

УДК 621.17

М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, канд. техн. наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

В.К. ШЕЛЕГ, д-р техн. наук; Е.В.ПИЛИПЧУК  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ И ДЕФОРМАЦИОННО ПЛАКИРОВАННЫХ МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Приведены результаты сравнительных испытаний медных покрытий, сформированных методами гальванического осаждения и деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ). В качестве критериев работоспособности приняты количество циклов поперечного изгиба до возникновения отслаивания медного покрытия и поломки образца, а также коэффициент трения скольжения и износ образцов при трении сферического индентора без смазочного материала по плоской поверхности омедненных стальных дисков с твердостью подложки 20, 50 и 70 HRC. При испытаниях на отслаивание при изгибе установлено, что плакированные покрытия не отслаиваются от материала основы даже при поломке экспериментальных образцов, в то время как у образцов с гальваническими покрытиями отслаивание покрытия наблюдалось уже на первом цикле изгиба. По результатам триботехнических испытаний установлено, что медные покрытия, сформированные с использованием обеих технологий, способствуют снижению коэффициента трения скольжения по сравнению с парами трения без покрытия. Однако при критических нагрузках, вызывающих появление задира, гальванические покрытия в большей степени снижают коэффициент трения скольжения, нежели плакированные.*

**Ключевые слова:** медные покрытия, гальваническое осаждение, деформационное плакирование, гибкий инструмент, вращающаяся щетка, трение, износ, коэффициент трения скольжения

**Введение.** В современном машиностроительном производстве широкое применение получили покрытия на основе меди. Их используют, например, для формирования подслоя перед никелированием при формировании многослойных (Cu-Ni-Cr) покрытий, для бурового инструмента, применяемого в нефтегазодобывающей отрасли, с целью предотвращения искрообразования, для защиты отдельных участков стальных деталей от насыщения углеродом при цементации и др. [1, 2]. Также медные покрытия формируют на поверхности сварочной проволоки, которая, по сравнению с неомедненной, обладает лучшими технологическими и эксплуатационными свойствами. В частности, благодаря наличию медного покрытия существенно упрощается процесс сварки стальных изделий. При этом сварочный шов отличается повышенной устойчивостью к механическим ударным нагрузкам, воздействию высоких температур и их резких колебаний, а также увеличенным сопротивлением на разрыв [3]. Вместе с тем, одним из существенных недостатков сформированного покрытия на проволоке является сравнительно невысокая прочность сцепления медного слоя с ее поверхностью. По этой причине во время подачи проволоки, при контакте с подающими роликами сварочного аппарата и в результате трения в каналах, происходит отшелушивание меди, каналы забиваются, и проволока в зону сварки подается неравномерно, что приводит к потере устойчивости горения дуги, следовательно, к ухудшению качества сварного шва [4].

Для формирования медных покрытий наиболее широкое применение получили технологии гальванического осаждения. Однако подобные технологии представляют серьезную проблему для окружающей среды и здоровья обслуживающего персонала. Их вредность связана, прежде всего, с необходимостью дорогостоя-

щей очистки и последующей качественной утилизацией отработанных электролитов. Кроме того, как, например, при меднении сварочной проволоки, для реализации процесса меднения требуются большие производственные площади (250...280 м<sup>2</sup> для установки одного агрегата меднения), что приводит к нерациональному использованию земельных ресурсов [5].

В этой связи, разработка способов формирования покрытий и устройств для их реализации, позволяющих исключить экологически вредные и трудоемкие операции гальванической обработки, является весьма актуальной задачей.

В последние годы для формирования различных функциональных покрытий все более широкое применение получает способ деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ), где в качестве гибкого инструмента используется вращающаяся металлическая щетка (ВМЩ) с проволочным ворсом, а покрытие на поверхности обрабатываемой детали формируется за счет переноса ворсом щетки частиц дополнительно контактирующего с ней компактированного металлического или полимерного материала (донора) [6, 7]. Сформированное покрытие обладает высокой прочностью сцепления с основой, что позволяет предположить возможность его использования для формирования медных покрытий, в том числе и для меднения проволоки. Кроме того, по сравнению с гальваническими технологиями, технология ДПГИ обладает невысокой энерго- и трудоемкостью, экологически безопасна и может быть реализована с использованием практически любого металлообрабатывающего станка.

