

УДК 621.793

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТЖИГА НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫМ ПЛАКИРОВАНИЕМ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

*А. Н. БЕЛЫЙ, магистр техн. наук.*

*К. Е. БЕЛЯВИН, доктор техн. наук, профессор,*

*М. А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, кандидат технических наук,*

*(Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь.)*

Белый А.Н. – 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический университет,  
e-mail: belyy\_alex@mail.ru

**Аннотация:** Приведены результаты оценки адгезионной прочности покрытий из бронзы (BrO10Ф1), сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом. Испытаниям при нормальном отрыве подвергались образцы с покрытиями до и после отжига в среде эндогаза при температуре в камере печи 800...820 °С. Установлено, что адгезионная прочность при отрыве образцов с покрытием, без предварительного отжига, находится в пределах 11,5...13,5 МПа. При этом разрушение слоя покрытия имеет смещенный, адгезионно-когезионный характер. После отжига – адгезионная прочность существенно возрастает и превышает технологические возможности используемого клея, имеющего прочность на отрыв 22,5...25,0 МПа. Разрушение слоя покрытия в этом случае не наблюдалось. Также рассмотрены возможности применения покрытий из Ni и Cr, в качестве подслоя для последующего формирования покрытия из BrO10Ф1.

**Ключевые слова:** покрытие, деформационное плакирование, гибкий инструмент, вращающаяся металлическая щетка, отжиг, нормальный отрыв, адгезионная прочность

### Введение

Деформационное плакирование гибким инструментом (ДПГИ), обеспечивающее формирование поверхностного слоя с заданным комплексом эксплуатационных характеристик, относится к новым перспективным технологиям финишной обработки, получившим широкое развитие в настоящее время [1–6]. Метод ДПГИ сочетает пластическое деформирование поверхностного слоя основы с одновременным формированием покрытия, которое может рассматриваться как самостоятельный функциональный слой, так и в качестве промежуточного слоя необходимого для увеличения адгезионной прочности при формировании биметаллического соединения, с применением технологий порошковой металлургии и прокатки [7–10].

Однако в вопросе оценки прочности сцепления сформированных покрытий с основой многие исследователи приводят лишь данные о качественной оценке адгезионных свойств покрытий, что в определенной степени затрудняет не только выбор рациональных технологических режимов, но и расчет энергосиловых параметров процесса плакирования.

Необходимо отметить, что ранее выполненными исследованиями нами было установлено, что адгезионная прочность и характер разрушения покрытий, сформированных методом ДПГИ, в значительной степени зависит от вида материала основы и состава материала донора, а также, возможно, и толщины сформированного слоя.

Максимальную адгезионную прочность (15,1 МПа) и адгезионный характер разрушения имели покрытия из бронзы BrO5C5Ц5Гp1ДМ0,5 с толщиной слоя 3...5 мкм, сформированные на образцах из стали 45. Меньшие значения адгезионной прочности (13,2 МПа) и смешанный характер разрушения имели покрытия, сформированные из бронзы BrOC [11]. Однако вопросы влияния термической обработки на адгезионную прочность покрытий полученных методом ДПГИ не изучались. Между тем, подобная информация способствовала бы значительному расширению технологических возможностей метода ДПГИ и выбору материала покрытия, предназначенного для эксплуатации в конкретных условиях.

**Цель работы** заключалась в изучении влияния термической обработки (отжига) на адгезионную прочность покрытий из бронзы BrO10Ф1, сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом.

**Методика исследований** предполагала проведение испытаний на нормальный отрыв двух склеенных образцов цилиндрической формы, в соответствии с ГОСТ 27890–88. Перед началом испытаний на рабочих торцовых поверхностях (Ra = 0,16 мкм) цилиндров, изготовленных из ст. 20 (HRC 20) формировали слой покрытия из бронзы BrO10Ф1. При этом формирование слоя покрытия осуществлялось как на чистых поверхностях, так и на поверхностях с предварительно нанесенным слоем из Ni и Cr (таблица 1).

Таблица 1 – Испытываемые образцы

№ образца	Материал основы	Материал покрытия
1	Сталь 20	BrO10Ф1, с последующим отжигом
2	Сталь 20	BrO10Ф1
3	Сталь 20	BrO10Ф1, подслои Ni, с последующим отжигом
4	Сталь 20	BrO10Ф1, подслои Ni
5	Сталь 20	BrO10Ф1, подслои Cr, с последующим отжигом

Формирование покрытий осуществляли с использованием вращающейся цилиндрической щетки диаметром 150 мм, шириной 15 мм, длиной и диаметром ворса 25 и 0,25 мм соответственно. Линейная скорость вращения щетки составляла 35...38 м/с, частота вращения образца – 60 мин<sup>-1</sup>, число проходов щетки – 9...12. Толщина слоя покрытия из бронзы BrO10Ф1 на чистых поверхностях составляла 9...12 мкм, толщина покрытий из Ni и Cr – 3...4 мкм, суммарная толщина двухслойных покрытий Ni+BrO10Ф1 и Cr+BrO10Ф1 не превышала 10...12 мкм. Площадь основания цилиндрических образцов, на которую наносили испытываемое покрытие, составляла 1193,9 мм<sup>2</sup>.

