

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 629.115

### НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ДИСКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАЙКИ

**А.В. ЛЕШОК**

(Молодечненский завод порошковой металлургии, Молодечно);  
канд. техн. наук **Е.В. ЗВОНАРЁВ**, д-р техн. наук, проф. **А.Н. ЛЕОНОВ**  
(Институт порошковой металлургии, Минск)

*Существенный недостаток широко распространенного способа производства фрикционных дисков – соединение фрикционной накладки и стальной основы через промежуточный медный подслоя, создаваемый гальваническим способом. В промышленных условиях это требует применения дорогостоящих очистных сооружений. Разработана технология создания экологически чистого промежуточного подслоя из высокодисперсного порошка меди с размером частиц менее 40 мкм. Промежуточный порошковый подслоя обеспечивает требуемую прочность и высокую адгезию между фрикционной накладкой и стальной основой, осуществляет функцию пластической релаксации нескомпенсированных термонапряжений, эффективный отвод тепловой энергии в процессе эксплуатации фрикционного диска.*

**Введение.** Мировой рост по добыче и переработке природных ресурсов, развитие сельского хозяйства и строительства стимулирует повышенный спрос на автотракторную технику. Любой вид автотракторной техники имеет передаточные и тормозные узлы, основными элементами которых являются фрикционные диски. Наибольшее распространение получили фрикционные диски на стальной основе с нанесёнными фрикционными накладками. Применение дисков такой конструкции обеспечивает высокий ресурс работы фрикционного узла и стабильные эксплуатационные параметры. Мировые лидеры по выпуску автотракторной техники: БелАЗ, МТЗ, Амкодор (Беларусь), Caterpillar (США), Kamatsu (Япония), активно используют фрикционные диски такой конструкции в своих машинах.

Молодечненский завод порошковой металлургии (МолЗПМ) является крупнейшим предприятием по производству изделий фрикционного назначения (более 60 % общего объёма производства в странах СНГ) [1, 6, 7]. Фрикционный диск состоит из трех функциональных элементов: фрикционная накладка, стальная основа и связующий их промежуточный подслоя. Следует отметить, что помимо высоких требований к физико-механическим свойствам стальной основы и фрикционной накладки, высокий ресурс работы фрикционного диска во многом зависит от качества их соединения.

Анализ научно-технической литературы показал, что все способы соединения фрикционного слоя к стальной основе можно разделить на два класса: с применением промежуточного подслоя и без промежуточного подслоя [7, 8].

Наиболее перспективным является способ производства фрикционных дисков с использованием промежуточного подслоя, так как он увеличивает адгезию между соединяемыми поверхностями, что обеспечивает необходимую прочность соединения фрикционной накладки со стальной основой.

Самый распространённый способ получения фрикционных дисков – припекание свободно насыпанного слоя фрикционной шихты на стальную основу через компактный промежуточный подслоя меди, наносимый гальваническим способом. Способ обладает высокой производительностью, возможностью автоматизации и механизации, позволяет изготавливать фрикционные диски относительно большого размера (до 600 мм), получение которых другими способами затруднено. Его используют известные производители фрикционных дисков: МолЗПМ, «Hoerbiger», «Miba» (Австрия), «Valeo» (Франция), «Wellman», «Hawk», (США), Pramet (Чехия). Однако наряду с явными преимуществами этот способ имеет существенный недостаток: одна из операций – процесс гальванопокрытия – является экологически грязной. В промышленных условиях использование её требует дорогостоящих очистных сооружений. Основная проблема такого производства – снижение концентраций тяжёлых элементов в промывных водах, способных оказывать отрицательное воздействие на окружающую среду и здоровье человека.

Наиболее опасными компонентами промывных вод являются ионы металлов (медь, цинк, никель, кадмий, хром, олово), значения ПДК которых достаточно низкие и не превышают 0,01...0,1 мг/л. Наличие ионов меди в промывных водах, например, вызывает образование синильной кислоты, концентрация которой в 0,1 мг/л опасна для окружающей среды [2]. Сложный состав сточных вод требует применения комбинированных методов очистки. Стоимость только одной такой установки составляет 200 тыс. евро. Наряду с загрязнением большого объема промывных вод гальваническое производство загрязняет ток-

сичными соединениями воздух, так как процессу меднения присущи выбросы оксидов азота и углерода, серной и соляной кислот [3].

Кроме того, анализ причин брака в условиях массового производства фрикционных дисков показал, что в 80 % случаев брак связан с низкой прочностью соединения гальванического подслоя меди к стальной основе. На рисунке 1 представлены образцы фрикционных дисков с отслоением фрикционной накладки от основы при внешне качественном слое гальванической меди.



Рис. 1. Образцы бракованных фрикционных дисков

И.М. Федорченко, В.М. Крячек, И.И. Панаиоти отмечают, что наиболее перспективным способом соединения фрикционной накладки со стальной основой является процесс пайки. Так, в 80-х годах прошлого столетия на Броварском заводе порошковой металлургии (Украина) разработан и внедрен процесс пайки прессованной фрикционной накладки к стальной поверхности медно-оловянным припоем. Указанный способ позволил снизить себестоимость фрикционных дисков, повысить прочность соединения фрикционной накладки на 10...15 %, удалить из технологического цикла экологически опасный процесс гальванопокрытия с высокотоксичными промывными водами.