Технология по способу ДПГИ прошла успешную апробацию при решении задач, связанных с необходимостью сокращения периода приработки и повышения износостойкости деталей узлов трения металлургиче-

ского оборудования (штоков гидроцилиндров, плунжеров, различных осей, цапф валов, пальцев сепараторов и цепей, и др.) [8]. В станкостроении – для предотвращения задиров на трущихся поверхностях клиньев и поперечин станков, чугуновых гильз цилиндров компрессоров, насосов, двигателей, снижения трения в направляющих скольжения и улучшения плавности хода подвижных узлов станков [9, 10]. Однако, несмотря на большое количество публикаций, мы не располагаем сравнительными данными о критериях работоспособности медных покрытий, сформированных с использованием обеих технологий, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

**Целью настоящих исследований** является определение и сопоставление критериев работоспособности медных покрытий, сформированных с использованием технологий гальванического осаждения и деформационного плакирования гибким инструментом, для оценки их технологических возможностей.

**Методика исследований.** Для проведения испытаний были подготовлены образцы в виде прямоугольных пластин, изготовленных из стали 08кп, размером 20×70×1 мм, а также диски, изготовленные из стали 45, с твердостью поверхности HRC 20 и HRC 50, и твердого сплава ВК8 (HRC 70), диаметром 70 и толщиной 6 мм, подвергнутые последующей шлифовке до  $Ra = 0,63$  мкм. На плоских поверхностях пластин и дисков методами гальванического осаждения и ДПГИ формировали медные покрытия. При гальваническом осаждении образцы предварительно подвергались ультразвуковому обезжириванию и кислотному травлению, после чего в кислой гальванической ванне меднения осаждалась медь. Толщина слоя покрытия составляла 6–7 мкм. При формировании покрытия методом ДПГИ использовали цилиндрическую щетку с проволочным ворсом (200×10×22 мм), с диаметром и вылетом ворса соответственно 0,2 и 60 мм. Линейная скорость вращения щетки варьировалась от 20 до 35 м/с, значение величины натяга ворса щетки – 1,2..4,0 мм, число проходов – 5..12. Толщина сформированного слоя покрытия находилась в пределах 6..8 мкм. Необходимость варьирования режимных параметров процесса плакирования обусловлена тем, что, как показывает практика, твердость материала основы в значительной степени предопределяет выбор рациональных режимов плакирования.

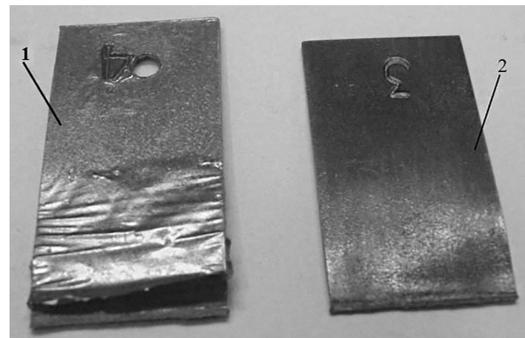
В ходе испытаний экспериментальные образцы прямоугольных пластинок с покрытием и без покрытия подвергали циклическому поперечному знакопеременному изгибу на угол 70°. При этом фиксировали число

циклов до момента начала отслоения покрытия и полной поломки образца.

Диски с покрытием и без покрытия подвергали сравнительным испытаниям на трение и изнашивание на машине трения одностороннего вращения, реализующей трение сферического индентора по плоской поверхности диска. Радиусы сфер инденторов, изготовленных из стали 40X (HRC 43...45), составляли 1000, 500 и 25 мм. Испытания проводили в режиме «сухого трения» (без смазочного материала) при удельных нагрузках от 8 до 93 МПа. Скорость вращения диска составляла 7,3 мин<sup>-1</sup>, относительная скорость скольжения индентора по диску составляла 0,011...0,019 м/с. В ходе испытаний регистрировали коэффициент трения скольжения ( $f_{тр}$ ) между трущимися образцами, а также износ индентора и диска, определяемый весовым методом, т. е. по величине убыли массы. Время испытаний варьировалось от 50 до 70 мин для обеспечения пути трения, соответствующего 45 м.

В качестве критериев работоспособности приняты количество циклов поперечного изгиба до возникновения отслаивания медного покрытия и поломки образца, а также коэффициент трения скольжения ( $f_{тр}$ ) при трении сферического индентора по плоской поверхности омедненных стальных дисков и износ образцов после испытаний.

**Результаты и их обсуждение.** Испытания прямоугольных пластин с покрытием и без покрытия на отслоение покрытия при циклическом знакопеременном изгибе показали (таблица 1), что плакированные образцы не имели отслоений и вздутия покрытия даже при поломке образца (рисунок 1), в то время как у образцов с гальваническим покрытием отслоение покрытия наблюдалось уже на половине цикла изгиба.



