doi: 10.71032/ob2024.S3-001503

Модификация свойств диффузионных слоев электронно-пучковой обработкой

Н.С. Улаханов[1], У.Л. Мишигдоржийн[1], А.П. Семенов[1], М.С. Воробьев[2], Н.Н. Коваль[2], П.В. Москвин[2]

[1] *Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*
[2] *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Аннотация. Рассматривается процесс модификации свойств диффузионных слоев на основе бора и алюминия на поверхности инструментальных штамповых сталей 3Х2В8Ф и 5ХНМ импульсной электронно-пучковой обработкой с использованием источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. В результате обработки диффузионных слоев, максимальная микротвердость на поверхности стали 5ХНМ повышается с 800 HV до 1400 HV, на стали 3Х2В8Ф наоборот снижается с 1900 HV до 1700 HV.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, бороалитирование, импульсная электронно-пучковая обработка, микроструктура, микротвердость, износостойкость

1. Введение

В машиностроении для изготовления формообразующих инструментов (например, штампов), работающих в условиях высоких теплосиловых воздействий, используют легированные штамповые стали [1]. В инструментальном производстве разрабатываются новые методы повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей штамповой оснастки. В работах [2,3] отмечается перспективность комбинации различных методов химико-термической обработки и электронно-пучкового воздействия, в результате которого формируются повышенные эксплуатационные свойства.

Цель данной работы – оценка влияния импульсного электронно-пучкового воздействия на свойства диффузионных слоев на основе бора и алюминия на штамповых сталях марок 5ХНМ и 3Х2В8Ф.

2. Методика эксперимента

2.1. Методика получения диффузионных слоев и их последующая ЭПО

Образцы размерами 20х12х10мм из стали 5ХНМ и 3Х2В8Ф с диффузионными слоями на основе бора и алюминия, полученными химико-термической обработкой (ХТО) по технологии описанной в работе [4] подвергали электронно-пучковой обработке (ЭПО) в установке «СОЛО» с применением источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления в Институте сильноточной электроники СО РАН (г. Томск) [5].

ЭПО производилась в среде аргона при давлении в вакуумной камере 35 мПа в магнитном поле величиной до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 18 кэВ, диаметр пучка электронов 3 см. Ток пучка изменялся течение импульса длительностью 950 мкс в пределах 20 – 120А для обеспечения и удержания температуры 1800-2100 °С на поверхности образца через 150 мкс. Поверхность образцов подвергали трем финишным импульсам воздействия (общее число импульсов – 12), интервал времени между импульсами составлял 3 секунды [3].

Определение микротвердости насыщенных слоев осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3М. Нагрузка составляла 50 гр.

Испытание на износ проводилось по схеме «кольцо-колодка» при сухом трении скольжения на машине трения СМЦ-2. Скорость вращения контртела составила 0,8 м/с (n = 300 мин-1), нагрузка на пару трения – 70 кг. В качестве ролика (кольца) использовали закаленный диск из быстрорежущей стали Р6М5 твердостью 63 ± 2 HRC [4].

3. Эксперимент и результаты

Исследуемую область образцов после ХТО подвергали двенадцати импульсам воздействия, плавно повышая температуру от импульса к импульсу интервал времени между импульсами составлял 3 секунды, причем при финишных трех импульсах удерживалась температура около 2000°С. Критериями при выборе температурного диапазона было качество облученных образцов, а именно отсутствие дефектов в виде трещин, пор, непроплавов на поверхности. Типовые осциллограммы обработки образцов представлена на Рис.1. Ток разряда изменяли в течение импульса длительностью 1 мс, в пределах 20 – 120 А таким образом, чтобы температура на поверхности образца через 200 мкс после начала воздействия удерживалась около 1700 – 1900°С. Данная температура подобрана экспериментальным путем из диапазона 1100 – 2200°С, при которой облучаемая поверхность диффузионного слоя подвергается переплаву без дефектов (кратерообразование, высокая шероховатость и др.).

