

neering) systems.

**Keywords:** automation, dynamic shaping, geometric modeling, machine industry objects, manufacturing processes, polyparameterization method.

Стаття надійшла в редакцію: 17.09.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Гецович Є.М.

УДК 621.9.048

## ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**В. Б. Тарельник**, д.т.н., проф.

**Т. П. Волошко**, ст.преподаватель

**И. Е. Волошин**, аспирант,

Сумский национальный аграрный университет

*Дан анализ одной из наиболее важных и актуальных проблем в машиностроении – повышения надежности тяжело нагруженных деталей в прессовых соединениях. Установлено, что наиболее характерными случаями отказов работы прессовых и прессово-шпоночных соединений являются фреттинг-усталостные повреждения и поломки вследствие усталости.*

*Анализ литературных источников показывает отсутствие единого механизма защиты от фреттинг-коррозии. Установлено, что фреттинг-коррозию деталей можно уменьшить или полностью исключить, изменяя качественные параметры их поверхностных слоев, например, нанесением коррозионно-стойких защитных покрытий требуемой твердости, толщины и коэффициента трения, прочно соединенных с основой детали и не снижающих их усталостную прочность.*

*Предложен новый способ повышения усталостной прочности валов в прессовых соединениях. Способ осуществляется в защитной среде аргона путем формирования методом электроэрозионного легирования на внутренней поверхности ступицы, у ее торца, кольцеобразного покрытия из меди или оловянной бронзы.*

**Ключевые слова:** прессовое соединение, фреттинг-коррозия, прочность, аргон, покрытие

**Постановка проблемы.** Проблема повышения надежности тяжело нагруженных деталей является одной из наиболее важных и актуальных в машиностроении.

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.

Фреттинг-коррозия наблюдается при различных прессовых посадках на вращающихся валах, в местах посадки лопаток турбин, в шлицевых, шпоночных, болтовых и заклепочных соединениях.

Наиболее перспективно решение этой проблемы за счет привлечения технологических методов, создания благоприятной технологической наследственности, обеспечения параметров качества поверхностного слоя на уровне, соответствующем максимальному повышению требуемой совокупности эксплуатационных свойств.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Неподвижные соединения сопряженных деталей характеризуются невозможностью их взаимного перемещения, которая обеспечивается натягом. Прочность соединения определяется посадкой и качеством точности. Неподвижные соединения могут быть выполнены по прессовым посадкам (гарантированный натяг) или переходным посадкам (натяг или зазор).

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

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.

Изнашивание при фреттинг-коррозии возникает при малых колебательных, циклических, возвратно-поступательных перемещениях с малыми амплитудами.

В результате фреттинг-коррозии снижается усталостная прочность деталей, что может явиться причиной серьезных аварий.

На рис. 1 показаны внутренние поверхности защитной втулки (а) и шейки вала ротора воздушного компрессора 101JT, пораженные фреттинг-коррозией. В результате фреттинг-коррозии в районе шпоночного паза зародилась усталостная трещина (рис. 1, в) которая впоследствии развилась до 180° (рис. 1, г). Благодаря своевременной вибродиагностике авария была предотвращена.

Анализ результатов эксплуатации состав-

ных прокатных валков ряда типоразмеров показывает, что отмечается большое число случаев низкой надежности фиксации бандажа на оси валка в процессе сборки термовоздействием [2]. Это способствовало разработке широкого спектра дополнительных конструктивных, технологических и других видов и средств крепления [3].

Повреждения от фреттинг-коррозии зависят от многих факторов: амплитуды относительного проскальзывания, контактного давления, количества циклов, частоты колебаний, материала и окружающей среды.

Для существенного повышения несущей способности прессовых соединений в последнее

время широкое развитие получило направление, связанное с введением в зону контакта мягких и твердых прослоек [4-8].

Эффективность конкретного покрытия зависит от его толщины [5]. Проведенные опыты показали, что повреждение от фреттинга увеличивалось, если толщина электроосажденного слоя серебра уменьшалась со 125 до 12,5 мкм. Согласно [9] к практическому применению для большинства деталей рекомендуется толщина покрытия в пределах 75-125 мкм, хотя в отдельных случаях были рекомендованы толщины до 300 мкм.