**Рисунок 1** – Фото поверхности экспериментальных образцов прямоугольных пластинок после испытаний на циклический знакопеременный изгиб: 1 – с гальваническим покрытием, 2 – с плакированным покрытием

**Таблица 1** – Количество циклов поперечного знакопеременного изгиба экспериментальных образцов пластин

№ п/п опыта	Без покрытия	Без покрытия, обработан щеткой	С плакированным покрытием		С гальваническим покрытием	
	кол-во циклов	кол-во циклов	отслоения	кол-во циклов	отслоения	кол-во циклов
1	20	17	нет	13	0,5	12
2	16,5	17		14	0,5	14
3	19	18		18	0,5	13
4	17,5	17		16	0,5	20
Ср.	18,25	17,25		15,25		14,75

Таблица 2 — Микротвердость поверхности экспериментальных образцов пластинок из стали 08кп (HV<sub>0,1</sub>, МПа)

Без покрытия	Обработанная щеткой без нанесения покрытия	С плакированным медным покрытием	С гальваническим медным покрытием
156,0	289	212,0	143

Кроме того, в ходе испытаний было установлено, что образцы пластинок с плакированным и гальваническим покрытием, а также образцы, обработанные щеткой без нанесения покрытия, имеют несколько меньшие (от 5 до 24 %) значения количества циклов изгиба до поломки образца по сравнению с необработанными образцами. По-видимому, на снижение количества циклов изгиба образцов, обработанных щеткой без нанесения и с нанесением покрытия, оказывает влияние упрочнение поверхности образцов, обусловленное ударно-фрикционным воздействием ворса щетки, в процессе обработки, приводящее к увеличению микротвердости поверхности (таблица 2) и снижению запаса пластичности.

У образцов с гальваническим медным покрытием снижение количества циклов изгиба, возможно, связано с водородным охрупчиванием, обусловленным спецификой процесса гальванического осаждения меди.

Результаты триботехнических испытаний показали, что медные покрытия, сформированные на экспериментальных образцах дисков с использованием технологий гальванического осаждения и ДППИ, по сравнению с образцом без покрытия, способствуют снижению коэффициента трения скольжения (рисунок 2). Однако при повышении удельных нагрузок гальванические покрытия в большей степени обеспечивают подобное снижение, нежели плакированные. Так, при нагрузке 8 МПа (см. рисунок 2 а) медные покрытия, сформированные с использованием обеих технологий, вне зависимости от твердости поверхности основы, обеспечили меньшие значения величин  $f_{тр}$ , по сравнению с образцом без покрытия. В частности, плакированное медное покрытие, сформированное на образцах из твердого сплава ВК8, обеспечило минимальную величину  $f_{тр}$  на всем пути трения. Среднее значение  $f_{тр}$  составило 0,12, при максимальном разбросе  $f_{тр}$  от средних значений, равном 0,6. У аналогичного образца с гальваническим медным покрытием, а также без покрытия, среднее значение величины  $f_{тр}$  составило соответственно 0,17 (разброс 0,7) и 0,19 (разброс 0,7). Однако по истечении 20...25 мин на дорожках трения обоих образцов возникли задиры, повлекшие резкое увеличение  $f_{тр}$  до 0,24 к концу цикла испытаний.

При этой же нагрузке медные покрытия, сформированные на образцах из стали 45, с твердостью поверхности основы 50 HRC, также обеспечили меньшие значения величин  $f_{тр}$ , по сравнению с образцом без покрытия. Средние значения величин  $f_{тр}$  у образцов с плакированным и гальваническим медным покрытием составили, соответственно, 0,17 (разброс 0,6) и 0,1 (разброс 1,1). Однако у образца с плакированным покрытием спустя 33 мин после начала испытаний наблюдалось возникновение задира. У аналогичного образца без покрытия — через 12 мин после начала испытаний. При этом  $f_{тр}$  у образца без покрытия вырос до значения 0,96 к концу цикла испытаний.