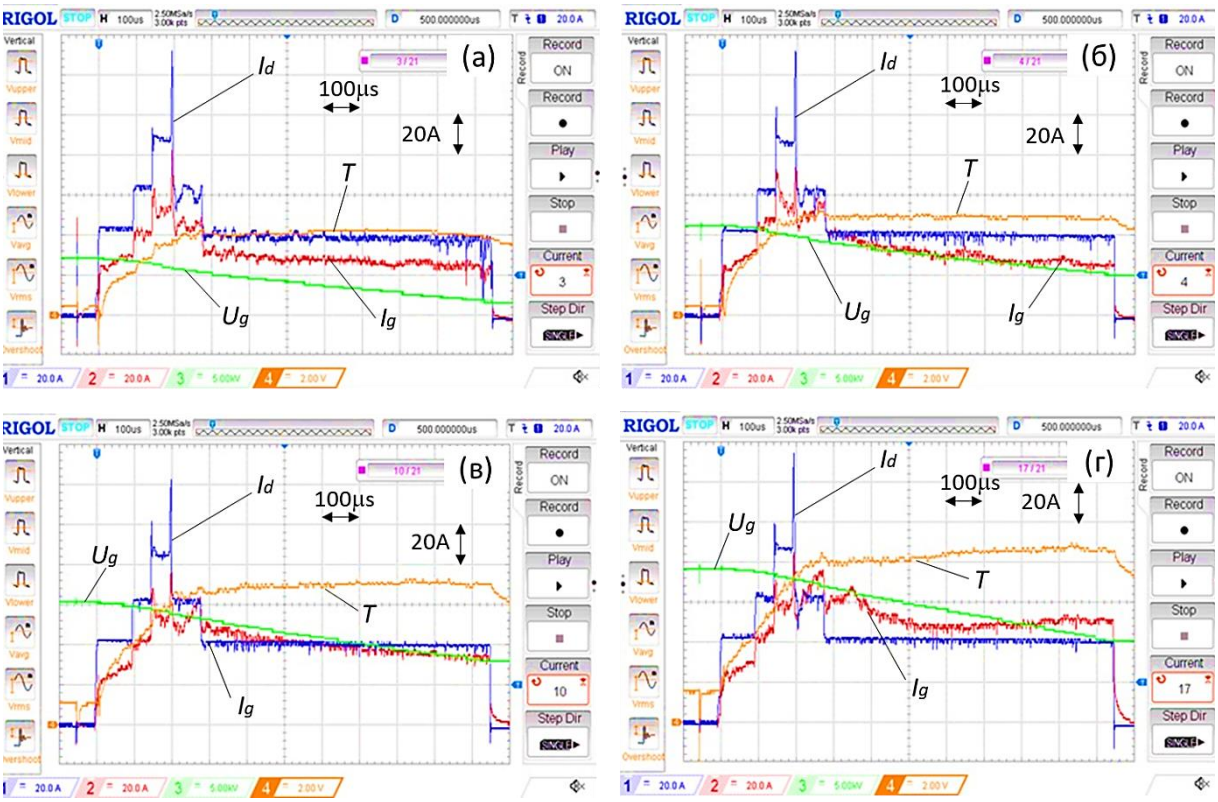


Рис.1. Осциллограммы обработки образцов с выдержкой температуры:
а)~1110°С; б) ~1300°С; в) ~1700°С; г) ~2000°С, где I_d, 20 А/деление, I_g, 20 А/деление, Т[°С] = 333+410×*Nкл.*, масштаб U_g – 5 кВ/деление, развертка – 100 мкс/деление

В результате ХТО на поверхности сталей 5ХНМ и 3Х2В8Ф формируется диффузионный слой толщиной до 650 мкм, а последующая ЭПО по ранее указанным режимам приводит к быстрому плавлению и рекристаллизации ДС на глубину до 220 мкм от поверхности. Микроструктура модифицированного слоя, полученного комбинированным упрочнением на сталях 5ХНМ и 3Х2В8Ф представлены на Рис.2а, б соответственно.

