УДК 621.791.927

*В. Д. КУЗНЕЦОВ*[1], *Е. В. БЕРЕЖНАЯ*[1], *А. В. ЛАПЧЕНКО*[2]

[1] ***«Киевский политехнический институт» им. И. Сикорского***
[2] ***Донбасская государственная машиностроительная академия, Украина***

# ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКОЙ

*Исследована износостойкость деталей, восстановленных стальными термообработанными лентами методом электроконтактной наплавки. Установлено, что наибольшей износостойкостью, а также высокой твердостью обладает поверхность, наплавленная лентами, которые подвергались комплексной химико-термической обработке. Показано, что полученный по такой технологии поверхностный слой состоит из отдельных включений высокой твердости, находящихся в окружении твердого раствора, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделия.*

***Ключевые слова:*** *электроконтактная наплавка, износостойкое покрытие, комплексное насыщение, поверхностный слой, твердость, износостойкость.*

**Введение.** Изнашивание деталей, рабочих органов и инструмента является закономерным процессом, неизбежно сопровождающим работу машин, механизмов, промышленного оборудования и представляющим одну из форм их физического старения [1]. Повысить износостойкость при сохранении требуемого профиля режущих кромок представляется возможным при изготовлении и восстановлении инструмента с нанесением рабочего слоя методом электроконтактной наплавки [2], одним из преимуществ которого является по сравнению с другими является существенно меньшее проплавление основы.

Обеспечение долговечности и эксплуатационной стойкости деталей и инструмента может достигаться за счет химико-термического упрочнения как всего изделия после нанесения функционального слоя [3], так и предварительной подготовкой наплавочного материала для рабочего слоя [4], что позволяет сформировать в нем уникальные свойства в сравнении с традиционным конструкционным материалом [5].

Одним из наиболее распространенных методов химико-термического упрочнения деталей машин и режущего инструмента является борирование [6], обладающее существенными недостатками (низкая окалиностойкость, жаростойкость, высокая хрупкость), ограничивающими область применения способа для обработки наплавочных материалов.

Чтобы устранить недостатки, присущие однокомпонентным покрытиям, изделия подвергают насыщению несколькими элементами [7].

**Цель работы** – разработка технологии повышения износостойкости деталей, восстановленных методом электроконтактной наплавки, за счет применения комплексной химико-термической обработки наплавочного материала.

**Методы исследований.** Комплексной химико-термической обработке в контейнерах из алитированной стали подвергали низкоуглеродистую стальную ленту 08кп (ГОСТ 503-81) толщиной 0,5 мм.

Для одностороннего боротитаноалитирования (вариант 1) применяли насыщающую порошковую смесь следующего состава (масс. %): 24 $B_4C$; 36 FeTi; 33

$Al_2O_3$; 7 $Na_3AlF_6$. Герметизацию контейнеров осуществляли при помощи плавкого затвора из измельченного стекла.

Затем контейнер помещали в печь, нагретую до температуры 1000 °С, не допуская встряхивания и отклонения от горизонтального положения, что способствует получению равномерного по толщине поверхностного слоя, а также обеспечивает герметичность контейнера. Выдержка в печи составляла 5 ч, затем контейнер охлаждали с печью.

Такая технология предварительной подготовки позволяет произвести боротитаноалитирование поверхностного слоя на глубину 0,13 мм.

Проводили также предварительную химико-термическую обработку стальной ленты 08кп (толщина 0,5 мм) только борированием (вариант 2).

Полученные наплавочные материалы подавали в зону наплавки таким образом, чтобы в контакте с поверхностью детали находилась сторона, не подвергнутая предварительной химико-термической обработке.

Электроконтактную наплавку подготовленной ленты проводили на следующих режимах: давление – $P$ = 1,5 кН; сварочный ток – $I_{св}$ = 6,0...7,0 кА; длительность импульсов тока– $t_{св}$ = 0,07 с.

Кроме того, провели сравнение с образцами, наплавленными стальной лентой ст45 (ГОСТ 2284-79) толщиной 0,5 мм, с последующей закалкой ТВЧ (вариант 3).

Абразивную износостойкость наплавленных образцов определяли на специально сконструированной установке с использованием линейного двигателя [8].

Наплавленный образец сечением 15×15 мм закрепляли на столе *10* (рис.1). Между стойками *1* из немагнитного материала закреплен стержень *2* из сформированных в виде цилиндра постоянных магнитов.