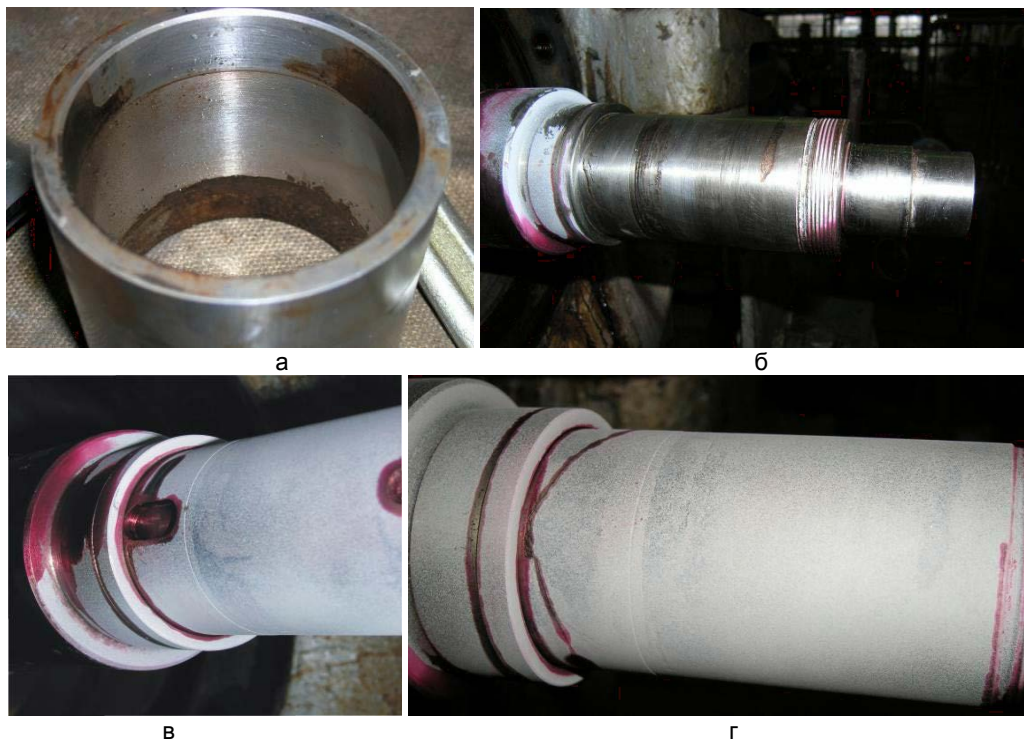


Рис. 1. Фреттинг-коррозия внутренней поверхности защитной втулки (а) и шейки ротора (б); зарождение усталостной трещины в районе шпоночного паза (в) и дальнейшее развитие ее до  $180^{\circ}$  (г).

В [10] автор приводит результаты работ А. Тума и Ф. Вундерлиха, в которых отмечается значительный эффект повышения предела выносливости валов с напрессованными деталями путем цементации. Было установлено, что на предел выносливости образцов диаметром 12 мм с запрессованными втулками влияла поводка их при закалке. После принятия мер против поводки предел выносливости повысился с 137,3 до 412,0 МПа. По данным Э. Лера предел выносливости цементированных образцов диаметром 60 мм в запрессовке повысился более чем в два раза.

Анализ литературных источников показывает отсутствие единого механизма защиты от фреттинг-коррозии. Установлено, что фреттинг-коррозию деталей можно уменьшить или полностью исключить, изменяя качественные параметры их поверхностных слоев, например, нанесе-

нием коррозионно-стойких защитных покрытий требуемой твердости, толщины и коэффициента трения, прочно соединенных с основой детали и не снижающих их усталостную прочность.

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 (рис. 2) [10].

Высота кольца  $t$  должна подбираться с учетом натяга в соединении и передаваемой нагрузки, от которой зависит амплитуда относительного проскальзывания ступицы 1 и вала 3. Наличие в зонах максимальных контактных давлений колец 2 из более податливых материалов сглаживает пик напряжений и уменьшает степень повреждаемости при фреттинг-коррозии.