После нанесения покрытия образцы подвергались отжигу в защитно-восстановительной атмосфере эндогаза при температуре 800–820 °С в течение 30 – 35 мин (остывание с печью). Затем производилась мойка и сушка образцов, обезжиривание и их склеивание с образцами без покрытия при усилии сжатия 3000 Н. Для склеивания использовался клей марки 3М производства Республики Корея. Время выдержки склеенных образцов составляло 24 часа.

Оценку адгезионной прочности склеенных образцов производили на универсальной гидравлической испытательной машине Instron Satec 300LX. Технические характеристики модели 300LX: предельная нагрузка – 300 кН; максимальная скорость – 152 мм/мин; точность измерения нагрузки – 0,5% от измеренного значения; частота синхронной регистрации данных – 1кГц; полное программное управление.

Испытания проводили с постепенным нарастанием нагрузки до разрыва пары образцов. Скорость перемещения захвата разрывной машины не превышала 10 мм/мин. Фиксировали

нагрузку, при которой произошло разрушение образца, после чего обе части испытанного образца подвергали визуальному осмотру для определения характера разрушения:

- 1) адгезионный (А) – отрыв покрытия от основания;
- 2) когезионный (К) – разрушение внутри слоя покрытия;
- 3) межслойный (М) – разрушение между слоями покрытия;
- 4) смешанный (А, К, М) – сочетание перечисленных выше разрушений.

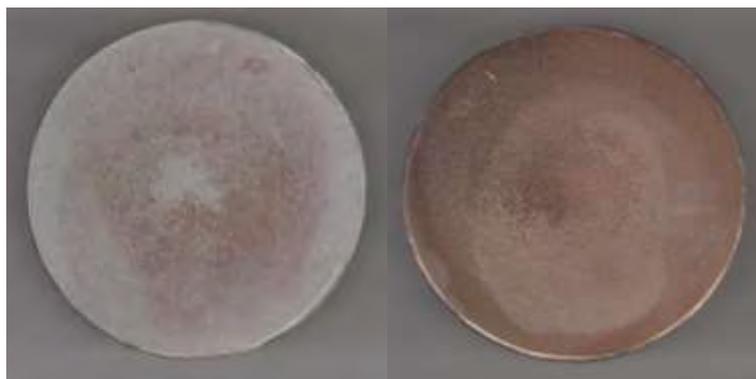
Предел прочности покрытия при отрыве образца ( $\sigma$ ) в паскалях вычисляли по формуле

$$\sigma = \frac{P}{F},$$

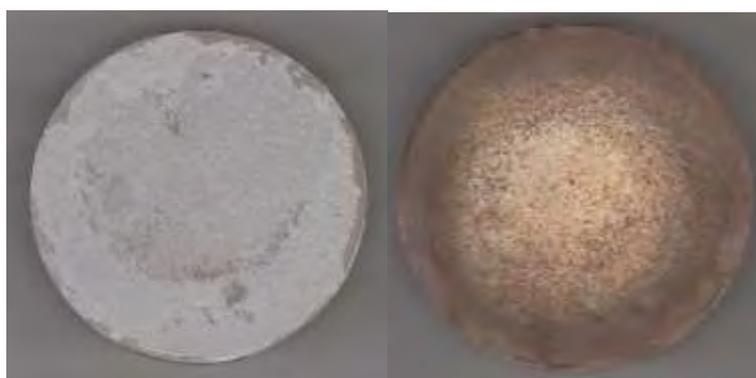
где Р – сила отрыва образца, Н; F – площадь основания, м<sup>2</sup>.

Результаты проведенных испытаний показали, что термическая обработка покрытий из бронзы BrO10Ф1 оказывает существенное влияние на их адгезионную прочность. У всех образцов с покрытием подвергнутых отжигу она превысила адгезионную прочность используемого клея, составляющую 22,5...25,0 МПа. В то же время у образцов, не подвергавшихся отжигу, адгезионная прочность составила в среднем 11,5...13,5 МПа. При этом, преобладал преимущественно когезионный характер разрушения покрытия (рисунок 1 а).

Следует отметить, что наряду с изменением адгезионной прочности изменяется и микротвердость поверхности сформированных покрытий. У образцов до отжига и после отжига среднее значение микротвердости покрытий HV<sub>0,2</sub> составляет, соответственно 315 и 187.