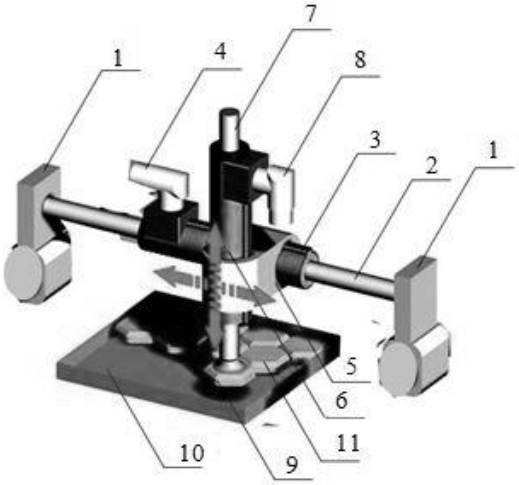



Рис. 1. Установка для исследования износостойкости:
*1* – стойка; *2* – стержень; *3* –каретка; *4* – разъем; *5* – скоба; *6* – стойка; *7* – цилиндр; *8* – разъем; *9* – пластина с абразивом; *10* – стол; *11* – испытуемые образцы

На нижнем конце магнитного стержня расположена пластина *9* из немагнитного материала с закрепленным на ней абразивным материалом. В каретке *3* расположена обмотка.

При подаче в обмотку постоянного напряжения определенной полярности в ней наводится магнитное поле, взаимодействие которого с магнитным полем постоянных магнитов приводит к перемещению каретки вправо. При подаче на обмотку напряжения противоположной полярности каретка начинает движение влево.

При перемещении каретки вдоль испытуемых образцов происходит трение, в результате которого происходит износ образцов.

Процесс перемещения каретки и время смены полярности подаваемого напряжения контролируются микропроцессорной системой управления.

В качестве абразивного материала использовалось электрокорундовое полотно КК18XW 25H с размером абразивных частиц 315 – 250 мкм. Испытание образцов проводили под действием нагрузки $4{,}4 \cdot 10^{-3}$ МПа. Через каждые 15 минут испытаний производилась замена абразива.

Массу образца определяли через каждые 15 минут испытаний взвешиванием изношенных образцов на аналитических весах с точностью до 0,001 г.

В качестве критерия износостойкости принимали относительный износ образцов, который определялся из соотношения:

$$\varepsilon = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \cdot 100\% \ , \qquad (1)$$

где $m_0$ – масса образца до испытания, г; $m_i$ – масса образца после испытания, г.

Для количественной оценки микрохрупкости [9] поверхностных слоев поперечные шлифы образцов, обработанных по варианту 1 и 2, индентировали алмазной пирамидой Виккерса. Затем анализировали морфологию образовавшихся трещин и глубину внедрения индентора.

В качестве показателя микрохрупкости использовали безразмерную величину γ, которую определяли по формуле:

$$\gamma = \frac{C^2}{d_н^2} \ , \qquad (2)$$

где $C$ – размер радиальной трещины; $d_н$ – диагональ отпечатка.

Микрохрупкость определяли по максимальным значениям длины радиальных трещин.

**Результаты исследований и их обсуждение.** После боротитаноалитирования ленты структура поверхностного слоя состоит из двух зон, а именно: зоны твердого раствора, который после теплового травления имеет равномерный коричневый цвет по всей толщине, и зоны боридов $Fe_2B$, связанной с зоной твердого раствора со стороны исходного металла ленты (рис. 2).

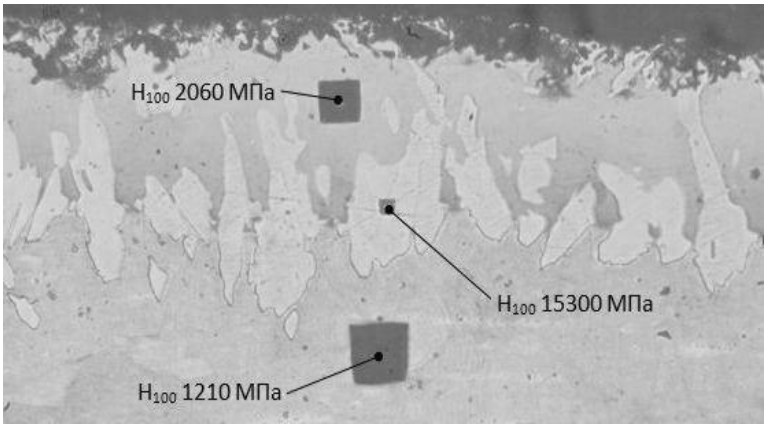



Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя, наплавленного стальной лентой 08кп, подвергнутой комплексному боротитаноалитированию (×100)

Микроструктура поверхностного слоя состоит из твердого раствора бора, титана и алюминия (*HV* 2060 МПа), под которым, на границе с исходным металлом ленты (*HV* 1210 МПа), располагается цепочка боридов железа (*HV* 15300 МПа), имеющих более округлую форму и равномерно распределенных по площади образца.

В процессе термической обработки эти бориды находятся под слоем твердого раствора, который предохраняет их от окисления при высоких температурах, а также препятствует образованию трещин.