При испытаниях образцов дисков с невысокой твердостью поверхности основы (HRC 20) медные

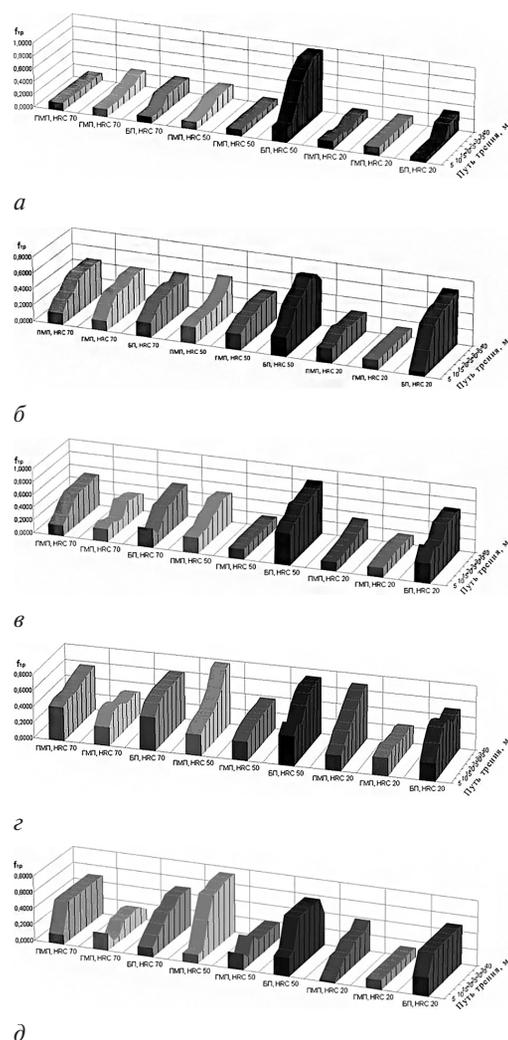


Рисунок 2 — Зависимости коэффициента трения скольжения ( $f_{тр}$ ) от нагрузки при трении сферического индентора по плоской поверхности омедненных дисков с различной твердостью материала основы: а — 8 МПа; б — 16 МПа; в — 24 МПа; з — 32 МПа; д — 93 МПа (ГМП — гальваническое медное покрытие, ПМП — плакированное медное покрытие, БП — без покрытия)

покрытия, сформированные на поверхности дисков с использованием обеих технологий, также позволили уменьшить  $f_{тр}$ , по сравнению с образцом без покрытия. Средние значения величин  $f_{тр}$  для плакированных и гальванических покрытий составили 0,1 (разброс 0,96) и 0,13 (разброс 0,2) соответственно. При этом возникновение задира не наблюдалось. В то же время у образца без покрытия через 40 мин после начала испытаний возник задр, повлекший увеличение  $f_{тр}$  с 0,06 до 0,24 и последующий его рост до 0,29 к концу цикла испытаний.

При увеличении удельной нагрузки до 16 МПа (см. рисунок 2 б) процесс трения скольжения индентора по поверхности дисков как с медным покрытием, сформированным с использованием обеих технологий, так и без покрытия, сопровождался стабильным возникновением задира на дорожке трения практически у всех образцов, кроме образца с гальваническим покрытием на «мягкой» (HRC 20) основе. При этом медные покрытия, сформированные на поверхностях образцов дисков из твердого сплава имели практически идентичные  $f_{тр}$  и время, по прошествии которого возник задр. То же наблюдалось и при испытаниях образцов дисков с твер-

достью поверхности основы 50 HRC, однако образцы с медным покрытием имели меньшие значения величин  $f_{тр}$ , чем у образца без покрытия.

При этой нагрузке из всех образцов лучшие результаты показало гальваническое медное покрытие, сформированное на поверхности дисков с твердостью основы 20 HRC. В ходе испытаний этих образцов возникновение задира не наблюдалось, а значение величины  $f_{тр}$  не превышало 0,12 (разброс 0,4).

При последующем увеличении нагрузки с 24 до 93 МПа на дорожках трения испытываемых дисков стабильно возникали задиры, сопровождаемые ростом значений  $f_{тр}$ . Однако значения величин  $f_{тр}$  у образцов с гальваническим медным покрытием были в среднем на 50...65 % меньше, чем у образцов с плакированным покрытием и образцов без покрытия. Это объясняется тем, что гальванические медные покрытия, по сравнению с плакированными, обладают меньшей твердостью (см. таблицу 2) и высокой пластичностью, благодаря чему оказывают меньшее сопротивление сдвиговым нагрузкам, возникающим при скольжении индентора по поверхности диска.

Анализ данных по износу испытываемых образцов дисков и инденторов показал, что процесс изнашивания этих образцов имеет стохастический характер. При небольших значениях величин износа дисков и инденторов (в пределах  $(0,3...1,5) \times 10^{-3}$  г) и сравнительно небольшом пути трения не удалось установить закономерности изнашивания образцов в зависимости от способа формирования медных покрытий и значений величин прикладываемых нагрузок в процессе испытаний.

