

Г.Д. Мотовилина, К.Е. Садкин, Е.И. Хлусова, Е.А. Яковлева
НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»,
191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, E-mail: npk3@crism.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ MAGSTRONG H500 И МАТЕРИАЛА НАПЛАВОК НА ДЕТАЛИ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО ФЛОТА

Аннотация

Для оценки возможности замены деталей из листового проката стали марки Magstrong H500, выполнены исследования сравнительной износостойкости и способности к упрочнению поверхностных слоев при трении наплавки электродами марки ОЗН-400М и проволокой Св-08Х16Н5М3АБ на детали из низкоуглеродистой стали. Показано, что, несмотря на близкие значения твердости, исследованные материалы обладают различной износостойкостью.

Ключевые слова: высокопрочная мартенситная сталь, наплавка, износостойкость, трение, поверхностный слой, микроструктура, микротвердость.

Введение

На ряде проектов рыбопромысловых судов в подводной части судна предусмотрена конструкция, которая испытывает нагрузки трением и должна быть защищена износостойкой сталью. В качестве элементов защиты могут быть использованы как износостойкий листовой прокат, так и различные наплавки.

Выбор износостойкого материала для конкретных условий эксплуатации должен основываться на оценке структурных изменений и упрочнения контактирующей поверхности детали при трении [1, 2, 3]. Упрочнение в процессе трения (истирания) сплавов на основе железа возможно, за счет следующих механизмов:

- повышение плотности дислокаций и их закрепления в результате многократного пластического деформирования металлической матрицы любого исходного фазового состава [2];
- закрепление дислокаций карбидной фазой, образующейся при разогреве поверхности в процессе трения [3, 4];
- превращение метастабильного остаточного аустенита в мартенсит деформации при трении [5].

Стойкость к изнашиванию можно оценить по результатам сравнительных исследований твердости и структуры исходного материала и их изменением в поверхностном слое после контакта с контртелом.

Целью работы являлось определение сравнительной износостойкости и исследование способности к упрочнению при трении поверхностных слоев листового проката из стали марки Magstrong H500 и износостойких наплавки электродов марки ОЗН-400М и проволоки Св-08Х16Н5М3АБ на детали из низкоуглеродистой стали.

Материалы и методы исследования

Триботехнические испытания для сравнительной оценки износостойкости проводили на образцах:

- листового проката из стали марки Magstrong H500 толщиной 10 мм, предназначенного для изготовления и ремонта навесного оборудования карьерной, горно-шахтной, строительной и дорожно-строительной техники,
- наплавочных материалов: 1) электродов марки ОЗН-400М (17Г4С1), используемых для наплавки на детали, работающих в условиях трения и ударных нагрузок, и 2) высокопрочной сварочной проволоки марки Св-08Х16Н5М3АБ.

Образцы для испытаний на трение были изготовлены наплавкой на пластины из низколегированной стали размерами 100×80×10 мм:

- электродов ОЗН-400М (17Г4С1) Ø4 мм методом ручной дуговой сварки;
- проволоки Св-08Х16Н5М3АБ Ø1,2 мм методом механизированной сварки неплавящимся электродом. При послойном визуальном контроле в процессе сварки дефекты обнаружены не были. Химический состав и твердость исследованных материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав и твердость исследованных материалов

Характеристики		Листовой прокат из стали марки Magstrong H500	ОЗН-400М (17Г4С1)	Св-08Х16Н5М3АБ (сварочная проволока)
Массовая доля элементов (не более), %	C	0,3	0,17	≤0,08
	Si	0,2	2,0	0,2-0,6
	Mn	0,85	4,0	0,4-0,8
	P	0,012	0,03	≤0,015
	S	0,005	0,04	≤0,015
	Cr	0,5	-	15,0-17,0
	Ni	3,2	-	4,0-6,0
	Cu	0,35	-	0,4-0,75
	Mo	0,4	-	3,0-3,5
	V	0,035	-	-
	Al	0,05	-	-
	Ti	0,01	-	-
	Nb	0,01	-	0,1-0,2
	N	0,008	-	0,05-0,2
	B	0,005	-	-
Твердость HRC		50-53	38-48	40-43

Износостойкость материалов определяли в процессе триботехнических испытаний по двум методикам: по экспресс-методике на машине трения ИИ5018 и на стенде пяточного трения типа СПТ «М» в соответствии с ГОСТ Р 50740 и ГОСТ 30480 и СТО-07516250-151 [6-8]. Пары трения составляли из исследуемых образцов и контртела из стали марки Magstrong H500.

