

УДК 621.357

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕДИ

канд. техн. наук **О.В. ШУМОВ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Аналитическим способом исследовано влияние состава и температуры термической обработки защитных покрытий на основе меди на величину напряжений в них. На основе этих данных был выбран оптимальный состав защитного покрытия, а также предложена технология получения защитных покрытий электрохимическим осаждением, позволяющая повысить прочность сцепления защитных покрытий с основой. Реализация этой технологии позволила повысить прочность сцепления защитных покрытий на основе меди по сравнению с гальваническими медными покрытиями более чем в 1,4 раза. Сделано заключение, из которого следует, что увеличение прочности сцепления защитных покрытий на основе меди было достигнуто за счет роста толщины переходного диффузионного слоя. Рост толщины слоя произошел в результате ускорения процессов диффузии легирующих элементов в покрытии.*

**Введение.** Увеличение срока службы деталей позволяет экономить значительные средства и является актуальной задачей для современного производства. Один из эффективных способов решения этой задачи – нанесение защитных покрытий с высокими физико-механическими свойствами [1].

Электрохимическое осаждение по сравнению с другими методами нанесения защитных покрытий позволяет повысить качество поверхности, сократить объем последующей обработки, однако зачастую оно не обеспечивает высоких значений прочности сцепления покрытий с основой [2]. Вместе с тем прочность сцепления с основой является важным эксплуатационным свойством защитных покрытий, обуславливающим в значительной степени скорость их разрушения в процессе эксплуатации деталей. Для повышения прочности сцепления покрытий с основой используются следующие методы: а) согласования свойств материалов покрытий и основы; б) предварительной подготовки поверхности основы перед нанесением покрытия; в) последующей после нанесения покрытия обработки поверхности детали, например, отжиг, пластическая деформация и т.д. [3, 4]. Все эти методы реализуются при послойном осаждении матричных гальванических покрытий и насыщающих слоев с последующим диффузионным легированием в процессе низкотемпературной химико-термической обработки [5, 6]. Однако влияние различных легирующих элементов на эксплуатационные свойства защитных покрытий, получаемых данным способом, изучено недостаточно.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является повышение прочности сцепления с основой защитных покрытий на основе меди за счет осаждения многослойных гальванических покрытий, а также последующего диффузионного легирования в процессе низкотемпературной термической обработки. В соответствии с поставленной целью задача данной работы – исследовать влияние легирующих элементов и режимов получения защитных покрытий на прочность их сцепления с основой.

**Методика эксперимента.** Для исследования влияния режимов нанесения на прочность сцепления с основой на образцы из стали 10 наносились защитные покрытия толщиной 150, 300 мкм. После осаждения покрытия подвергались отжигу при температурах 300, 400, 500 °С в течение 1 часа.

Определение прочности сцепления покрытий с основой производилось методом отрыва конических штифтов. Конические штифты были выполнены с конусностью 20°, при этом конусность отверстий в подложке составляла 21°. Защитные покрытия на основе меди осаждались на подложки со штифтами в собранном виде. Для исключения работы покрытия на срез величина диаметра торца штифтов была выбрана из условия:  $D_{max} < 4(\tau_{cp}/\sigma_{omp})(b/K_T)$ , где  $\tau_{cp}$  – максимальное напряжение среза, МПа;  $\sigma_{omp}$  – нормальное напряжение при отрыве, МПа;  $b$  – толщина покрытия, м;  $K_T$  – коэффициент, учитывающий уменьшение диаметра торца штифта при испытаниях.

**Результаты и их обсуждение.** В процессе термической обработки упрочненных деталей из-за неравномерного термического расширения материалов покрытия и основы в них возникают значительные напряжения. Как показали предварительные исследования, эти напряжения при их неблагоприятном характере могут привести к преждевременному (в том числе на стадии нанесения) разрушению защитного покрытия. Были проведены эксперименты по осаждению защитных покрытий на основе меди на изношенные поверхности шатунных втулок двигателя ЗМЗ-53. При осаждении покрытий толщиной 0,15 мм и более в процессе последующей термической обработки происходило их отслаивание, очевидно, из-за действия возникающих при термическом расширении покрытий растягивающих напряжений, превышающих значения прочности сцепления покрытий с основой.