При поиске альтернативных конкурентоспособных способов соединения фрикционной накладки со стальной основой во внимание был принят факт, что в состав фрикционной шихты для обеспечения триботехнических, теплофизических и физико-механических свойств материала фрикционной накладки входят медь, олово, свинец, графит, железо. Наличие меди и олова позволило сформулировать гипотезу о возможности применения диффузионной пайки для соединения фрикционной накладки со стальной основой через пористый промежуточный подслой из мелкодисперсного порошка меди.

Обзор научно-технической литературы по данному вопросу показал, что информация о закономерностях создания пористого промежуточного подслоя из мелкодисперсного порошка меди путем диффузионной пайки с участием расплава олова, инфильтрируемого из фрикционной шихты, а также о закономерностях процессов рихтовки, очистки и активации поверхности стальной основы на сегодняшний день отсутствует. Поэтому повышение адгезии стальной основы и фрикционной накладки путем создания экологически чистого способа создания промежуточного подслоя является актуальной научно-технической задачей в области изготовления фрикционных дисков.

**Постановка задачи.** Целью работы являлась разработка нового высокопроизводительного экологически чистого процесса соединения фрикционной порошковой накладки со стальной основой путем диффузионной пайки с использованием пористого промежуточного подслоя из дисперсного медного порошка для получения фрикционных дисков узлов трения автотракторной техники.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- разработать структуру и состав промежуточного подслоя, оптимизировать его параметры (гранулометрический состав, толщину, состав) исходя из требуемого комплекса эксплуатационных параметров фрикционного диска в целом;

- исследовать и оптимизировать процесс диффузионной пайки, включающий процесс очистки и активации стальной поверхности, исходя из требуемой прочности соединения фрикционной накладкой со стальной основой;

- исследовать состав и физико-механические свойства промежуточного подслоя, получаемого диффузионной пайкой, триботехнические свойства фрикционного диска;

- разработать технологический процесс производства фрикционных дисков с требуемым комплексом эксплуатационных параметров, включающий процесс диффузионной пайки через пористый промежуточный подслой мелкодисперсного порошка меди, и внедрить его на Молодечненском заводе порошковой металлургии.

**Методы исследований.** Исследование гранулометрического состава порошка производилось ситовым анализом по ГОСТ 18318-73, насыпной плотности – по ГОСТ 19440-74. Водородный показатель раствора флюса определялся электронным портативным рН-метром модели «Piccolo-2» (фирма «Хана Инструментс», Португалия); плотность растворов – ареометром АОН-1 ГОСТ 18481-81. Изучение микроструктуры производилось на микроскопе Unimet (ГДР) по ГОСТ 21073.0-75 с увеличением 100...300 раз. Определение микротвёрдости по Викерсу осуществлялось на микротвердомере «Micromet II» фирмы «Buehler» (Швейцария) с нагрузкой 0,5 Н по ГОСТ 9450-76. Исследование элементного состава промежуточного подслоя и фрикционной накладки осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе CamScan (Англия).

Степень очистки стальной поверхности определялась по величине краевого угла смачивания 10 %-ного раствора HCl по геометрическим параметрам профиля капли, определяемым визуально. Степень активности стальной поверхности оценивалось величиной работы выхода электронов методом Кельвина – Зисмана. Исследование шероховатости поверхности осуществлялось с использованием профилографа-профилометра ME-10 (ГДР, Carl Zeiss). Прочность паяного соединения на отрыв определялась методом отрыва штифта. Исследование триботехнических свойств фрикционного диска осуществлялось на машине трения ИМ-58, МИФИ-1.

**Результаты и их обсуждение.** Базой для разработки нового способа соединения фрикционной накладки со стальной основой служит комплекс эксплуатационных параметров, предъявляемых к фрикционным дискам:

- крутящий момент – не менее 3 000 Н·м;
- удельная тепловая нагрузка до 4 МВт/м<sup>2</sup> (4 Вт/мм<sup>2</sup>);
- ресурс работы – не менее 9 000 моточасов.

Показано, что для обеспечения комплекса эксплуатационных параметров промежуточный подслоя независимо от состава и структуры должен обладать следующими физико-механическими свойствами:

- а) пределом прочности на срез ( $\tau$ ) – не менее 3,6 МПа:

$$\tau = \frac{3M}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)}, \quad (1)$$

где  $M$  – крутящий момент, равный 3 000 Н·м;  $R_2$ ,  $R_1$  – наружный и внутренний радиусы фрикционного диска соответственно, м.

Известно, что величина нормальных напряжений на отрыв ( $\sigma$ ) в 1,7...2 раза больше предела прочности на срез плоского соединения. Таким образом, прочность материала фрикционной накладки и прочность паяного шва, полученного в процессе диффузионной пайки должна быть не менее 7,2 МПа;

- б) коэффициентом теплопроводности ( $\lambda$ ) – не менее 16 Вт/(м·К):

$$\lambda = \frac{Q \cdot \Delta x}{\Delta T}, \quad (2)$$

где  $Q$  – мощность теплового потока, равная  $4 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\Delta T$  – разность температур на промежуточном подслое, К;  $\Delta x$  – толщина промежуточного подслоя, м;

в) температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), равным  $(18...20) \cdot 10^{-6}$  1/К, так как ТКЛР для олова, меди, железа составляет соответственно  $22,4 \cdot 10^{-6}$ ,  $16,8 \cdot 10^{-6}$ ,  $14 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>. В этом случае промежуточный подслой может выполнить функцию релаксации нескомпенсированных термонапряжений, возникающих при термоциклировании в процессе эксплуатации [5].