а)



б)

Рисунок 1 – Фото поверхностей образцов после испытаний на разрывной машине  
а) – покрытие БрО10Ф1 без отжига, б) – покрытие БрО10Ф1, с последующим отжигом

### Выводы

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют заключить, что на адгезионную прочность и характер разрушения покрытий, сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом, существенное влияние оказывает последующая термическая обработка. Отжиг подобных покрытий способствует повышению их адгезионной прочности свыше 25 МПа и снижению микротвердости поверхности в 1,8...2,0 раза.

Адгезионная прочность покрытий из бронзы БрО10Ф1 сформированных как непосредственно на поверхности чистых стальных образцов,

так и на поверхности образцов с предварительно нанесенным слоем Ni или Cr, без термической обработки имеют прочность сцепления в пределах 11,5...13,5 МПа.

Результаты выполненных исследований имеют важное значение для дальнейших исследований, направленных на расширение технологических возможностей технологии деформационного плакирования гибким инструментом путем формирования функционально ориентированных покрытий, а также покрытий применяемых в качестве подслоя в процессах порошковой металлургии.

### Список литературы

1. Улучшение служебных характеристик и качества металлических изделий способом фрикционного плакирования / Л. С. Белевский [и др.] // Сталь. – 2011. – № 2. – С. 93–96.

2. Анцупов, В. П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В.П. Анцупов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999. – 241 с.

3. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Ч. 1. Термопластическая деформация

и процессы взаимодействия плакируемой поверхности и плакирующего слоя / Л.С. Белевский [и др.] // Металлург. – 2006. – № 10. – С. 33–38.

4. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Ч. 2. Механизм фрикционного плакирования / Л.С. Белевский [и др.] // Металлург. – 2006. – № 11. – С. 36–38.

5. Завалищин А.Н. Поведение при нагреве алюминиевых покрытий, полученных во фрик-

ционном контакте, // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2001. № 7. С. 23 – 26.

6. *Завалицин А.Н., Завалицина Е.Г., Белевский Л.С.* Термическая обработка алюминиевого покрытия, нанесенного металлическими щетками // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1989. № 7. С. 110-112.

7. *Белявин К.Е.* К вопросу о получении композиционного двухслойного антифрикционного материала / К.Е. Белявин, А.Н. Белый, Л.Н. Дьячкова, М.А. Леванцевич // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов*. – Мн. – 2014. – С.38 – 44.

8. Моделирование процесса электроимпульсного спекания металлических порошков / К.Е. Белявин, Д.М. Минько, О.О. Кузнецик/ *Инженерно-физический журнал*. – 2004. – Т. 77, №3. –

С. 136–143.

9. Solid-state laser fusion of spherical titanium powders / K.E. Belyavin, D.V. Minko, O.O. Kuznechik et all. / *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. Springer New York. – 2008. – Vol. 47, No. 7-8. – pp. 500–505.

10. *Щукин, В.Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1999. – № 3. – С. 35–37.

11. *Леванцевич, М.А.* Исследование адгезионной прочности покрытий, сформированных методом деформационного плакирования гибким инструментом / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, Е.Ф. Коновалова // *Актуальные вопросы машиноведения : сб. научн. трудов. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]*. – 2014. Вып. 3. – С. 350–353.

## INVESTIGATING THE ANNEALING INFLUENCE ON ADHESIVE STRENGTH FOR THE COVERINGS GENERATED BY DEFORMATIONAL CLADDING WITH FLEXIBLE TOOL

Bely A. N., M.Sc. (Engineering), e-mail: belyy\_alex@mail.ru

Belyavin K. E., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: bntu.umd@mail.ru

Levantsevich M. A., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: levancev@mail.ru

Belarussian National Technical University, Belarus, 220013, Minsk, Nezavisimosty Ave., 65

Abstract: Results of estimating the adhesive strength for bronze (БрО10Ф1) coverings, generated by deformational cladding with flexible tool method are presented. Normal tearing tests were fulfilled for samples with coverings before and after annealing in endogas **environment at furnace chamber temperature about 800 ... 820 °C**. It is established, that adhesive strength at tearing for samples with a covering and without preliminary **annealing values range is 11,5 ... 13,5 МПа**. Thus the coating layer destruction has mixed, adhesive - cohesive character. After annealing the adhesive strength essentially increases and exceeds the glue used technological **capabilities in sense of its tearing strength values having a range of 22,5 ... 25,0 МПа**. The coating layer destruction in this case was not observed. The possibilities of coatings from Ni and Cr use as a sublayer for the subsequent generating the bronze БрО10Ф1 coating are also considered.

Keywords: covering, deformational cladding, flexible tool, rotating metal brush, annealing, normal tearing, adhesive strength.