В большинстве случаев снизить напряжения позволяет согласование физико-механических свойств покрытия и основы [7, 8]. Обеспечение условия согласования покрытия и основы достигается за счет выбора материалов для них с наименьшей разницей физико-механических свойств. Уменьшение этой разницы происходит, в частности, при образовании переходного диффузионного слоя на границе покрытия и основы, что вызывает снижение остаточных внутренних напряжений в этой области детали. К формированию переходного диффузионного слоя на границе покрытия и основы приводит термическая обработка детали с осажденным гальваническим покрытием.

Применение легкоплавкого подслоя позволяет добиться релаксации напряжений, появление которых связано с неравномерными термическими расширениями материалов покрытия и основы при термической обработке детали с покрытием. Для нанесения легкоплавких демпфирующих подслоев применяются различные легкоплавкие металлы, например, цинк, олово, кадмий и т.д. Кроме того, в качестве подслоев возможно использовать покрытия, которые получаются в процессе диффузионного насыщения [9, 10].

При легировании защитных покрытий их физико-механические свойства должны изменяться в требуемом направлении, в частности вызывать снижение температурных напряжений при нагреве. Для подбора легирующих элементов, действующих подобным образом, проводилось сравнение значений коэффициентов температурного расширения медных сплавов различного состава: алюминиевых, бериллиевых, кремнистых, оловянных, свинцовых и хромистых бронз, а также латуней, легированных оловом, свинцом, цинком [11]. По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что большинство используемых легирующих элементов не вызывает снижения коэффициентов температурного расширения медных сплавов до уровня, характерного для стали. Напротив, большинство легирующих элементов вызывает увеличение коэффициентов температурного расширения медных сплавов. Только легирование цинком не приводит к изменению данного показателя, а оставляет его практически на прежнем уровне. Исходя из этого одним из легирующих элементов для получения легкоплавкого демпфирующего подслоя был выбран цинк.

Оптимальный состав покрытия и режимы термической обработки, обеспечивающие получение переходного диффузионного слоя с требуемыми свойствами, подбирались на основании результатов расчета напряжений, возникающих в покрытии при термической обработке деталей с покрытиями.

Определение величины напряжений для различных покрытий и режимов термической обработки производилось методом конечных элементов [12]. В процессе расчета величины напряжений были приняты допущения: 1) при легировании защитного покрытия легирующие элементы равномерно распределяются по толщине; 2) действие стальной основы цилиндрической формы представляется в виде распределенной нагрузки; 3) угловые перемещения на осях симметрии равняются нулю.

Вычисления производились в следующей последовательности.

1. Определение напряжений в защитном покрытии сводилось к решению плоской задачи теории упругости. Защитное покрытие в процессе термической обработки рассматривалось как кольцо, находящееся под действием распределенной нагрузки (рис. 1, а). Анализируемая поверхность кольца была разбита на конечные элементы (рис. 1, б).

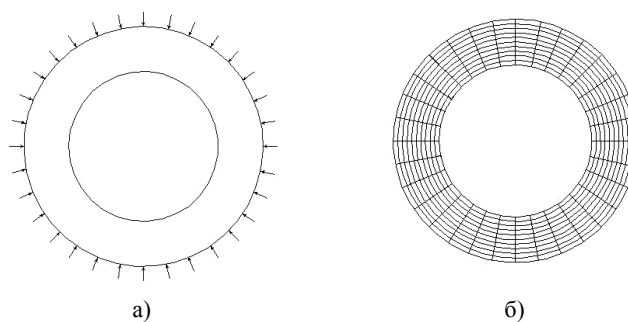


Рис. 1. Схемы нагружения (а) и разбиения тела на конечные элементы (б)

2. Для каждого конечного элемента составлялась матрица жесткости по следующей формуле:

$$[K] = \int [B]^T \cdot [E] \cdot [B] \cdot dV,$$

где  $[B] = [D] \cdot [N]$  – матрица дифференцирования перемещений ( $[D]$  – матричный дифференциальный оператор;  $[N]$  – матрица функций формы);  $[E]$  – матрица внутренней жесткости элемента;  $V$  – объем тела.

Для треугольного конечного элемента функция формы выбиралась в виде следующего выражения:

$$N = (ax + by + c) \cdot 0,5A^{-1},$$

где  $A$  – площадь элемента;  $x$  и  $y$  – координаты точек элемента.

Так как функция формы линейна, то производные от функции формы, а также напряжения и деформации являются постоянными по всей площади конечного элемента.

3. Матрица жесткости конечных элементов объединялась в единую матрицу жесткости тела.
4. Узловые перемещения  $\Delta$  находились путем решения системы уравнений:

$$[K] = [F] \cdot \Delta,$$

где  $[F]$  – матрица сил, приложенных к узлам элементов.