В работе рассмотрены несколько способов создания промежуточного подслоя. Показано, что наиболее перспективным, экологически чистым и производительным, позволяющим реализовать указанный комплекс эксплуатационных параметров является способ создания пористого промежуточного подслоя из мелкодисперсного порошка меди. Помимо того, что пористый порошковый промежуточный подслой сохраняет все достоинства промежуточного подслоя из компактной гальванической меди, он позволяет существенно интенсифицировать транспорт олова из фрикционной шихты к стальной основе, увеличить площадь контакта частиц фрикционной шихты со стальной основой, а также повысить эффективность протекания диффузионных процессов. Промежуточный порошковый подслой способен выполнять функцию, которую в принципе не может выполнить подслой из компактной меди, – функцию «капиллярного насоса», транспортирующего расплав припоя из фрикционной шихты к стальной основе. Кроме того, важнейшим достоинством способа создания пористого промежуточного подслоя является его экологическая чистота и повышенная производительность. Функциональные преимущества пористого порошкового подслоя из мелкодисперсного порошка меди по сравнению с компактным подслоем меди иллюстрирует рисунок 2.

Важнейшими параметрами, обеспечивающими функциональные свойства порошкового промежуточного подслоя, являются гранулометрический состав и толщина. Показано, что для различных типов укладки частиц порошка меди во фрикционной шихте (от кубической до гексагональной) размер частиц порошка промежуточного подслоя не должен превышать 0,25...0,5 диаметра частиц меди фрикционной шихты. Принимая во внимание, что диаметр частиц порошка меди фрикционной шихты 80...100 мкм, диаметр частиц порошка промежуточного подслоя должен быть менее 40 мкм, что легко получить ситовым методом. Показано также, что максимальная толщина промежуточного подслоя не превышает половины диаметра частиц фрикционной шихты (см. рис. 2).

Так как транспорт припоя в случае компактного промежуточного подслоя осуществляется за счёт сил тяжести, а в случае порошкового промежуточного подслоя за счёт капиллярных сил, в работе прове-

дена сравнительная оценка гидростатического и капиллярного давления. Показано, что капиллярное давление, возникающее в процессе диффузионной пайки, превосходит гидростатическое на 4 порядка (физические свойства припоя и структурные параметры промежуточного подслоя:  $\sigma \approx 0,3$  Дж/м<sup>2</sup>,  $\rho \approx 10^4$  кг/м<sup>3</sup>,  $h \approx D/2 = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $d_n \approx 10^{-5}$  м,  $\cos \theta \approx 0,5$ ).

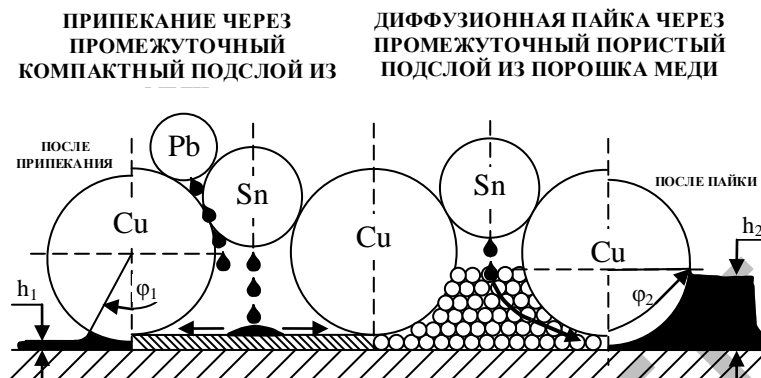


Рис. 2. Структуры компактного и порошкового промежуточного подслоёв

Скорость инфильтрации расплава припоя в пористом промежуточном подслое рассчитывалась по следующей формуле [4]:

$$V = \sqrt{\frac{\Pi \cdot P_k \cdot K}{\eta \cdot \tau}}, \quad (3)$$

где  $\Pi$  – пористость промежуточного подслоя (для свободно насыпанного порошка меди дендритной формы  $\Pi = 0,7$ );  $K = \frac{\Pi \cdot d_n^2}{32B^2}$  – коэффициент проницаемости промежуточного подслоя, м<sup>2</sup>;  $B$  – коэффициент извилистости (для дендритной формы частиц медного порошка  $B > 2,5$ );  $d_n$  – размер пор промежуточного подслоя (при размере частиц порошка меди 20...40 мкм  $d_n \approx 10$  мкм);  $\tau$  – время релаксации краевого угла смачивания ( $\tau \approx 1$  с).

Скорость инфильтрации расплава припоя, рассчитанная по формуле (3), при  $\eta \approx 10^{-2}$  Па·с составляет  $\approx 1$  мм/с.

Таким образом, промежуточный подслоя из мелкодисперсного порошка меди пропитывается припоем за 0,05 с.

