

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко М.Ф., Кравцов Е.Е., Идиатулин С.А. Эффективные поверхности гелиоприемных устройств // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1998. № 7. С. 33-35.
2. J. Takadoum Black coatings: a review // The European physical journal applied physics. 2010. № 52. P 30401 (p1-p7).
3. N. Karupiah, S. John, S. Natarajan, V. Sivan, Bull. Electrochem. 18, 295 (2002)
4. S. John, N. Karupiah, in Proc. VIII Tamil Sciences Congress, MS University, Tirunelveli. 1998, p. 57
5. Сидельникова С.П., Ющенко С.П., Дикусар А.И., Морфология, структура и состав покрытий при электроосаждении «Черного Никеля» // Электронная обработка материалов. 2009. №4. С. 93-101.

УДК 621.785.5

П.Н. Белкин<sup>1</sup>, проф., д-р техн. наук,  
С.А. Кусманов<sup>1</sup>, доц., д-р техн. наук,  
С.А. Силкин<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Б.Л. Крит<sup>2</sup>, проф., д-р техн. наук,  
В.С. Белкин<sup>2</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Костромской государственной университет, Кострома,

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, национальный исследовательский университет, Москва

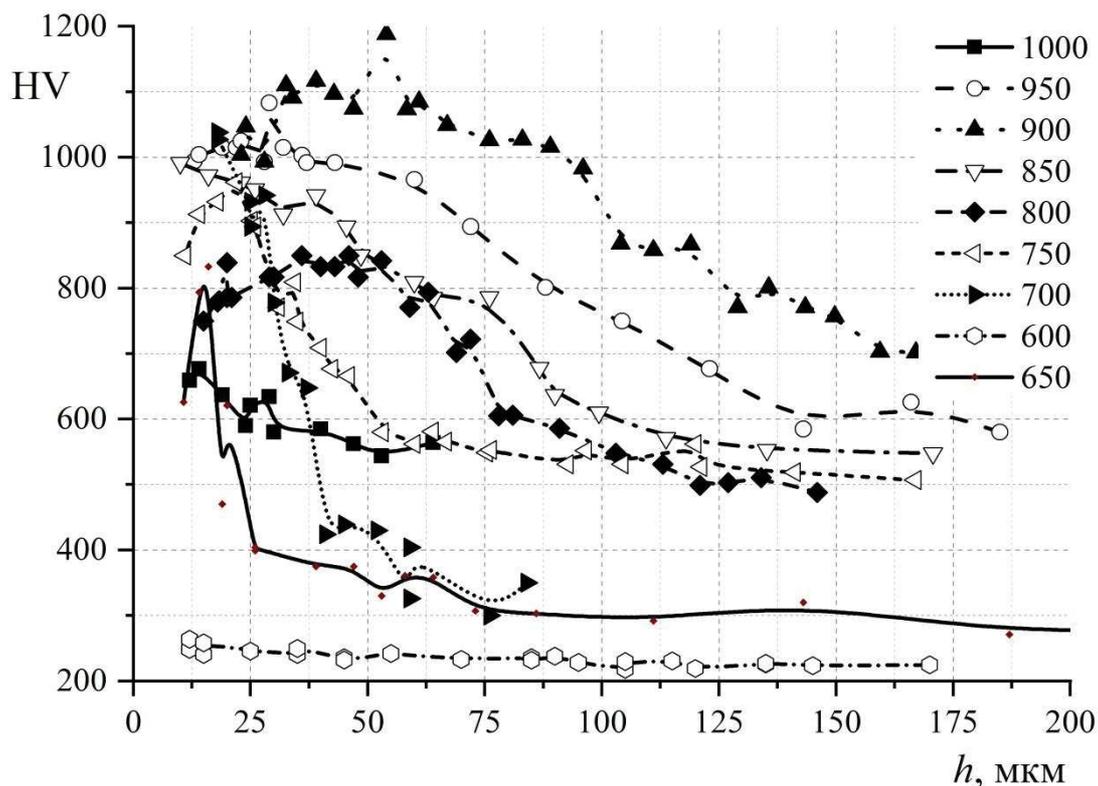
## АНОДНОЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ БОРОАЗОТИРОВАНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В данной работе исследовалась возможность одновременного анодного насыщения стали 20 азотом и бором в водном растворе нитрата аммония (5 масс. %), хлорида аммония (10 масс. %) и борной кислоты (3 масс. %). Насыщение при 650–950 °С с последующей закалкой в электролите приводит к образованию нитридно-мартенситной структуры, поскольку диффузия азота существенно понижает температуру аустенитизации. Рентгеноструктурный анализ показал наличие оксидов ( $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ) и нитрида железа  $Fe_3N$  (при 800 °С) в модифицированном слое, но не позволил обнаружить присутствие боридов. Наличие бора в поверхностном слое установлено с помощью ядерного обратного рассеяния протонов. Максимальное количество 13 ат. % бора достигается после обработки при 900 и 950 °С. Концентрация азота при этих температурах