После удаления слоя твердого раствора микроструктура поверхности образца представляет собой отдельные частицы боридов железа округлой формы, расположенные частично в окружении твердого раствора, а частично – исходного металла ленты, что обеспечивает, с одной стороны высокую износостойкость, а с другой – удовлетворительную пластичность, предотвращая образование трещин.

Проведенные испытания на износостойкость (рис. 3) показали, что поверхностный слой, состоящий из отдельных игл боридов, разделенных между собой твердым раствором, имеет несколько меньшую абразивную износостойкость, чем сплошной боридный.

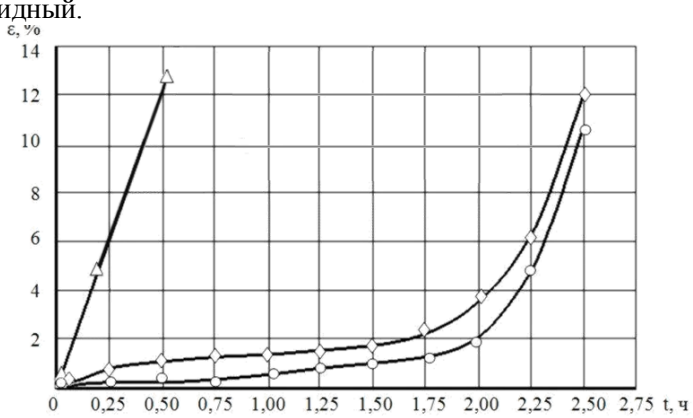



Рис. 3. Износостойкость наплавленных образцов:
♦ – после боротитаноалитирования; ○ – после борирования;
**Δ** – после обычной наплавки с закалкой ТВЧ

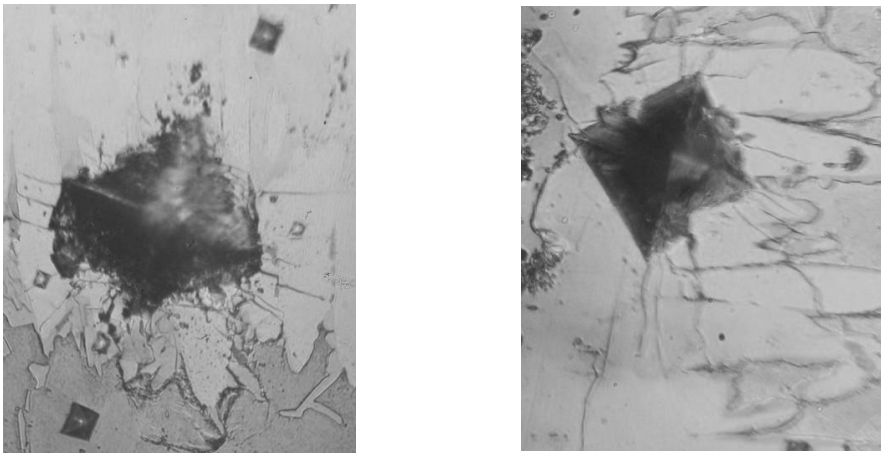
Однако его износостойкость все же значительно превышает износостойкость образцов, наплавленных лентой из стали 45, подвергнутых закалке с низким отпуском.

Также следует отметить, что такой слой имеет более высокие показатели пластичности за счет того, что твердые, но хрупкие бориды не являются монолитным слоем, а разделены более мягким и пластичным твердым раствором (рис. 4).

Микрохрупкость образцов, обработанных по варианту 1 (комплексное боротитаноалитирование) на 61,3% меньше (рис.4, *а*), чем микрохрупкость образцов, прошедших обработку по варианту 2 (рис.4, *б*).

Это обусловлено тем, что технология боротитаноалитирования позволяет создать в поверхностном слое твердый раствор между иглами боридов, препятствующий распространению трещин.

Таким образом, в силу специфики электроконтактной наплавки при приложенном роликом давлении на поверхность ленты и прохождении тока частично проплавляется обратная не обработанная сторона ленты и разрушения твердого раствора бора, титана и алюминия с внедренными боридами на рабочей стороне не происходит, что позволяет сохранить полученные повышенные значения вязкости и износостойкости рабочей поверхности.



*а* *б*

Рис. 4. Состояние поперечного шлифа наплавленных образцов, обработанных по варианту 2 (*а*) и по варианту 1 (*б*) в зоне индентирования (×150)

**Выводы:**

1. Комплексная химико-термическая обработка наплавочного материала позволяет получить в наплавленном поверхностном слое структуру, состоящую из пластичной матрицы (твердый раствор) и равномерно распределенных в ней твердых составляющих (бориды железа), за счет чего воспринимаемая поверхностью изделия нагрузка перераспределяется по площади покрытия, снижая вероятность разрушения.