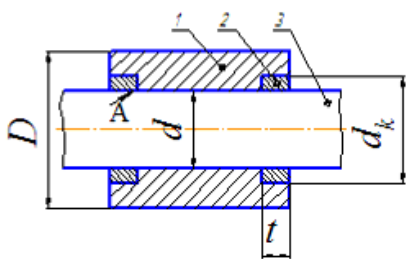


Рис. 2. Прессовое соединение со вставными кольцами: 1 - ступица; 2 – вставное кольцо; 3 – вал.

Результаты испытаний показали, что предел выносливости образцов диаметром  $d = 20$  мм из стали 40X 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).

Далее отмечается, что при значительных нагрузках прессового соединения и недостаточной ширине кольца в результате обминания контактной поверхности кольца торец втулки может переместиться в точку А (см. рис. 2). Если это произойдет, то предел выносливости такого соединения может снизиться по сравнению с сопряжением без колец, так как жесткость ступицы у торцов увеличится.

Предлагаемый новый способ [11, 12] повышения усталостной прочности валов в прессовых соединениях относится к области электрофизической и электрохимической обработки, в частности, к электроэрозионному легированию (ЭЭЛ), и может быть использован для обработки сопрягаемых поверхностей ступиц при сборке неподвижного соединения.

Способом ЭЭЛ можно изменить твердость металлической поверхности:

- **повысить** твердость нанесением на поверхность материала более высокой твердости или диффузионным введением в поверхностный слой необходимых химических элементов из окружающей среды или из материала анода;

- **понижить** твердость, 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 [13].

**Цель исследований.** Целью настоящей работы является повышение усталостной прочности валов прессовых соединений, путем снижения влияния фреттинг-коррозии за счет формирования на внутренней поверхности ступицы методом ЭЭЛ кольцеобразных покрытий из более мягких материалов.

**Методы решения и ожидаемые результаты.** Для достижения поставленной цели, вместо кольца из более мягкого материала, на внут-

реннюю поверхность ступицы, методом ЭЭЛ у ее торца формируют кольцеобразное покрытие шириной 5-10 мм, используя электрод-инструмент из меди или оловянной бронзы при энергиях импульса 0,01-0,5 Дж на воздухе и 0,01–3,4 Дж в защитной среде аргона. При этом, на поверхности ступицы формируется прочный диффузионный слой из меди или оловянной бронзы (рис. 3).

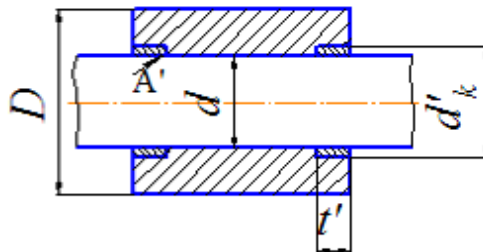


Рис. 3. Ступица с диффузионным слоем меди.

В предлагаемом варианте появляется возможность использования и такого конструктивного приема, как закругление внутренних торцов ступицы, обеспечивающего также снижение ее жесткости (рис. 4).

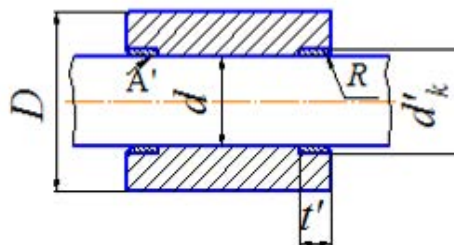


Рис. 4. Ступица с закругленными торцами.

Кроме того, к преимуществам предлагаемого способа можно отнести экономию цветных металлов, а также упрощение технологии изготовления ступицы.

Ниже в табл. 1 приведены режимы работы установки электроэрозионного легирования «УИЛВ-8», а также данные по шероховатости и толщине покрытий из меди и оловянной бронзы на стали 20.

Следует отметить, что начиная с 15 режима, когда энергия разряда составляет 0,56 Дж, электроды как из меди, так и оловянной бронзы, начинают более интенсивно окисляться, что приводит к снижению качества обрабатываемой поверхности.