составляет 11 ат. %. При температурах свыше 950 °С рост диффузионного слоя, содержащего бориды и нитриды, прекращается из-за интенсивного оксидирования и торможения диффузии толстым оксидным слоем. При 1000 °С наблюдается рост зерен до 50 мкм.

Плавное убывание микротвердости указывает на диффузионное происхождение мартенсита (рис. 1), который образовался там, куда проникли атомы азота. Чем выше температура обработки (до 1000 °С), тем толще упроченный слой. Снижение твердости у поверхности образца обусловлено образованием менее твердых фаз (оксидов железа, нитрида Fe<sub>3</sub>N и остаточного аустенита), что типично для анодной электролитно-плазменной обработки. Наибольшая микротвердость до 1180 HV и максимальная толщина слоя 160 мкм достигаются при 900 °С, что можно объяснить наличием мартенсита и боридов железа.

Изменение шероховатости поверхности определяется совокупным действием анодного растворения, способного сгладить выступы, и высокотемпературного окисления. Оксидный слой может не только заполнять впадины на поверхности образца, но и растрескиваться с образованием новых выступов и углублений. Благоприятное сочетание растворения и окисления наблюдается после бороазотирования при 700 и 750 °С, когда параметр Ra уменьшается от 1,0 мкм у контрольного образца до 0,65 мкм у обработанных. При более высоких температурах очевидна тенденция не только к росту толщины оксидного слоя, но и к увеличению шероховатости поверхности.



**Рисунок 1 – Распределение микротвердости в поверхностном слое стали 20 после боразотирования при различных температурах**

Снижение шероховатости поверхности достигается после дополнительного электролитно-плазменного полирования в растворе сульфата аммония (5 масс.%) при напряжении 350 В и температуре электролита 80 °С. После 2 мин полирования шероховатость боразотированной поверхности снижается в 1,4–1,7 раз.

Трибологические свойства образцов изучались на трибометре по схеме «шарик-по-дису» в условиях сухого трения при нагрузке 3 и 5 Н, скорости скольжения 0,2 м/с при комнатной температуре. Контртелом служил шарик диаметром 6,35 мм из корунда, диаметр дорожки трения составлял 8 мм, а путь трения – 240 м. Рыхлая часть оксидного слоя перед испытаниями удалялась наждачной бумагой 2000Grit. Массовый износ определялся взвешиванием, а объемный рассчитывался по усредненной, для одного образца, площади поперечного сечения дорожки трения.

Обнаружено, что повышение температуры боразотирования приводит к некоторому росту коэффициента трения образцов, хотя видимой зависимости не наблюдается. Влияния микротвердости на коэффициент трения выявлено не было. Следовательно, величина коэффициента трения определяется прирабатываемостью поверхностного слоя. Как правило, увеличение нагрузки влечет за