Достоинство пористого порошкового подслоя заключается еще и в том, что помимо высокоскоростного транспорта припоя реализуется избирательная инфильтрация расплава олова. К моменту плавления свинца поровое пространство промежуточного подслоя занято расплавом олова. Присутствие свинца нежелательно из-за того, что он снижает прочность и повышает хрупкость промежуточного подслоя, состав которого в конце диффузионной пайки формируется из оловянистой бронзы. Следует отметить, что инфильтрация олова из фрикционной шихты не оказывает влияния на триботехнические свойства фрикционной накладки из-за того, что промежуточный подслоя в 20 раз меньше толщины фрикционной накладки.

Схема расчёта площади контакта частиц фрикционной шихты со стальной основой для промежуточного подслоя обоих типов (компактный и пористый порошковый) поясняется рисунком 2.

Площадь контакта одной частицы меди фрикционной шихты с компактным промежуточным подслоем  $S_1$  определяется при спекании механизмом диффузионно-вязкого течения:

$$S_1 = \pi x^2 = \frac{3\pi D_s \sigma t}{4\eta}, \quad (4)$$

где  $x$  – радиус контактной шейки, м;  $\sigma$ ,  $\eta$  – коэффициент поверхностного натяжения и вязкость расплава, Н/м и Па·с, соответственно;  $t$  – время, с.

Число контактов  $N(h)$  одной частицы меди фрикционной шихты с порошком меди промежуточного подслоя высотой  $h$  равно

$$N(h) = \frac{S_q(h)}{s} \cdot k = \frac{4D_s h}{d^2} \cdot k, \quad (5)$$

где  $S_q(h) = \pi D h$  – поверхность шарового сегмента, м<sup>2</sup>;  $s$  – фронтальная проекция площади медной частицы промежуточного подслоя на поверхность частицы фрикционной шихты,  $s = \pi d^2 / 4$ ;  $k$  – степень

укладки частиц промежуточного подслоя на поверхности частицы фрикционной накладки, равная  $0,785 \dots 0,873$  (для дальнейших расчетов примем  $k = 0,83$ ).

Площадь контакта частицы меди фрикционной шихты с пористым порошковым промежуточным подслоем меди  $S_2$  определяется при диффузионной пайке также механизмом диффузионно-вязкого течения:

$$S_2(h) = \pi x^2 N(h) = \frac{3\pi k \sigma t}{\eta} \cdot \frac{D}{d} \cdot h. \quad (6)$$

Таким образом, отношение площадей контакта  $g$  частиц меди фрикционной накладки с промежуточными подслоями двух типов (пористый порошковый и компактный) определяется следующим выражением:

$$g = \frac{S_2}{S_1} = \frac{4hk}{d} = 1,67 \cdot \frac{D}{d}. \quad (7)$$

Максимальное значение  $g$ , равное  $1,67 \cdot D/d$ , достигается при толщине промежуточного подслоя  $h = D/2$  (большая толщина не реализуется, так как частицы промежуточного подслоя не проникают дальше половины первого слоя фрикционной шихты). На рисунке 3 приведена зависимость параметра  $g$  в зависимости от соотношения диаметров частиц фрикционной шихты и промежуточного подслоя. Площадь контакта может быть увеличена в  $4 \dots 8$  раз по сравнению с удельной площадью контакта частиц фрикционной шихты с компактным гальваническим подслоем меди.

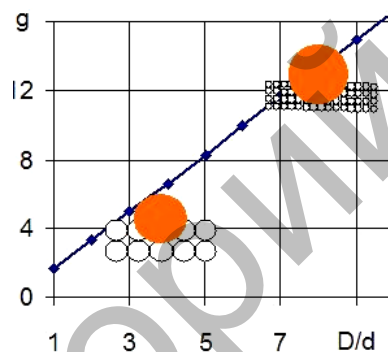


Рис. 3. Зависимость площади контакта от соотношения диаметров частиц фрикционной накладки и промежуточного подслоя

Таким образом, в результате моделирования процесса эксплуатации фрикционного диска разработана структура пористого промежуточного подслоя из мелкодисперсного порошка меди (размер частиц менее  $40 \mu\text{м}$ , толщина  $50 \mu\text{м}$ ). В результате избирательной инфильтрации расплава олова из фрикционной шихты в промежуточный подслоя в процессе диффузионной пайки должен образоваться паяный шов, состоящий из оловянистой бронзы. Паяный шов именно такого состава обеспечит требуемый коэффициент теплопроводности (не менее  $16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) для эффективного отвода тепловой энергии в процессе эксплуатации, а также требуемый ТКЛР ( $(18 \dots 20) \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ), необходимый для пластической релаксации нескомпенсированных термонапряжений, возникающих при термоциклировании в процессе эксплуатации.

Известно, что адгезия паяного шва в значительной степени зависит от эффективности протекания диффузионных процессов на границе промежуточный подслоя – стальная основа, что в свою очередь определяется степенью чистоты контактирующих поверхностей.

Подготовка стальной поверхности к процессу диффузионной пайки включает в себя очистку стальной поверхности от консервационной смазки и её активацию. Критерием чистоты стальной поверхности является краевой угол смачивания  $10 \%$ -ным раствором соляной кислоты.

Установлено, что среди различных способов очистки стальной поверхности (механический, химический, электрохимический, термический) наилучший результат по удалению слоя консервационной смазки достигается при отжиге стальной основы в среде защитно-восстановительной атмосферы водорода в интервале температур более  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . На рисунке 4 приведена зависимость краевого угла смачивания от температуры отжига.