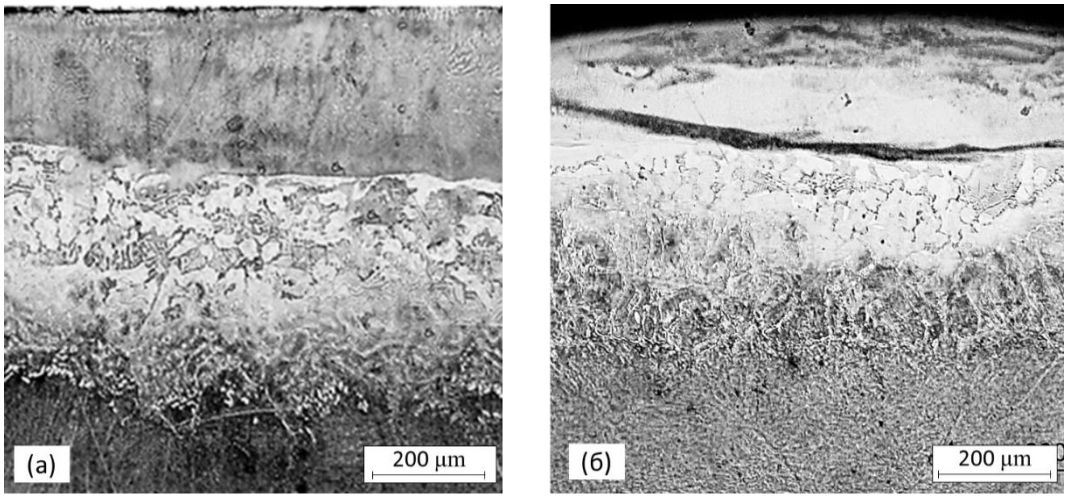


Рис.2. Структура упрочненного слоя: а) на стали 5ХНМ после ХТО и последующей ЭПО; б) на стали 3Х2В8Ф после ХТО и последующей ЭПО;

Микротвердость на стали 5ХНМ после ХТО составляет 650 – 800 HV на поверхности образца, затем наблюдается периодичность изменения значений, которые варьируются в интервале 400 – 860 HV при микротвердости основного металла 350 – 400 HV (Рис.3). Максимальная микротвердость составляет примерно 850 HV. Электронно-пучковая обработка приводит к повышению микротвердости на поверхности до 1200 HV, максимальное значение достигает 1400 HV [3]. В результате ЭПО ДС на стали 3Х2В8Ф максимальная микротвердость снижается с 2300 HV до значения 1500 HV, что в 1,5 раза ниже по сравнению с ХТО. Изменение характера микротвердости на всей глубине модификации после ЭПО имеет более благоприятное распределение (Рис.3,4).

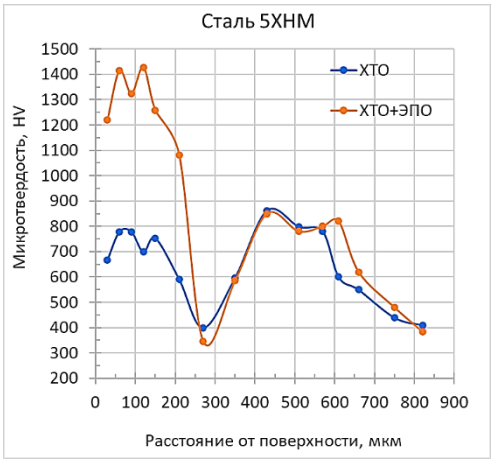


Рис.3. Распределение микротвердости по глубине слоя на стали 5ХНМ.

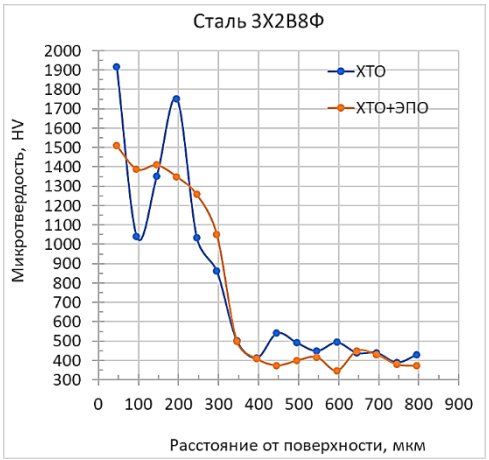


Рис.4. Распределение микротвердости по глубине слоя на стали 3Х2В8Ф.