5. В узловых точках определялись напряжения с помощью уравнений теории упругости. Для этого напряжения в узлах определялись как среднее арифметическое напряжений в элементах, сходящихся в рассматриваемых узлах:

$$\sigma = 0,707 \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6\sigma_4^2)^{0,5},$$

где  $\sigma_4 = \sigma_3$ .

Результаты расчета величины напряжений в защитных покрытиях, нанесенных по указанной технологии, приведены на рисунке 2.

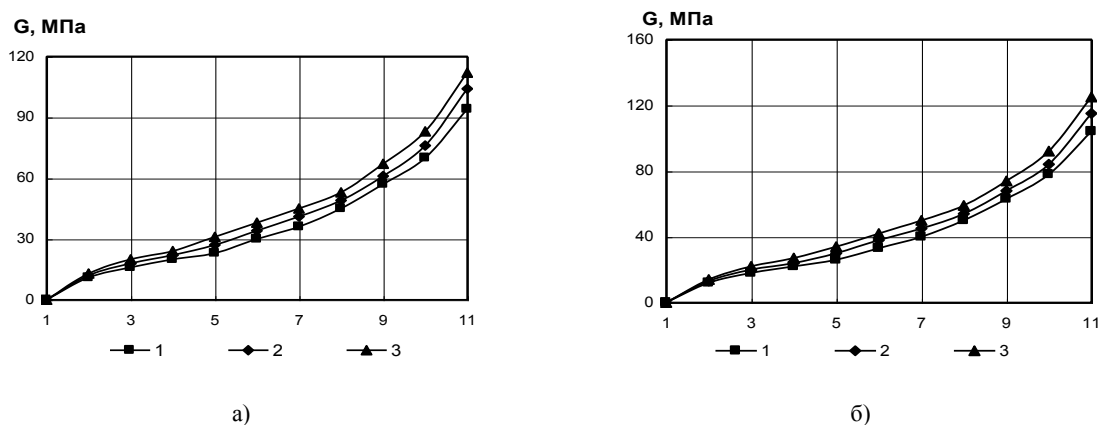


Рис. 2. Распределение напряжений в защитных покрытиях толщиной 0,15 (а) и 0,3 мм (б):  
1 – с никель-цинковым подслоем; 2 – с никелевым подслоем; 3 – без подслоя

На основе анализа полученных результатов можно заключить следующее.

Наибольшие напряжения при отжиге стальных деталей с защитными покрытиями на основе меди возникают на границе покрытие – основа.

Характер распределения напряжений в покрытиях при данной схеме нагружения не зависит от угла поворота (при задании положения анализируемых точек в полярных координатах).

Величина напряжений в гальванических медных покрытиях толщиной 0,15 мм сопоставима со значениями прочности сцепления медных покрытий с основой, а в медных покрытиях толщиной 0,3 мм превышает эти значения более чем в 1,5 раза.

Напряжения в покрытиях на основе меди, легированных цинком, принимают меньшие значения. Величина напряжений в этих защитных покрытиях толщиной 0,15 мм в 1,25, а в защитных покрытиях толщиной 0,3 мм в 1,34 раза меньше, чем у защитных покрытий той же толщины, не легированных цинком.

Таким образом, расчеты показали возможность снижения напряжений в защитных покрытиях на основе меди путем нанесения легкоплавкого подслоя системы никель – цинк с последующим отжигом.

Прочность сцепления защитных покрытий на основе меди с легкоплавким подслоем различного химического состава определялась после отжига. Для выявления характера влияния режимов термической обработки на прочность сцепления образцы с нанесенными покрытиями были подвергнуты отжигу при температурах от 300 до 500 °С в течение часа. В результате опытов было установлено, что прочность сцепления с основой защитных покрытий с никелевым и никель-цинковым подслоем составляет соответственно: 110 и 121 МПа при температуре отжига 300 °С; 128 и 142 МПа – при температуре отжига 400 °С; 137 и 153 МПа – при температуре отжига 500 °С.

На основе анализа микроструктуры защитных покрытий с различными подслоями (рис. 3) можно заключить, что введение включений цинка в подслои обеспечило после термической обработки увеличение толщины переходного диффузионного слоя с 15 до 25 мкм для защитных покрытий с никелевым и никель-цинковым подслоем соответственно.