2. Бориды железа, равномерно распределенные в поверхностном слое и защищенные от термического влияния в процессе электроконтактной наплавки слоем твердого раствора, обеспечивают высокую износостойкость полученного покрытия, значительно превышающую износостойкость образцов, наплавленных лентой из стали 45 и прошедших последующую термическую обработку.

**Список литературы**

1. Гаркунов Д.Н. Анализ изнашивания и избирательный перенос при трении / Д.Н. Гаркунов, Г.А. Польцер // Эффект безызносности и триботехнологии. – 1992. – №1. – С. 9–11.

2. Хромченко Ф.А. Сварочные технологии при ремонтных работах / Ф.А. Хромченко. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 368с.

3. Бережная Е.В. Исследование влияния комбинированной термомеханической обработки на физико-механические характеристики покрытия / Е.В. Бережная, А.В. Лапченко, М.А. Турчанин // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, ДДМА. – №38. – 2016. – С. 125–131. – ISSN 2222–9000.

4. Нафиков М.З. Особенности формирования структуры металлопокрытий, нанесенных электроконтактной наплавкой проволокой из углеродистых и легированных сталей / М.З. Нафиков, И.И. Загиров, Э.Л. Левин, Р.Н. Сайфуллин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №6. – С. 31–37.

5. Черновол М.И. Контактная наварка композиционных покрытий / М.И. Черновол, Ю.В. Мачок // Сварочное производство. – 1991. – №12. – С. 23–25.

6. Гурьев А. М. Диффузионное борирование – перспективное направление в поверхностном упрочнении изделий из стали и сплавов / А. М. Гурьев, А. Д. Грешилов, Б. Д. Лыгденов // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. –С. 80–88.

7. Заблоцкий В. К. Влияние упрочняющей термической обработки на структуру комплексных B – Ti – Al покрытий на углеродистых сталях / В. К. Заблоцкий, А. В. Лапченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. –2007. – №3/1(27) – С. 71–75.

8. Бережная Е.В. Машина трения для испытания на износостойкость металла наплавки / Е.В. Бережная, Ю.А. Чепель // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, ДДМА. –№31, 2012.– С. 112–117. – ISSN 2222–9000.

9. Хижняк В.Г. Определение микрохрупкости карбидных покрытий с использованием метода «кинетической микротвердости» / В.Г. Хижняк, А.И. Дудка, О.В. Хижняк / Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1996. – №9. С. 83.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2016

*В. Д. КУЗНЕЦОВ, О. В. БЕРЕЖНА, О.В. ЛАПЧЕНКО*

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ВІДНОВЛЕНИХ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

Досліджено зносостійкість деталей, відновлених сталевими термообробленими стрічками методом електроконтактного наплавлення. Установлено, що найбільшу зносостійкість, а також високу твердість має поверхня, що наплавлена стрічками, які піддавались комплексній хіміко-термічній обробці. Показано, що отриманий за такою технологією поверхневий шар складається з окремих включень високої твердості, які знаходяться в оточенні твердого розчину, що позитивно позначається на експлуатаційних характеристиках виробу.

**Ключові слова:** електроконтактне наплавлення, зносостійке покриття, комплексне насичення, поверхневий шар, твердість, зносостійкість.

*V.D. KUZNETSOV, O.V.BEREZSHNAYA, O.V.LAPCHENKO*

## WEAR RESISTANCE INCREASING OF THE PARTS RESTORED BY ELECTRIC CONTACT SURFACING

The wear resistance of the parts that were restored by the method of electric contact surfacing with heat-treated steel tapes is considered in the article. A comparative evaluation of wear resistance of the samples that were subjected to preliminary chemical and thermal treatment, as well as the samples with subsequent heat treatment, is presented. It is found that the samples surfaced with tapes, that were subjected to complex chemical and thermal treatment, has the highest wear resistance, as well as the high hardness. It is shown that superficial layer, obtained by this technology, consists of the high hardness separate inclusions, which are surrounded by the solid solution. The influence of technology of the chemical and heat treatment of steel tape on the micro fragility and plasticity of the surfaced layer is considered.

**Key words:** electric contact surfacing, wear resistant coating, complex saturation, superficial layer, hardness, wear resistance.

**Кузнецов Валерий Дмитриевич** – докт. техн. наук, профессор кафедры инженерии поверхности, «КПИ» им. И. Сикорского, г. Киев, E-mail: v.kuznetsov@kpi.ua.

**Бережная Елена Валериевна** – канд. техн. наук, докторант кафедры инженерии поверхности, «КПИ», г. Краматорск, Украина, e-mail: elena_kassova@mail.ru.

**Лапченко Алексей Владимирович** – к.т.н., старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование литейного производства» Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск, Украина, e-mail: alexey.lapchenko@gmail.com.