Наименьший краевой угол смачивания  $12 \dots 14^\circ$  достигался при температурах отжига  $400 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Кроме того, важной подготовительной операцией является процесс терморихтовки, необходимый для получения требуемой плоскостности стальной основы. Процесс терморихтовки стальной основы эф-

фактивно реализуется в интервале температур 500...600 °С. Найденные режимы процессов очистки и рихтовки стальной основы позволяют совместить их в температурном диапазоне 500...600 °С.

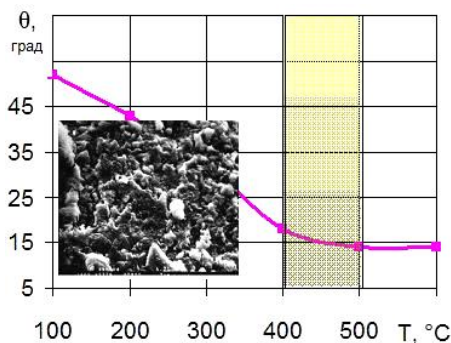


Рис. 4. Изменение краевого угла смачивания поверхности стали 65Г флюсом от температуры термообработки в среде водорода

Следующая подготовительная операция перед диффузионной пайкой – процесс активации, который заключается в удалении оксидной плёнки с поверхности стальной основы. Степень активации поверхности стали 65Г определялась методом Кельвина – Зисмана путём измерения разности работы выхода электронов, однозначно характеризующей наличие оксидной плёнки. В качестве основы флюса выбрана соляная кислота, которая не пассивирует поверхность стальной основы, не создаёт сульфаты и кристаллогидраты железа. Установлено, что процесс активации стальной поверхности 10 %-ным раствором соляной кислоты можно разбить на три стадии: I – растворение оксидной плёнки; II – активирование; III – пассивирование (рис. 5).

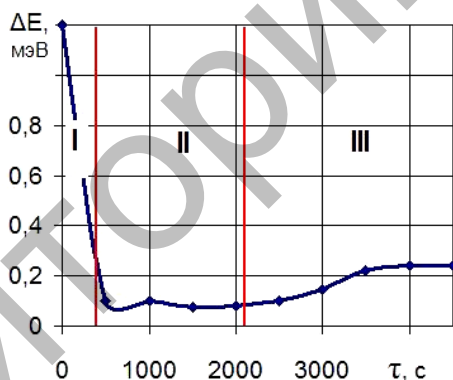


Рис. 5. Зависимость работы выхода электронов от времени с поверхности стали 65Г, обработанной раствором HCl

Для серийного производства фрикционных дисков необходимо, чтобы продолжительность I стадии была минимальна (не более 200 с), а продолжительность II стадии максимальна (не менее 4000 с). Было установлено, что при обработке стальной поверхности 10 %-ным раствором соляной кислоты продолжительность I стадии составила 50...60 с, а II стадии – 1200...2000 с.

Определение изменения разности работы выхода электронов позволило установить, что введение в 10 %-ный раствор соляной кислоты солей хлористого цинка (1...6 %) и хлористого аммония (2...15 %) позволило получить продолжительность II стадии в диапазоне 2000...5000 с. Установлено, что причина существенного повышения продолжительности II стадии (более чем в 2 раза) объясняется созданием в процессе активации на поверхности стальной основы тончайшего слоя цинка, который препятствует появлению окисленной плёнки, являющейся энергетическим барьером при диффузионной пайке. Кроме того, повышение прочности сцепления фрикционной шихты к стальной основе в процессе диффузионной пайки достигается не только за счёт устранения оксидной плёнки, но и за счёт снижения краевого угла смачивания припоем олова. Установлено, что наилучший результат достигается при введении в трёхкомпонентный состав флюса (HCl, ZnCl<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>Cl) двуххлористого олова. Наибольшее увеличение площади растекания капли олова (более чем в 2 раза) достигалось при использовании соли двуххлористого олова (2...10 %). Указанный эффект достигался за счёт плакирования поверхности стальной основы слоем олова.

В работе проведена оптимизация состава флюса для активации поверхности стали 65Г. В качестве параметра оптимизации процесса принят предел прочности на отрыв фрикционной накладки от стальной основы, измеряемый в мегапаскалях. В качестве объекта оптимизации – химический состав четырёхкомпонентного флюса ( $\text{HCl}$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{SnCl}_2$ ). После очистки и активации поверхности стальной основы на неё наносился пористый промежуточный подслои из порошка меди (размер частиц менее 40 мкм, толщина 40...50 мкм), слой фрикционной шихты толщиной 1,8...2,0 мм. Процесс диффузионной пайки осуществлялся при температуре 780 °С в течение 3...4 ч в атмосфере водорода. Процесс активации моделировался уравнением регрессии второго порядка, вид которого после обработки экспериментальных данных методами математической статистики представлен уравнением (8).

$$Y = 8,37 + 0,78X_1 + 0,34X_2 + 0,51X_4 - 0,63X_1X_2 - 1,09X_1X_4 - 0,75X_2X_4 - 1,50X_1^2 - 0,81X_2^2 - 0,32X_3^2 - 0,92X_4^2, \quad (8)$$

где  $X_k$  – нормализованное значение факторов:  $X_1$  – соляная кислота;  $X_2$  – хлористый цинк;  $X_3$  – хлористый аммоний;  $X_4$  – двухлористое олово).

