода $U_{х.х.} = 68,7В$; емкость накопительного конденсатора $C = 300$ мкФ).

Из анализа микроструктур (см. рис. 1) и данных табл. 1 следует, что с увеличением времени легирования от 1 до 4 мин/см² увеличивается глубина разупрочненного слоя с 25 до 120 мкм. Микротвердость при этом увеличивается с 1450 до 2290 МПа.

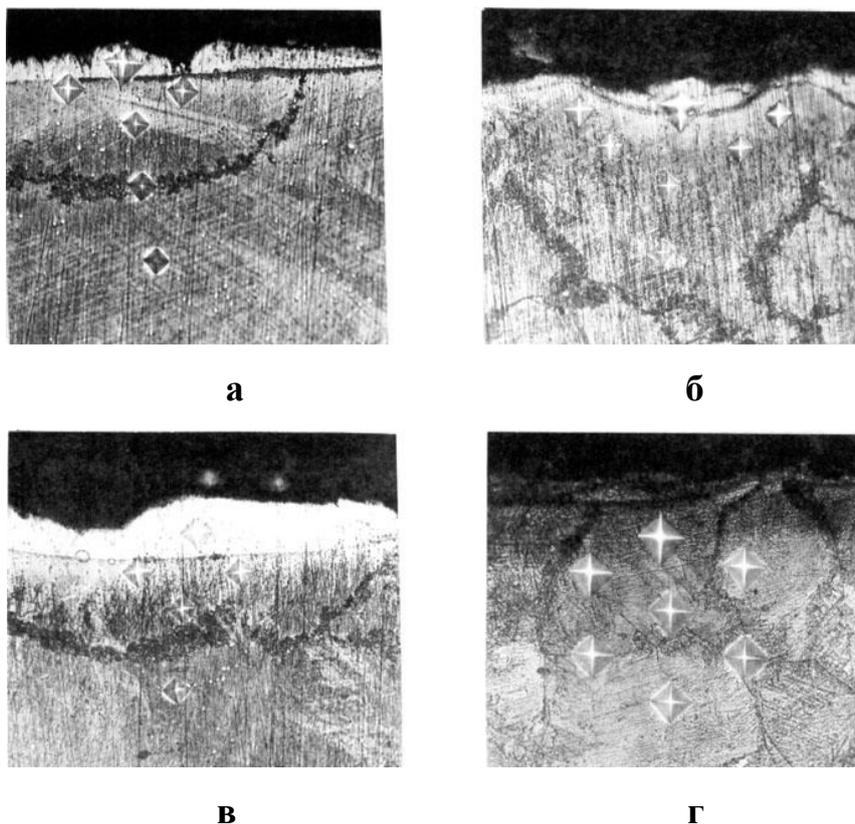


Рис. 1 – Микроструктура поверхностного слоя бериллиевой бронзы БрБ2 после ЭЭЛ углеродом в течение: а - 1 мин, б - 2 мин, в - 3 мин, г - 4 мин, х400

Таблица 1 – Распределение микротвердости и глубина разупрочнения поверхностного слоя бериллиевой бронзы БрБ2

Производительность ЭЭЛ, мин/см ²	Глубина слоя, мкм	Распределение микротвердости по мере углубления с поверхности, МПа
1,0	25	1450, 1950, 3120, 3700
2,0	30	1400, 2600, 2800, 3700
3,0	50	1840, 1950, 2200, 3700
4,0	120	2290, 2500, 2600, 3700

Таким образом, время легирования углеродом определяется необходимостью получения требуемой глубины и микротвердости поверхностного слоя.

Качество сопрягаемых деталей неподвижных соединений можно повысить за счет нанесения специальных покрытий, изменяющих структуру их контактирующих поверхностей.

Так в [7] предложен следующий способ обработки сопрягаемых поверхностей стальных и/или чугунных деталей.

Способ осуществляется следующим образом. На сопрягаемую поверхность стальных и/или чугунных деталей (независимо от их термообработки) методом ЭЭЛ наносят покрытие из никеля. При этом используют импульсные разряды при энергии 0,01 – 0,63 Дж с образованием поверхностного слоя, микротвердость которого меньше микротвердости основы детали.

После этого на поверхностный слой из никеля этим же методом и на этих же режимах наносят кольцевые участки покрытия электродами из твердых сплавов группы ВК или ТК с интервалом и шириной 4-6 мм (рис. 2).