Триботехнические испытания по экспресс-методике на машине трения ИИ5018. Испытания проводили в синтетической морской воде при линейной скорости скольжения 0,1 м/с с нормальной нагрузкой на образец от 200 до 1000 Н.

В результате испытаний определяли интенсивность изнашивания (I_h) и коэффициент трения (f_c). Использование синтетической морской воды при проведении испытаний не подразумевает в данном случае моделирования коррозионных процессов вследствие ограниченности времени испытаний.

Триботехнические испытания на стенде типа СПТ «М» предназначены для воспроизведения и изучения основных закономерностей процесса износа материалов в условиях сухого или жидкостного трения при определённой скорости и контролируемой величине усилия.

Схема испытания включала в себя приработку – 30 минут с удельной нагрузкой 2,5 МПа; нагружение 30 минут с удельной нагрузкой 5 МПа (пройденный путь 5000 м); + пройденный путь 5000 м с удельной нагрузкой 10 МПа + пройденный путь 5000 м с удельной нагрузкой 15 МПа + пройденный путь 5000 м с удельной нагрузкой 20 МПа. Скорость скольжения составляла 0,25 м/с.

Износ определяли, через фиксированное расстояние, измеряя высоты образцов на компараторе марки ИЗВ-2 с ценой деления 0,1 мкм.

Поверхность трения испытанных образцов исследовали с применением растрового электронного микроскопа (РЕМ) «Philips-535», исследования микроструктуры проводили методами оптической металлографии на световом инвертированном металлографическом микроскопе «Axiovert 40 МАТ».

Измерения микротвердости проводили на шлифах, изготовленных по сечению образца, с помощью микротвердомера Durascan 50 при нагрузке 100 гс с шагом 200 мкм.

Результаты испытаний и их обсуждение

Результаты триботехнических испытаний. Результаты определения интенсивности изнашивания и коэффициента трения по экспресс-методике после испытания на машине трения ИИ5018 показали, что наименьшую интенсивность изнашивания в паре трения с Magstrong H500 имеет наплавка ОЗН-400М.

На рисунке 1 а приведена зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления, которая показывает, что разница в интенсивности изнашивания при увеличении нагрузки для листового проката стали марки Magstrong H500 и электродов ОЗН-400М незначительна и возрастает при увеличении контактного давления выше 35 МПа. Интенсивность изнашивания наплавки из проволоки Св-08Х16Н5М3АБ при контактном давлении ~ 20 МПа выше, чем у двух других материалов примерно в 10 раз.

На рисунке 1 б приведена зависимость величины износа образцов-столбиков от контактного давления после триботехнических испытаний на стенде типа СПТ «М». Результаты испытаний сопоставимы с полученными на машине трения ИИ5018. При удельной нагрузке ~ 15 МПа величина износа образцов наплавки из проволоки Св-08Х16Н5М3АБ в ~15 раз выше, чем у наплавки электродами ОЗН-400М и листового проката из стали марки Magstrong H500.

На основании результатов обеих методик испытаний можно заключить, что близкую износостойкость к стали марки Magstrong H500 имеет наплавка сварочными электродами ОЗН-400М. Наплавка из сварочной проволоки марки Св-08Х16Н5М3АБ обладает меньшей износостойкостью по сравнению с листовым прокатом из стали марки Magstrong H500 и наплавкой электродами ОЗН-400М.