На Рис.5,6 представлены графики потери массы от длительности испытаний на износостойкость сталей 5ХНМ и 3Х2В8Ф соответственно после ХТО и ЭПО в сравнении с необработанными образцами (металл в состоянии поставки). Так, наименьшую скорость потери массы от времени имеют образцы после дополнительной ЭПО ДС. Наименьшую скорость изнашивания имеет образец из стали 3Х2В8Ф с ДС после ЭПО. Так, наиболее работоспособными слоями являются слои, подвергнутые комбинированному упрочнению.

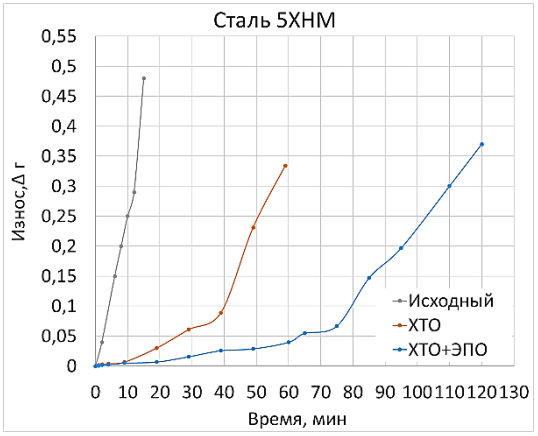


Рис.5. Зависимость потери массы от времени на стали 5ХНМ.

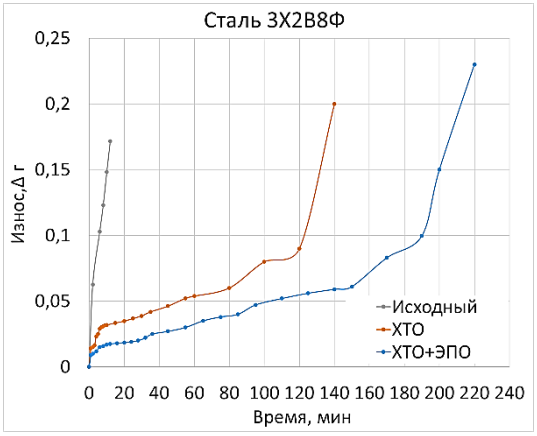


Рис.6. Зависимость потери массы от времени на стали 3Х2В8Ф.

4. Заключение

Результаты исследований показывают, что выбранные режимы ЭПО приводят к изменению структуры и свойств ДС на основе бора и алюминия, предварительно полученных методом ХТО. В результате ЭПО улучшается характер распределения микротвердости, повышается износостойкость поверхности.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П).

5. Литература

[1] Bao Z-J, Yang H-Y, Dong B-X, Chang F, Li C-D, Jiang Y, Chen L-Y, Shu S-L, Jiang Q-C, and Qiu F., “Development Trend in Composition Optimization, Microstructure Manipulation, and Strengthening Methods of Die Steels under Lightweight and Integrated Die Casting,” *Materials*, vol. **16**, p.6235, 2023; https://doi.org/10.3390/ma16186235

[2] Лысых С. А., Мишигдоржийн У. Л., Хараев Ю. П., Москвин П. В., Воробьёв М. С., Мокеев М. А., “Электронно-пучковая модификация боридных диффузионных слоев на поверхности штамповой стали 5ХНМ,” *Ползуновский Вестник*, номер **2**, стр.217, 2023; https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.028

[3] Н.С. Улаханов, У.Л. Мишигдоржийн, А.П. Семенов, А.С. Милонов, М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин, “Электронно-пучковая обработка диффузионных бороалитированных слоев на поверхности стали 5ХНМ”, *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*, номер **1**, стр.92, 2024; https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-92-102

[4] Улаханов Н., Мишигдоржийн У., Тихонов А., Шустов А., Пятых А., “Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием B-Al-слоев химико-термической обработкой,” *Упрочняющие технологии и покрытия*, номер **12**, стр.557, 2021; https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564

[5] Vorobyov M.S., Moskvin P.V., Shin V.I., Koval T.V., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Y., Koval N.N., Torba M.S. and Ashurova K.T., “Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode,” Tech. Phys, vol. **67**, p. 747, 2022; DOI: 10.21883/TP.2022.06.54422.14-22