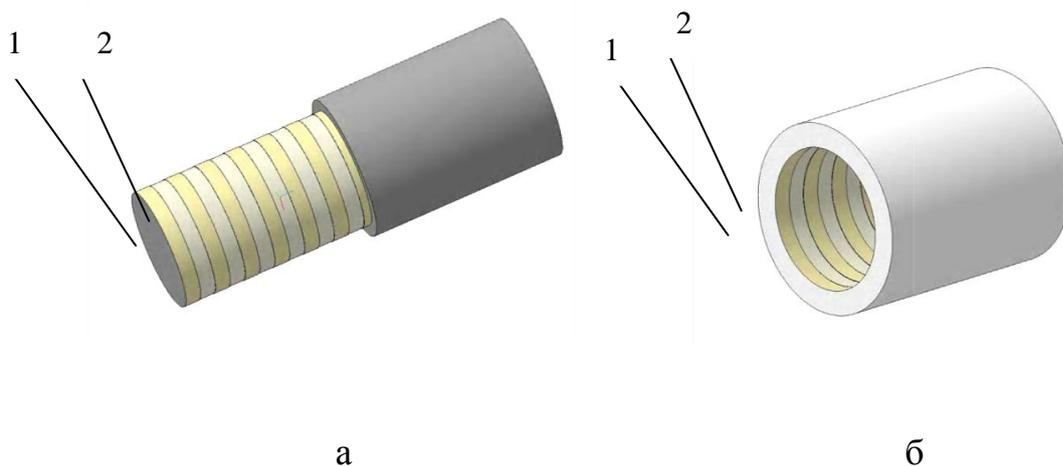


Рис. 2 – Поверхности вала (а) и втулки (б) с кольцевыми участками электроэрозионных покрытий: 1 - твердым сплавом группы ВК или ТК; 2 – никелем

В сформированном таким образом поверхностном слое прочность, надежность и долговечность неподвижного соединения обеспечивается покрытием, состоящим из поверхностей кольцеобразных участков, сформированных последовательным нанесением никеля и твердого сплава ВК или ТК (участки 1, рис. 2). В данном случае образуется покрытие с твердым, износостойким и имеющим высокий (0,3-0,7) коэффициент трения поверхностным слоем под которым находится слой, микротвердость которого ниже микротвердости основы. При сборке твердый поверхностный слой вминается в мягкий нижележащий слой, однако герметичность соединения при этом не обеспечивается.

Герметичность неподвижного соединения обеспечивает покрытие, состоящее из поверхностей кольцеобразных участков никеля, микротвердость которого ниже микротвердости основы (участки 2, рис. 2).

Ниже приведен пример выполнения способа обработки сопряженных поверхностей для деталей из высокопрочного чугуна ВЧ 60.

ЭЭЛ образцов высокопрочного чугуна ВЧ60 (10x10x8 мм) осуществлялось в воздушной среде на установке с ручным вибратором модели «Элитрон 22А». При этом легирование проводилось в течение 1,5 мин с использованием 6-го режима ($U_{x.x.} = 77$ В; $I_{к.з.} = 2,4-2,8$ А; $C = 300$ мкФ).

В качестве электродных материалов использовались: никель (Ni) и твердый сплав ВК8. Кроме этого наносились комбинированные электроэрозионные покрытия состава: никель + ВК8.

Для исследования структуры и измерения микротвердости поверхностного слоя использовали шлифы образцов после ЭЭЛ. После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2» и растровом электронном микроскопе-анализаторе «РЭМ – 106 И» Сумского ПО "Электрон», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности.

Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,5 Н.

В результате металлографических исследований установлено, что сформированные покрытия состоят, как правило, из двух слоев. Вверху расположен «белый» слой. Ниже располагается переходной слой, более темного цвета. Иногда присутствует третий слой – зона термического влияния.

При электроэрозионном легировании ВЧ 60 никелем формируется поверхностный слой толщиной до 70 мкм, микротвердость которого составляет 2200-2760 МПа. Ниже располагается переходной слой, который является результатом совместного действия процессов диффузии и термического влияния. Микротвердость этого слоя составляет 4290 – 5260 МПа.

При электроэрозионном легировании ВЧ 60 твердым сплавом ВК8 формируется поверхностный слой толщиной до 30 мкм, микротвердость которого составляет 5790 – 10300 МПа. Ниже располагается переходной слой с микротвердостью 4900 МПа.

При последовательном нанесении слоев из никеля и твердого сплава ВК8 микротвердость в поверхностном слое, глубиной до 20 мкм, составляет 11830 МПа. Ниже расположен переходной слой, толщиной 65-85 мкм с микротвердостью 2200 МПа, в нижней части которого, в результате термического влияния микротвердость повышается до 3560-4580 МПа.

Аналогичное распределение микротвердости и при электроэрозионном легировании стали 45 никелем и твердым сплавом ВК8.

Результаты распределения микротвердости по глубине слоя образцов из высокопрочного чугуна и стали 45 сведены в табл. 2.