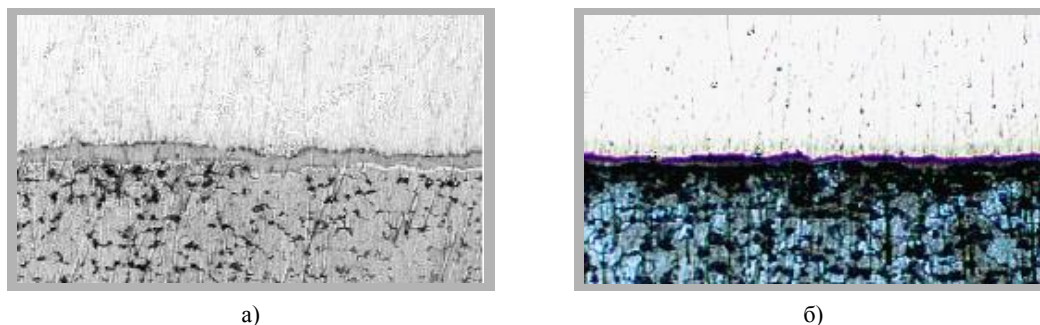


Рис. 3. Микроструктура защитных покрытий:  
с никелевым (а) и с никель-цинковым подслоем (б)  $\times 200$

**Заключение.** При помощи метода конечных элементов определены зависимости величины напряжений в покрытиях на основе меди от их состава и температуры нагрева. У всех покрытий максимальные значения напряжений возникают на границе покрытие – основа. На основании этих результатов для предупреждения отслаивания медных покрытий предложена технология электрохимического осаждения защитных покрытий, включающая нанесение легкоплавкого демпфирующего подслоя. Выявлено увеличение прочности сцепления защитных покрытий на основе меди при нанесении легкоплавких никелевого и никель-цинкового подслоев в 1,33 и 1,51 раза соответственно по сравнению с гальваническими медными покрытиями. То, что прочность сцепления при использовании никель-цинкового подслоя превышает прочность сцепления при использовании никелевого подслоя, очевидно, связано с увеличением толщины диффузионного слоя на границе покрытие – основа при введении легкоплавких включений цинка. Увеличение толщины диффузионного слоя при использовании никель-цинкового подслоя можно объяснить ростом скорости диффузии при введении легкоплавких включений цинка за счет их плавления и образования жидкой фазы в процессе термической обработки защитных покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Preparation of wear resistant coatings by composite deposits / K. Kurosawa [et al.] // *Hyomengijutsu*. – 1990. – Vol. 41, № 11.
2. Елизаветин, М.А. Повышение надежности машин / М.А. Елизаветин. – М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.
3. Архаров В.И. Основные направления развития методов защитных покрытий металлов / В.И. Архаров // *Защитные покрытия на металлах: сб. науч. тр.* – Киев: Наукова думка, 1975. – Вып. 9. – С. 3 – 6.
4. Колачев, Б.А. *Металловедение и термообработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – М.: МИСИС, 2001. – 413 с.
5. Шумов, О.В. Восстановление и упрочнение фильер для производства стеклянного волокна / О.В. Шумов // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2003. – № 11. – С. 4 – 6.
6. Способ получения многослойных электрохимических покрытий на металлах: пат. Респ. Беларусь, МПК С25Д / О.В. Шумов; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № 6677; заявл. 30.03.2000 г. // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2004. – № 4 (43). – С. 156.
7. Вишенков, С.А. Химические и электротермохимические способы осаждения металлопокрытий / С.А. Вишенков. – М.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
8. Знаменски, Г.Н. Связь между диаграммами состояния сплавов металлов основы и покрытия и поляризационными характеристиками металла покрытия / Г.Н. Знаменски, И.А. Цисарь // *Защита металлов*. – 1980. – Т. 6, № 2. – С. 182 – 184.
9. Степанова, Л.И. Получение и некоторые свойства электрохимических антифрикционных покрытий Pb–Sn–Sb и Ni–(MoO<sub>3</sub>)<sub>n</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>m</sub> / Л.И. Степанова, О.Г. Пуровская, Т.В. Мозолева // *Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр. / под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя*. – Минск: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. – С. 409 – 413.
10. Головачев, В.А. Высокопрочные биметаллические соединения / В.А. Головачев. – Л.: Машиностроение, 1974. – 192 с.
11. Проскуркин, Е.В. Диффузионные цинковые покрытия / Е.В. Проскуркин, Н.С. Горбунов. – М.: Металлургия, 1972. – 248 с.
12. ANSYS 5.7 Advanced Analysis Techniques Guide. ANSYS Inc., 2001.

Поступила 29.05.2008