В результате оптимизации установлено, что максимальная прочность на отрыв фрикционной накладки от стальной основы составила 8,4 МПа при следующем составе флюса: 10 % соляная кислота; 4 г/л хлористый цинк; 9 г/л хлористый аммоний; 6 г/л двухлористое олово.

На рисунке 6 приведена зависимость предела прочности на отрыв фрикционной накладки от стальной основы, полученная экспериментальным путём в результате реализации диффузионной пайки, от толщины промежуточного подслоя и его гранулометрического состава при составе флюса, полученного в результате оптимизации.

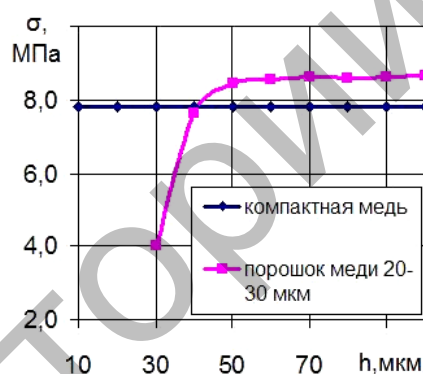


Рис. 6. Зависимость предела прочности на отрыв фрикционной накладки от стальной основы от толщины промежуточного подслоя и его гранулометрического состава

Данные подтвердили, что для промежуточного подслоя из порошка меди с размером частиц 20...30 мкм максимальное значение предела прочности на отрыв фрикционной накладки от стальной основы составило 8,2... 8,5 МПа, что на 10...15 % больше предела прочности на отрыв при использовании промежуточного подслоя из компактной меди (7,8...8,2 МПа). Причём и в том и другом случае отрыв происходил по границе контакта промежуточного подслоя со стальной основой.

Металлографически (рис. 7) установлено:

- 1) паяный шов представляет собой 8...12 % α-раствор олова в меди (бронза) с пористостью 10...15 %;
- 2) размер диффузионной зоны в стальной основе составляет 5...7 мкм в случае пористого порошкового промежуточного подслоя и 3...5 мкм, если имеет место компактный промежуточный подслои;
- 3) в случае компактного промежуточного подслоя на границе со стальной основой присутствуют частицы свинца и графита, которые влияют на прочность сцепления; пористого промежуточного подслоя на границе со стальной основой частицы графита и свинца не обнаружены.

Различие в толщине диффузионной зоны объясняется тем, что при промежуточном подслое из компактной меди атомы олова достигают стальной поверхности, продиффундировав через его толщину (5...15 мкм) через некоторое время, причём их активное проникновение начинается только после достижения температуры 600 °С. В случае промежуточного подслоя из пористой порошковой меди, выполняющего функцию «капиллярного насоса», контакт атомов олова со стальной поверхностью наступает сразу же после плавления олова при температуре 232 °С. Большая продолжительность контакта атомов олова со стальной поверхностью в процессе диффузионной пайки обуславливает большую толщину диф-

фузионной зоны (в 2...2,5 раза), так как коэффициент диффузии атомов олова в стальную основу как более легкоплавкого компонента больше, чем атомов меди.

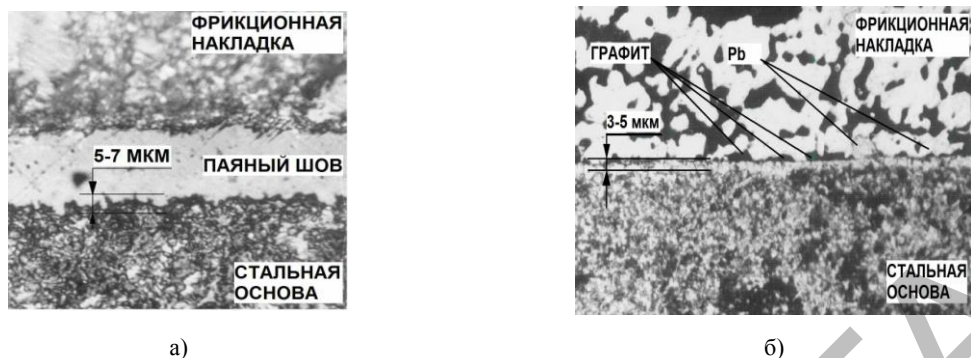


Рис. 7. Граница контакта фрикционная накладка – стальная основа для процесса:  
а – диффузионная пайка; б – спекание

Приведенные рассуждения были подтверждены расчетами коэффициентов диффузии. Показано, что коэффициент диффузии атомов олова и меди в процессе диффузионной пайки для пористого промежуточного подслоя составил величину  $D = 120 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$ , а для компактного промежуточного подслоя  $D = 8 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$ . Превышение коэффициента диффузии в 15 раз подтверждает существенное влияние расплава олова на интенсивность процесса диффузионной пайки.