**Заключение.** Таким образом, результаты проведенных исследований в определенной степени дают представление о технологических возможностях медных покрытий, сформированных с использованием технологий гальванического осаждения и деформационного плакирования гибким инструментом. С позиций трения и изнашивания, гальванические медные покрытия, при увеличении нагрузки от 8 МПа и выше, независимо от твердости поверхности основы, в большей степени способствуют снижению коэффициента трения скольжения, нежели плакированные. Последние обеспечивают удовлетворительную работоспособность лишь при нагрузках, не превышающих 8 МПа. Вместе с тем, плакированные покрытия более устойчивы к нагрузкам, возникающим при циклическом знакопеременном изгибе. В отличие от гальванических покрытий они не отслаиваются даже при поломке образца.

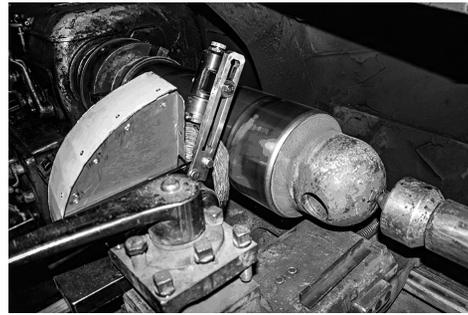


Рисунок 3 — Фото процесса нанесения медного подслоя на рабочую поверхность штока гидроцилиндра

Результаты проведенных исследований послужили основой для разработки технологии восстановления штоков гидроцилиндров, включающей предварительное нанесение медного подслоя толщиной 5...8 мкм методом деформационного плакирования гибким инструментом (рисунок 3) и последующее гальваническое осаждение слоя хрома.

#### Список литературы

1. Ямпольский, А.М. Меднение и никелирование / А.М. Ямпольский. — 4-е изд., пер. и доп. — Ленинград: Машиностроение, 1977. — 57 с.
2. Защитные покрытия / М.Л. Лобанов [и др.]. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 200 с.
3. Колганов, Л.А. Сварочные работы. Сварка, резка, пайка, наплавка: учеб. пособие / Л.А. Колганов. — М.: Дашков и Ко, 2003. — 408 с.
4. Технологические свойства сварочной проволоки. — Режим доступа: <http://www.spectechsoyuz.com/>.
5. Тенденции развития технологий сварочного производства. — Режим доступа: <http://www.weldingsite.com.ua/>.
6. Белевский, Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом / Л.С. Белевский. — Магнитогорск: Лицей РАН, 1996. — 231 с.
7. Анцупов, В.П. Теория и практика плакирования изделий гибких инструментов / В.П. Анцупов. — Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. — 241 с.
8. Улучшение служебных характеристик металлических изделий способом фрикционного плакирования [Электронный ресурс] / Л.С. Белевский [и др.] // Станочный парк. — 2011. — № 11. — С. 30–32. — Режим доступа: <http://www.stankopark.spb.ru/>.
9. Сотников, А.В. Предотвращение задиры на трущихся поверхностях чугунных деталей / А.В. Сотников // Станки и инструмент. — 1990. — № 6. — С. 30–31.
10. Леванцевич, М.А. Исследование влияния покрытий на антискачковые свойства направляющих скольжения / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, В.Н. Калач // СТИН. — 2012. — № 8. — С. 4–8.

Levantsevich M.A., Sheleg V.K., Pilipchuk E.V.

#### Comparative evaluation of workability criteria of galvanic and cladding copper coatings

The results of comparative tests of copper coatings, formed by the methods of galvanic deposition and deformation cladding flexible tool are presented. As criteria of workability we adopted the number of cycles of lateral bending up to the occurrence of exfoliation of the copper in the offset and breakage of the sample, and the coefficient of sliding friction and wear of samples with friction a spherical indenter without lubricant on the flat surface of the copper-plated steel disks with hardness of the substrate 20, 50, and 70 HRC. When testing for exfoliation in bending we have established that the clad coating do not exfoliate from the substrate even in case of breakage of experimental samples, while in samples with galvanic coatings it was observed exfoliation of coating at the first cycle of bending. The results of tribological tests showed, that copper coatings formed with the use of both technologies help to reduce the coefficient of sliding friction compared with the friction pairs without the coating. However, the critical loads that cause the appearance of a score, galvanic coating reduces the coefficient of sliding friction more than the clad.

Поступил в редакцию 11.07.2016.