Таким образом, предложенный новый способ обработки обеспечивает формирование на контактирующих поверхностях стальных и чугунных деталей специальных покрытий структура которых способствует повышению надежности, долговечности и герметичности неподвижных соединений.

Таблица 2 – Свойства электроэрозионных покрытий на высокопрочном чугуне и стали 45

Материал основы	Материал электрода	Толщина, мкм		Микротвердость, МПа	
		Белый слой	Переходной слой	Белый слой	Переходной слой
ВЧ 60*	Ni	до 70	10	2200-2760	4290-5260
ВЧ 60	ВК8	25-30	15	5790-10300	4900
ВЧ 60	Ni +ВК8	20	65-85	11830	2200-4580
Ст 45**	Ni	25	10	2000	2500
Ст 45	ВК8	20	10	11000	3500
Ст 45	Ст 45	15	60-70	10000	2000-5750

* - микротвердость материала основы $H_{\mu} = 2900 - 3100$ МПа;

** - микротвердость материала основы $H_{\mu} = 2700 - 2800$ МПа.

Особенность прессовых соединений состоит в том, что детали этих соединений еще до приложения рабочих нагрузок находятся в напряженном состоянии, вызванном наличием натяга на посадочных поверхностях. Суммирование рабочих напряжений и напряжений от натяга может привести к их значительной концентрации в отдельных местах сопряжения. Снижение предела выносливости вала в подступичной части происходит под торцами ступицы в результате концентрации напряжения и процесса фреттинг-усталости. Уменьшить влияние этих факторов можно путем снижения общей жесткости ступицы, и в особенности, у ее торцов, например, путем запрессовки по торцам ступицы колец из более мягкого материала в выполненные на посадочном диаметре прямоугольные канавки [8].

Результаты испытаний показали, что предел выносливости образцов диаметром $d = 20$ мм из стали 40Х со ступицами диаметром $D = 37$ мм и длиной 90 мм, имеющими кольца из красной меди М2, повысился при чистом изгибе с частотой 50 Гц в 2 раза (с 150 до 300 МПа).

Нами для повышения усталостной прочности валов прессовых соединений, предлагается на внутреннюю поверхность ступицы наносить,

методом ЭЭЛ у ее торцов кольцеобразные покрытия из более мягких материалов шириной 5-10 мм. В качестве материалов электродов можно рекомендовать медь и оловянную бронзу, что позволяет формировать на стальной поверхности покрытия со сплошностью до 100%.

В предлагаемом варианте появляется возможность использования и такого конструктивного приема, как закругление внутренних торцов ступицы, обеспечивающего также снижение ее жесткости. Кроме того, к преимуществам предлагаемого способа можно отнести экономию цветных металлов, а также упрощение технологии изготовления ступицы.

Следует отметить, что лучшее качество покрытия (сплошность, шероховатость, равномерность и др.) достигаются при использовании в качестве защитной среды аргона.

Следующий вариант увеличения усталостной прочности валов, а также повышения надежности и долговечности прессовых соединений, заключается в том, что подступичную поверхность вала подвергают цементации методом электроэрозионного легирования. После чего этим же методом на цементированный слой наносят мягкий антифрикционный материал, например медь или серебро и обрабатывают его методом поверхностного пластического деформирования обкаткой шариком, роликом или безабразивной финишной обработкой (БУФО).

Толщину нанесенного слоя из мягкого антифрикционного материала можно регулировать за счет режима ЭЭЛ, способа нанесения и материала электрода. Радиус перехода (галтели) на участке от утолщенной части вала к обычному диаметру можно формировать как за счет снижения энергии разряда (переноса меньшего количества материала с электрода на деталь), так и за счет повышения усилия обкатки.

При сборке ступицы и вала, мягкий антифрикционный материал, находясь между твердой поверхностью ступицы и твердым, сформированным в результате цементации методом ЭЭЛ подслоем вала, будет деформироваться, заполняя все поры, микронеровности и несовершенства поверхностей

сопрягаемых деталей. В результате этого значительно увеличивается площадь сопрягаемых поверхностей ступицы и вала, в следствие чего возрастает герметичность соединения, а также сила трения при сдвигающих и скручивающих нагрузках, что в конечном итоге повышает надежность и долговечность соединения.

В связи с тем, что в процессе работы прессовые соединения выходят из строя преимущественно по причине ослабления натяга (износа контактирующих поверхностей деталей вследствие фреттинг-коррозии, либо повреждения в результате разборки), то при ремонте таких соединений актуальной задачей становится поиск наиболее эффективных методов их восстановления.