Так как диффузионная зона в стальной основе толщиной 3...5 мкм в случае компактного промежуточного подслоя обеспечивает требуемый комплекс эксплуатационных параметров, то толщина диффузионной зоны в случае пористого порошкового является избыточной. Однако этот факт можно использовать для интенсификации процесса диффузионной пайки, сократив его без ухудшения эксплуатационных параметров фрикционного диска с 3...3,5 до 2...2,5 ч (табл. 1). Интенсификация процесса диффузионной пайки в свою очередь увеличивает производительность и уменьшает стоимость производства фрикционных дисков.

Таблица 1

Толщина диффузионной зоны в стальной основе  
от типа промежуточного подслоя и времени диффузионной пайки при температуре 780 °С

Продолжительность процесса, ч	Толщина диффузионной зоны, мкм	
	компактный промежуточный подслей	пористый порошкового промежуточный подслей
0,5	< 1 мкм	1,0...1,5
1,0	1,1...1,4	2,0...3,0
1,5	1,6...2,3	3,2...4,1
2,0	2,6...3,5	4,1...4,7
2,5	3,1...4,1	4,9...5,3
3,0	3,7...4,9	5,5...6,3
3,5	4,9...5,2	6,7...7,3

Таким образом, пористый промежуточный подслей по химическому составу представляет собой оловянную бронзу (8...12 % олова). Расчётным путём по формуле Бальшина установлено, что предел прочности на растяжение такой бронзы при остаточной пористости 10...15 % составляет величину не менее 50 МПа. Высокий предел прочности при растяжении промежуточного подслоя объясняет, почему при испытаниях на отрыв фрикционной накладки от стальной основы ( $\sigma = 8,5 \text{ МПа}$ ) разрушение происходит по границе раздела со стальной основой, а не по промежуточному подслою.

Расчетным путем по формуле Оделевского установлено, что коэффициент теплопроводности составляет величину не менее 30 Вт/(м·К).

Как было показано выше, для обеспечения требуемого теплоотовода мощностью  $4 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$  величина теплопроводности должна быть не менее 16 Вт/(м·К).

Коэффициент ТКЛР для оловянистой бронзы, из которой состоит промежуточный подслей, составляет  $18...20 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ .



Установлено, что величина микротвёрдости на границе раздела фрикционная накладка – стальная основа в случае компактного промежуточного подслоя изменяется скачкообразно (на расстоянии 2...3 мкм): от величины 1,2 ГПа для бронзы до 1,9 ГПа для стали, в то время как для пористого порошкового подслоя это изменение имеет более плавный характер (на расстоянии 3...5 мкм). Более плавное изменение физико-химических свойств на границе раздела фрикционная накладка – стальная основа, а также согласованное значение ТКЛР по величине позволяют пористому порошковому промежуточному подслою выполнять функцию пластического релаксатора нескомпенсированных термонапряжений в процессе эксплуатации. Основные отличия способа диффузионной пайки фрикционной шихты на основе меди к стальной основе через пористый промежуточный подслоем из мелкодисперсного порошка меди представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные отличия способа диффузионной пайки фрикционной шихты к стальной основе через пористый подслоем из мелкодисперсного порошка меди

Основные отличия	Компактный промежуточный подслоем	Пористый порошковый промежуточный подслоем
Площадь контакта частиц фрикционного шихты с промежуточным подслоем	1	4...8
Наличие свинца	Присутствует	Отсутствует
Коэффициент диффузии, м <sup>2</sup> /с	$8 \cdot 10^{-16}$	$120 \cdot 10^{-16}$
Продолжительность процесса получения фрикционного диска, ч	3,0...3, 5	2,0...2,5
Толщина промежуточного подслоя, мкм	5...15	40...50
Предел прочности на отрыв фрикционной накладки от стальной основы, МПа	7,8 ... 8,2	8,2...8,5
Экологичность процесса получения фрикционных дисков	Экологически грязный	Экологически чистый

Установлено, что комплекс триботехнических свойств фрикционных дисков (коэффициент трения и интенсивность износа), полученных с использованием компактного и пористого порошкового промежуточного подслоя, не зависит от типа промежуточного подслоя (табл. 3).

Ходовые испытания фрикционных дисков, изготовленных с использованием процесса диффузионной пайки через промежуточный пористый подслоем, проводились на Щучинском ремонтном заводе, Молодечненском райагропромтехснабе, Рогачёвском агросервисе, Лидском агросервисе. Установлено, что по надёжности и ресурсу работы фрикционные диски, изготовленные по новому способу, не уступают фрикционным дискам, изготовленным по традиционному способу.

Таблица 3

Результаты сравнительных испытаний фрикционных дисков на машине трения ИМ-58 и МИФИ-1

Машина трения/тип промежуточного подслоя	Интенсивность изнашивания, мкм/км	Коэффициент трения	
ИМ-58	гальваническая медь	1,4...1,7	0,045...0,049
	порошок меди	1,4...1,7	0,046...0,048
МИФИ-1	гальваническая медь	1,4...1,5	0,041...0,046
	порошок меди	1,3...1,5	0,041...0,045

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать и внедрить технологический процесс производства фрикционных дисков с использованием диффузионной пайки фрикционной шихты к стальной основе через пористый промежуточный подслоем из мелкодисперсного порошка меди (ТП 231.130.01265.00147 «Технологический процесс изготовления фрикционных дисков с паяным соединением накладки и основы») на Молодечненском заводе порошковой металлургии. В условиях этого завода по разработанному технологическому процессу было выпущено 43 тыс. штук фрикционных дисков. Экономический эффект за счёт повышения производительности процесса и снижения себестоимости составил 47,9 млн. руб. Экологический эффект за счёт исключения процесса гальванопокрытия и затрат на переработку сточных вод составил 20 млн. руб.