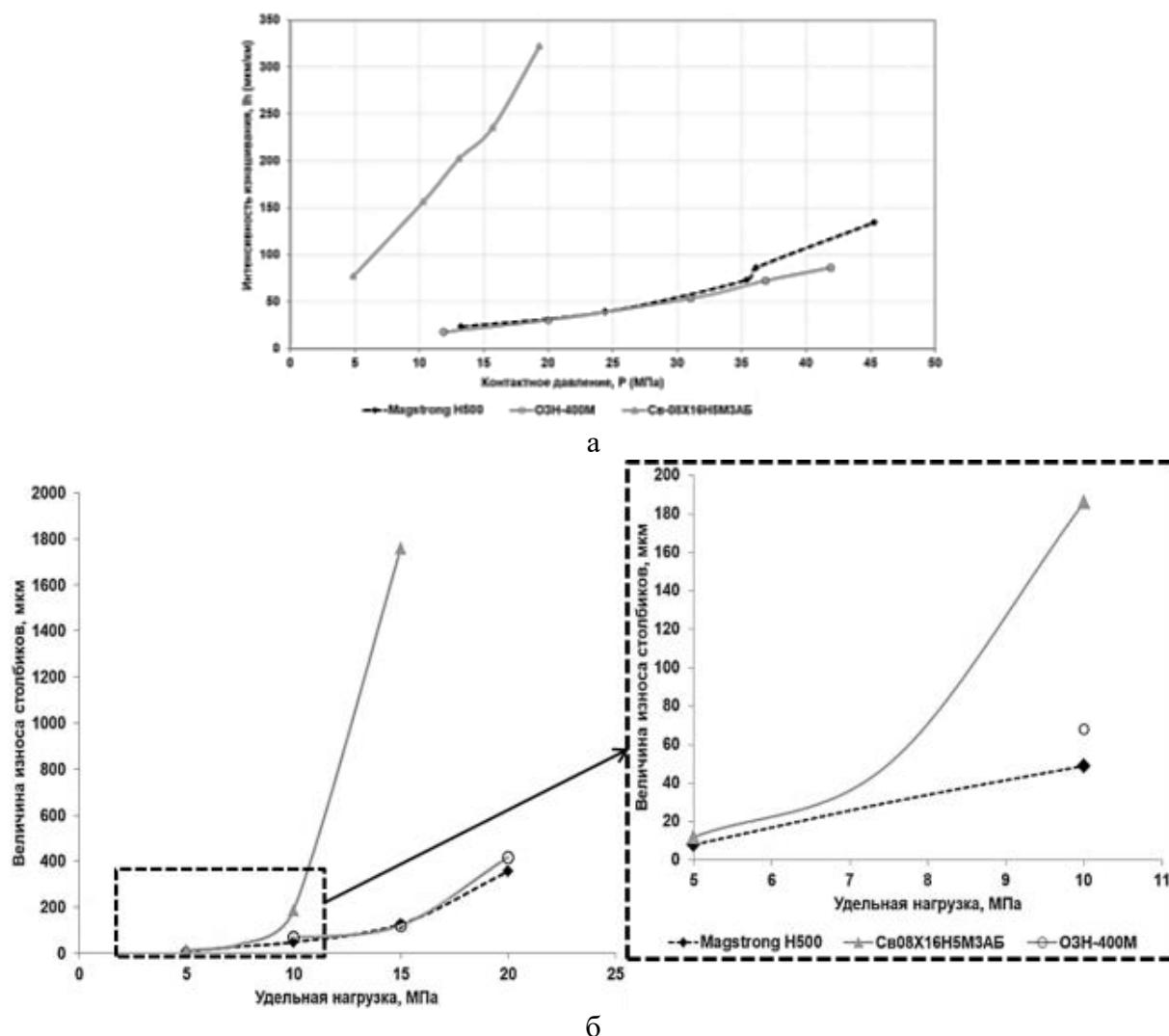


Рисунок 1 –Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления (а); зависимость величины износа образцов-столбиков из исследуемых материалов от удельной нагрузки в паре трения исследуемый материал / сталь марки Magstrong H500 (б).

Формирование рельефа на поверхности трения исследуемых образцов. На рисунке 2 приведены изображения поверхности трения образцов-столбиков из исследуемых материалов после испытаний на стенде СПТ «М».

На образцах пары Magstrong H500/Magstrong H500 при нагрузке 25 МПа наблюдаются выкрашивание кромок и задиры протяженностью до 200 мкм по краям дорожек трения. Поверхность трения имеет заглаженный рельеф, высота которого ≤ 35 мкм, рисунок 2 а, б.

У образцов из наплавки электродами ОЗН-400М (в паре с контртелом из стали марки Magstrong H500) частичное выкрашивание кромок начинается при нагрузке 15 МПа. На поверхности трения формируется рельеф высотой ~ 50 мкм, который также содержит элементы выкрашивания, рисунок 2 в, г. По контуру образца по краям отдельных дорожек трения наблюдаются задиры и отслоения.

На поверхности трения наплавки из сварочной проволоки марки Св-08Х16Н5М3АБ в паре со сталью Magstrong H500 интенсивное выкрашивание кромок происходит уже при нагрузке 10 МПа, по контуру образца по краям отдельных дорожек трения наблюдаются значительные задиры и отслоения. При

этом высота рельефа, сформированного в результате трения, достигает 50 мкм, рисунок 2 д, е.