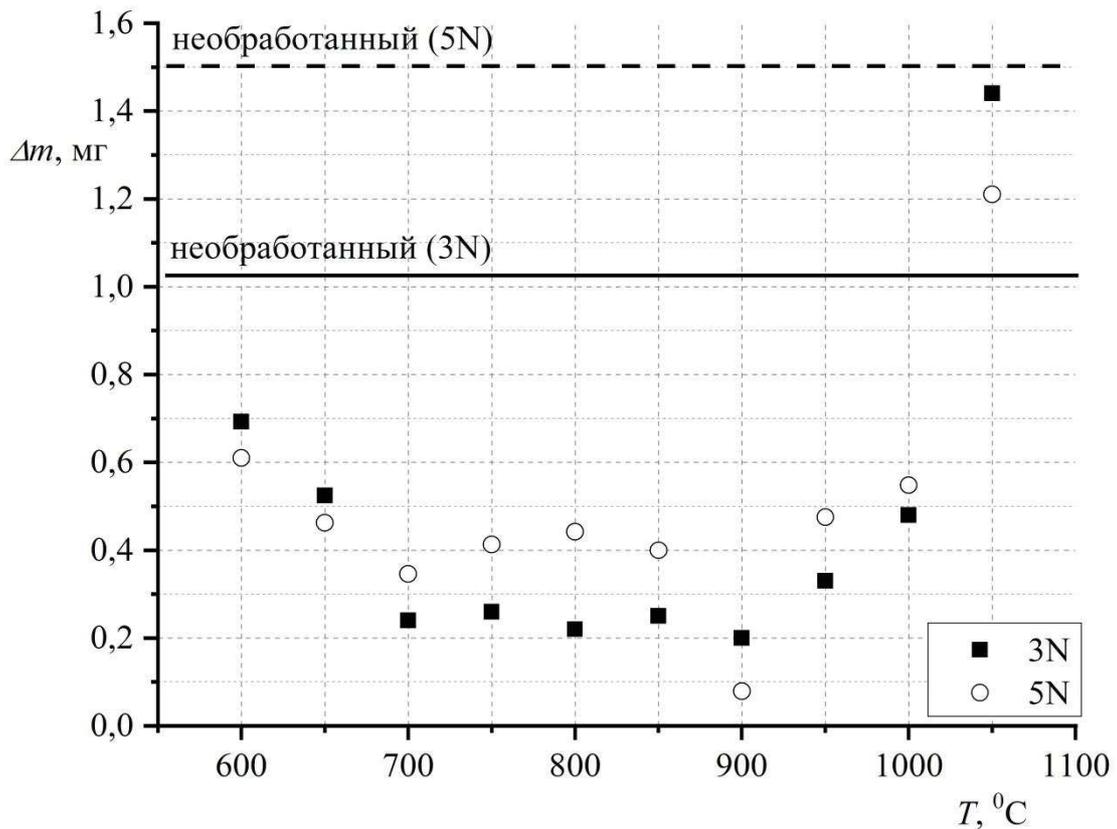
собой некоторое повышение коэффициента трения, что указывает на отсутствие режима чисто упругого контакта.

Износостойкость образцов после бoroазотирования выше, чем у необработанных, практически во всём изученном диапазоне температур до 1000 °C (рис. 2). В интервале от 700 °C до 900 °C массовый износ образцов примерно одинаковый и в среднем в 5 раз меньше, чем у необработанных образцов.

Отметим, что бoroазотирование без закалки при 600 °C, даёт больший эффект, чем закалка от 1050 °C, поскольку в последнем случае образуется гораздо более шероховатая поверхность, что способствует увеличению износа. Корреляция износа с микротвердостью также не выявлена. Аналогичные результаты показывают результаты измерения объёмного износа.

Коррозионная стойкость образцов оценивалась потенциодинамическими поляризационными кривыми в водном растворе хлорида натрия (3,5%). Повышение коррозионной стойкости обнаружено при всех температурах бoroазотирования. Наилучший результат достигается после насыщения при 900 °C, когда плотность тока коррозии уменьшается в 4,8 раза по сравнению с необработанными образцами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10094) Костромскому государственному университету. Анализ элементного и фазового состава слоя выполнен соавторами из Московского авиационного института.



**Рисунок 2 – Массовый износ образцов после анодного бороазотирования при различных температурах**

А.В. Павлов,  
Т.Н. Ефимова  
ФГБОУ ВО «ЯГТУ» Ярославль

## **ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ НИКЕЛЬ-ВОЛЬФРАМОВОГО СПЛАВА НА МЕТАЛЛИЗИРОВАННУЮ ТКАНЬ**

Создание гибких слоистых радиационно-защитных материалов входит в число приоритетных направлений развития техносферы, в частности развития радиационной и ядерной технологии.

Одним из вариантов решения задачи по созданию гибких слоистых радиационно-защитных материалов является применение резиноктаневой конструкции с металлизированной тканью, содержащей защиту от жестких электромагнитных излучений, включая радиацию.

С этой целью была выбрана металлизированная ткань, обладающая высокой электропроводностью за счет мишурных нитей из меди, покрытых серебром, соответствующая требованиям ТУ 17 РСФСР 62-4504-77. Для создания защиты от жестких