### Выводы

1. Установлено, что для обеспечения требуемого комплекса эксплуатационных параметров фрикционного диска (крутящий момент 3 000 Н/м; удельная тепловая нагрузка до 4 МВт/м<sup>2</sup>; ресурс работы не менее 9 000 моточасов) перспективным является использование промежуточного подслоя, отличительная особенность которого заключается в том, что он состоит из мелкодисперсного порошка меди, оптимизированные параметры которого: размер частиц – менее 40 мкм, толщина – 50 мкм. Промежуточный подслоя с такой структурой обеспечивает в процессе диффузионной пайки надежное соединение фрикционной накладки со стальной основой за счет повышенной площади контакта частиц фрикционной шихты с частицами промежуточного подслоя (в 4...8 раз), а также избирательной инфильтрации расплава олова со скоростью  $\approx 1$  мм/с (порошковый промежуточный подслоя – «капиллярный насос»), способствующие образованию пластичного промежуточного подслоя из оловянистой бронзы. Теоретически показано, что промежуточный подслоя для обеспечения требуемого комплекса эксплуатационных параметров должен обладать прочностью сцепления не менее 7,2 МПа, коэффициентом теплопроводности не менее 16 Вт/(м·К) и коэффициентом ТКЛР  $(18...20) \cdot 10^{-6}$  1/К).

2. Исследованы режимы диффузионной пайки, направленные на создание оптимальной толщины диффузионной зоны, от размера которой зависит прочность сцепления фрикционной накладки и стальной основы. Установлено, что отличительной особенностью процесса является кинетика образования диффузионной зоны в стальной основе, обусловленной структурой пористого промежуточного подслоя. Высокоскоростная инфильтрация расплава олова к стальной поверхности определяет специфику диффузионной пайки за счёт более выраженной диффузии легкоплавкого компонента – олова в стальную основу, в отличие от преимущественной диффузии меди при использовании промежуточного подслоя из компактной меди, нанесённой гальваническим способом. Исследованные закономерности энергетического состояния поверхности стальной основы по краевому углу смачивания и работе выхода электронов позволили установить, что оптимальный размер диффузионной зоны (5...7 мкм), определяющий прочность сцепления накладки со стальной основой, достигается в результате отжига в среде водорода при 400...500 °С, активации флюсом, оптимальный состав которого: 10 %-ный раствор соляной кислоты, 4 г/л хлористого цинка, 9 г/л хлористого аммония и 6 г/л двухлористого олова, термообработке при температуре 780 °С в течение 3 ч. Было установлено, что специфика диффузионной пайки выражается в различии коэффициентов диффузии олова и меди в стальную основу в 15 раз ( $D = 120 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup>/с и  $D = 8 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup>/с для порошкового и компактного промежуточного подслоя соответственно), обеспечивая тем самым увеличение прочности паяного шва до 14 %.

3. Установлено, что промежуточный подслоя состоит из 8...12 % оловянистой бронзы пористостью 10...15 %. Расчётным путём установлено, что промежуточный подслоя из бронзы обладает высокой механической прочностью (не менее 50 МПа), пластичностью (микротвёрдость не более 1,1 ГПа), теплопроводностью (не менее 30 Вт/м·К), коэффициентом теплового расширения  $((18...20) \cdot 10^{-6}$  1/К), что обеспечивает пластическую релаксацию нескомпенсированных термонапряжений в процессе эксплуатации фрикционного диска, связанной с термоциклированием. Установлено, что комплекс триботехнических свойств фрикционных дисков (коэффициент трения и интенсивность износа), полученных с использованием компактного и пористого порошкового промежуточного подслоя, не зависит от типа промежуточного подслоя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Звонарёв, Е.В. К вопросу пайки фрикционного материала к стальной основе / Е.В. Звонарёв, Г.С. Сыроежко, А.В. Лешок // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – Минск, 2004. – № 4. – С. 69.
2. Шлугер, М.А. Гальванические покрытия в машиностроении: в 2-х т. / М.А. Шлугер. – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
3. Лайнер, В.И. Защитные покрытия металлов / В.И. Лайнер. – М.: Металлургия, 1974. – 172 с.
4. Леонов, А.Н. Пористые проницаемые материалы: Теория проектирования изделий и технологий / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.К. Шелег. – Минск: Тонпик, 2003. – 218 с.
5. Экспериментальное определение остаточных напряжений в соединениях металл-керамика. Bull. Cercle etud metaux, 1993. – Vol. 16, № 7. – P. 2311 – 2318.
6. Гришкевич, А.И. Проектирование трансмиссий автомобилей / А.И. Гришкевич. – М., 1984. – 272 с.
7. Золотарёвский, А.А. Малогабаритные тракторы и мотоблоки [Текст] / А.А. Золотарёвский, В.Г. Роснавлёв, Г.В. Силаев. – Минск, 1986. – 142 с.
8. Забегалов, Г.В. Бульдозеры и скреперы / Г.В. Забегалов, Э.Г. Ронинсон. – М., 1986. – 303 с.

Поступила 27.12.2008