В последнее время в ремонтном производстве находят все большее применение новые технологии ремонта оборудования с помощью полимерных композиций, которые обладают следующими свойствами [9]: хорошей адгезией с металлом; близкими к металлу деформационными характеристиками; незначительным изменением свойств с изменением температуры; минимальной усадкой при отвердевании; стойкостью к воздействию внешних факторов; отсутствием внешних выделений, воздействующих на металл; минимальной подготовкой поверхности; отвердеванием без давления и без повышенных температур; длительным сроком эксплуатации без изменения механических свойств; экологической безопасностью.

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

Учитывая характерные особенности метода ЭЭЛ: материал анода (легирующий материал) может образовывать на поверхности катода (легируемая поверхность) чрезвычайно прочно сцепленный с поверхностью слой покрытия; в этом случае не только отсутствует граница раздела между нанесенным материалом и металлом основы, но происходит даже диффузия элементов анода в катод; легирование можно осуществлять в строго указанных

местах, не защищая при этом остальную поверхность детали, а также то, что варьируя режимами легирования, можно в широких пределах изменять шероховатость поверхности (R_z) от 1 до 200 мкм, можно с уверенностью сказать, что резервом повышения качества неподвижных соединений, в особенности на стадии ремонта, может быть интегрированная технология, включающая в себя метод электроэрозионного легирования и нанесение полимерных материалов. В данном случае отдельно взятые технологии (ЭЭЛ и нанесение полимерных композиционных материалов) 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 ЭЭЛ после нанесения полимерного материала, заполняющего пустоты между микронеровностями поверхности, будет иметь 100% сплошность и значительно низшую шероховатость, чем без дополнительной обработки, а также большую твердость и износостойкость, чем при использовании полимерных композиций самостоятельно.

Выводы

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для существенного повышения качества прессовых соединений (увеличения несущей способности, повышения герметичности соединения и прочности валов, снижения фреттинг-коррозии) в последнее время широкое развитие получило направление, связанное с введением в зону контакта мягких и твердых прослоек.

2. Резервом повышения качества неподвижных соединений, особенно на стадии их ремонта, может быть интегрированная технология, включающая в себя метод электроэрозионного легирования и нанесение полимерных материалов.

Список использованных источников:

1. Зуев А.А., Гуревич Д.Ф. Технология сельскохозяйственного машиностроения. М.: Колос, 1980,- 256с.
2. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов.- М.: Машиностроение, 1989.- 496 с.
3. Иосилевич Г.Б. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов.- М.: Машиностроение, 1988.- 368 с.
4. Гузенков П.Г. Детали машин: М.: Высшая школа, 1982.- 352 с.
5. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей.- М. Машиностроение, 1976.- 46 с.
6. Спосіб обробки сполучених поверхонь деталей (варіанти): Пат. 66105. Україна. МПК В23Н 1/00 /Марцинковський В.С., Тарельник В.Б.; Опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.-3 с.
7. Способ обработки сопрягаемых поверхностей стальных и/или чугунных деталей: Пат. 2410212. Российская Федерация. МПК В23Н 9/00 / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Коноплянченко Е.В., Олейник И.А.; Опубл. 27.01.11, Бюл. № 3.-7 с.
8. Л.Т. Балацкий. Прочность прессовых соединений. К.: Техніка, 1982. – 151 с.
9. А.А. Ищенко. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами.- Мариуполь: ПГТУ, 2007.- 250 с.

Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Белоус А.В., Павлов А.Г.
«Проблемы и перспективы повышения качества неподвижных соединений».

Проведен анализа проблем и существующих методов повышения качества неподвижных соединений. Для повышения качества неподвижных соединений, особенно на стадии их ремонта, предложена интегрированная

технология, включающая в себя метод электроэрозионного легирования и нанесение полимерных материалов.

Ключевые слова: неподвижное соединение, качество, электроэрозионное легирование, полимерные композиции, ремонт, слой, твердость, герметичность, прочность.

Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Белоус А.В., Павлов А.Г.
«Проблеми та перспективи підвищення якості нерухомих з'єднань».

Проведений аналіз проблем і існуючих методів підвищення якості нерухомих з'єднань. Для підвищення якості нерухомих з'єднань, особливо на стадії їх ремонту, запропонована інтегрована технологія, що містить метод електроерозійного легування і нанесення полімерних матеріалів.

Ключові слова: нерухоме з'єднання, якість, електроерозійне легування, полімерні композиції, ремонт, шар, твердість, герметичність, міцність.

Tarelnyk V.B., Martsynkovskyy V.S., Belous A.V., Pavlov A.G. “Problems and prospects of quality increasing of fixed connections”.

The analysis of problems and existent methods of quality increasing of fixed connections is considered. The integrated technology that includes the electric discharge alloying and application of polymeric materials method for quality increasing of fixed connections especially at the repairs stage is suggested.

Key words: fixed connection, quality, electric discharge alloying, polymeric compositions, repair, layer, hardness, tightness, durability.

Стаття надійшла до редакції 6 червня.