Повысить качество формируемых слоев при использовании больших энергий разряда можно путем применения защитной среды аргона. Ниже в табл. 2 приведены данные по шероховатости и толщине покрытий из меди и оловянной бронзы в зависимости от энергии разряда, полученные при ЭЭЛ стали 20 на установке модели «Элитрон-52А» в защитной среде аргона.

Таблица 1. Электроэрозионное легирование стали 20 электродами из меди и оловянной бронзы на установке «УИЛВ-8»

№ режима	Емкость, мкФ	Напряжение, В	Энергия разряда, Дж	Толщина слоя, мм		Высота микронеровностей Rz, мм	
				медь	бронза	медь	бронза
1	20	38,5	0,01	0,01	0,01	2	3
3	20	56,1	0,02	0,015	0,02	3	4
6	20	73,6	0,03	0,02	0,03	5	7
8	20	83,4	0,04	0,025	0,04	8	10
9	300	38,5	0,13	0,035	0,05	10	12
11	300	56,1	0,28	0,05	0,07	13	15
12	300	62,8	0,35	0,07	0,08	15	17
13	300	68,7	0,42	0,09	0,11	16	19
14	300	73,6	0,49	0,11	0,13	17	21
15	300	78,6	0,56	0,13	0,15	23	27
16	300	83,4	0,63	0,14	0,17	27	30

ДюрOMETрический анализ показывает, что при легировании стали 20 медью и оловянной бронзой, как на воздухе, так и в среде аргона, микротвердость на поверхности слоя составляет соответственно 850-900 МПа и 1050-1150 МПа. По мере углубления она плавно увеличивается до микротвердости зоны термического влияния

(2500-3000 МПа) и затем переходит в микротвердость основного металла 1750-1800 МПа. Толщина зоны термического влияния зависит от режима легирования и составляет, например, для энергии разряда 0,56 Дж на воздухе 50 мкм, а в среде аргона 40 мкм.

Таблица 2. Зависимость шероховатости поверхности и толщины покрытий из меди и оловянной бронзы от энергии разряда при ЭЭЛ стали 20 на установке модели «Элитрон-52А» в защитной среде аргона

Энергия разряда, Дж	Производительность, мин/см <sup>2</sup>	Толщина слоя, мм		Высота микронеровностей Rz, мм	
		медь	бронза	медь	бронза
0,9	1,0	0,15	0,18	16	18
2,83	0,5	0,17	0,35	23	25
3,4	0,5	0,21	0,53	27	31
6,8	0,5	0,23	1,5	39	67

Выбор предельных значений энергии разряда для нанесения меди и оловянной бронзы обусловлен природой их взаимодействия с деформируемыми твердыми металлами.

Нижний предел энергии разряда ограничивается эффективностью способа. Увеличение энергии разряда выше верхнего предела при нанесении меди или оловянной бронзы на воздухе приводит к более интенсивному окислению, появляются прижоги, что отрицательно влияет на формирование слоев, полученных электроэрозионным способом.

В нейтральной среде аргона окисление практически отсутствует. Однако увеличение энергии разряда до 6,8 Дж приводит к резкому увеличению шероховатости поверхности (см.

табл. 2).

#### Выводы:

1. 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.

2. В качестве материалов электродов можно рекомендовать медь и оловянную бронзу, что позволяет формировать на стальной поверхности покрытия со сплошностью до 100%.

3. Лучшее качество покрытия (сплошность, шероховатость, равномерность и др.) достигаются при использовании в качестве защитной среды аргона.

#### Список использованной литературы:

1. Лебедь В.Т. Технология тепловой сборки составных крупногабаритных деталей / В.Т., Лебедь А.А. Кулаченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2004.- Вып. 28. – С. 84-94.
2. Скигоев П.В. Опорные валки станов холодной прокатки / П.В. Скигоев, А.Д. Петров, А.И. Карманов // Обзоры НИИинформтяжмаш.- М., 1967.- № 1.- С.67.
3. Исследование, усовершенствование конструкции, обработка и внедрение технологии изготовления и восстановления крупных опорных валков. Тема № 143-0655-03, номер гос. Регистрации 0185.0046681 / Рук. темы М.В. Гедеон.- Краматорск, 1988.- 144 с.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника М.: Машиностроение, 1989. – 327с.
5. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия / Уотерхауз Р.Б. Пер. с англ. – Л.: Машиностроение, 1976. –

270 с.

6. Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Братушак М.П. Проблеми захисту деталей гнучких муфт турбокомпресорів від фретінг-корозії // Вісник СНАУ. – Випуск 12, 2004.– с. 89-95.

7. Пат. 66105 Україна, МПК (2006) В23Н 5/00. Спосіб обробки сполучних поверхонь деталей (варіанти) / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б.; заявл. 25.07.2003; опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.

8. Пат. № 2410212 Российская Федерация, МПК В23Н 9/00. Способ обработки сопрягаемых поверхностей стальных или чугунных деталей / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Коноплянченко Е.В., Олейник И.А.; заявл. 24.02.09; опубл. 27.01.11, Бюл. № 3. заявл. 24.02.09; опубл. 27.01.11, Бюл. № 3.

9. Waterhouse R. B., Brook P. A., Lee G. M. C — «Wear», Vol. 5, 1962, p. 235.

10. Л.Т. Балацкий. Прочность пресовых соединений / К.: Техніка, 1982. – 152с.

11. Пат. № 2501986, Российская Федерация, МПК В23Н 9/00. Способ изготовления неподвижного соединения типа вал-ступица стальных деталей (ваоианты) / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Братушак М.П.; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.

12. Пат. 103098 Україна, МПК В23Н 9/00. Спосіб виготовлення нерухомого з'єднання типу вал-маточина сталевих деталей / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б.; Братушак М.П. опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.

13. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей.- М.: Машиностроение, 1976.- 46 с.

### **Тарельник В.Б., Волошко Т.П., Волошин І.Є. Підвищення втомної міцності деталей пресових з'єднань**

*Дан аналіз однієї з найбільш важливих і актуальних проблем в машинобудуванні – підвищення надійності важко навантажених деталей в пресових з'єднаннях. Встановлено, що найбільш характерними випадками відмов роботи пресових і пресово-шпонкових з'єднань є фреттинг-втомні пошкодження і поломки внаслідок втоми.*

*Аналіз літературних джерел показує відсутність єдиного механізму захисту від фреттинг-корозії. Встановлено, що фреттинг-корозію деталей можна зменшити або повністю виключити, змінюючи якісні параметри їх поверхневих шарів, наприклад, нанесенням корозійностійких захисних покриттів необхідної твердості, товщини і коефіцієнта тертя, міцно з'єднаних з основою деталі і не знижуючих їх міцність від втоми.*

*Запропоновано новий спосіб підвищення втомної міцності валів в пресових з'єднаннях. Спосіб здійснюється в захисному середовищі аргону шляхом формування методом електроерозійного легування на поверхні маточини, у її торця, кільцеподібного покриття з міді або олов'яної бронзи.*

**Ключові слова:** пресове з'єднання, фреттинг-корозія, міцність, аргон, покриття

### **V. Tarelnyk, T. Voloshko, I. Voloshin Fatigue strength items press connection**

*The analysis of one of the most important and urgent problems in engineering - increasing the reliability of heavily loaded components in the press connection. It was found that the most typical of the failure of the pressing and pressing and key connection are fretting fatigue damage and breakage due to fatigue.*

*Analysis of the literature shows the lack of a unified mechanism for the protection of fretting corrosion. It is found that the fretting corrosion of parts can be reduced or eliminate by changing their qualitative parameters of surface layers, for example, by applying corrosion resistant protective coatings required hardness, thickness and friction coefficient is firmly connected with the base part and they do not reduce the fatigue strength.*

*A new way to improve the fatigue strength of the shaft in the press connection. The process is carried out in a protective atmosphere of argon by forming by EDM doping on the inner surface of the hub, at its end, an annular coating of copper or tin bronze.*

**Keywords:** press connection, fretting corrosion, durability, argon, coating

Стаття надійшла в редакцію: 11.09.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Подригало М.А.