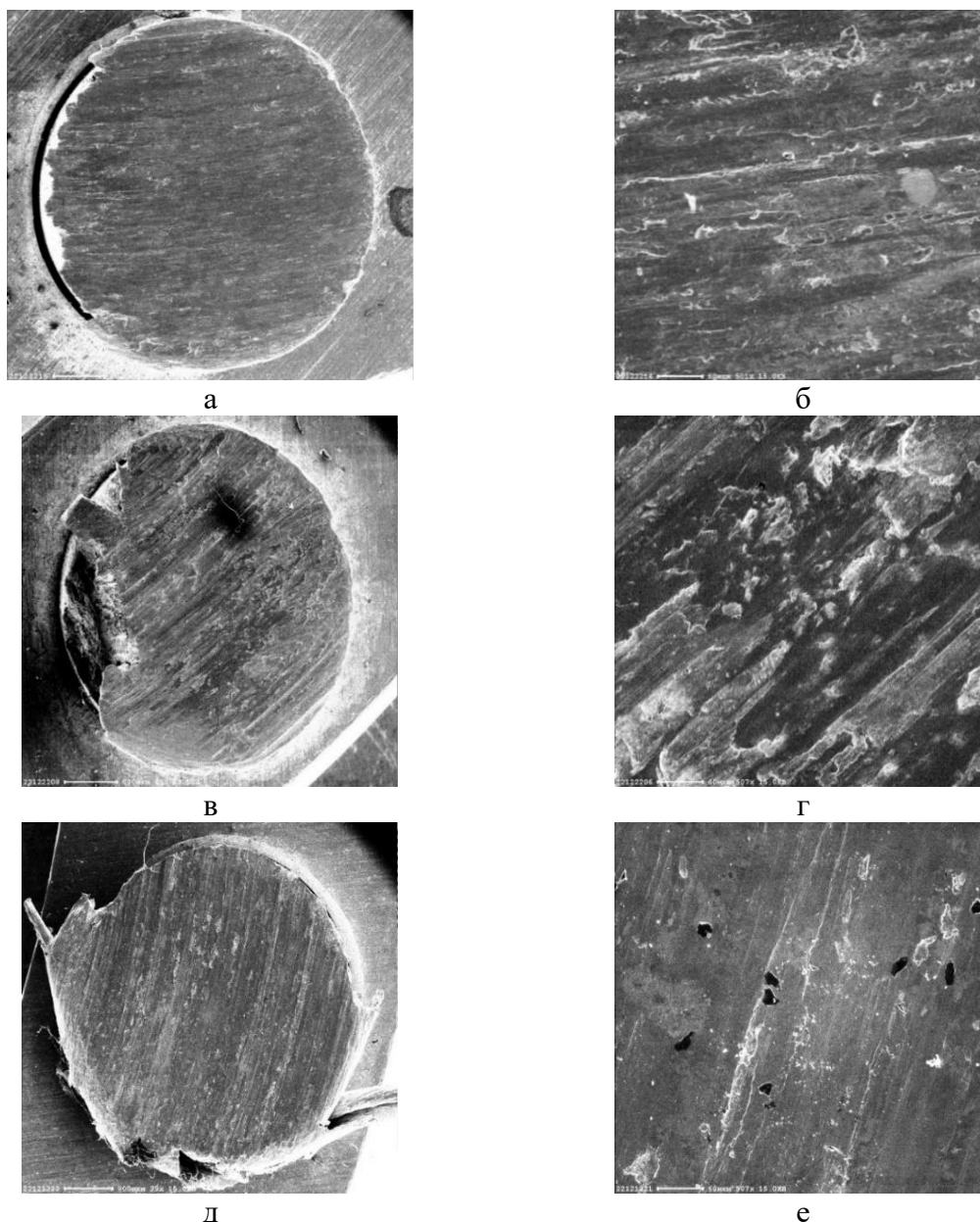


Рисунок 2 - Вид поверхности трения образцов после проведения испытаний на стенде типа СПТ «М» в паре трения Magstrong H500 / Magstrong H500 (а, б); ОЗН-400М / Magstrong H500 а (в, г), Св-08Х16Н5М3АБ / Magstrong H500 (д, е).

Микроструктура материала до и после триботехнических испытаний. Микроструктура образцов до и после испытаний представлена на рисунках 3-5. Мартенситная мелкозернистая полосчатая микроструктура стали марки Magstrong H500 в состоянии поставки, типична для листового проката данного класса прочности, рисунок 3 а. В процессе испытаний нагружение происходило перпендикулярно структурным полосам с образованием деформированной мелкодисперсной структуры в поверхностном слое толщиной ~5 – 20 мкм. В процессе трения происходило не только наращивание деформированного слоя, но и его отделение. Область зерен, ориентированных в направлении трения расположена под слоем, и имеет глубину от 15 - 35 мкм, рисунок 3 б, в.

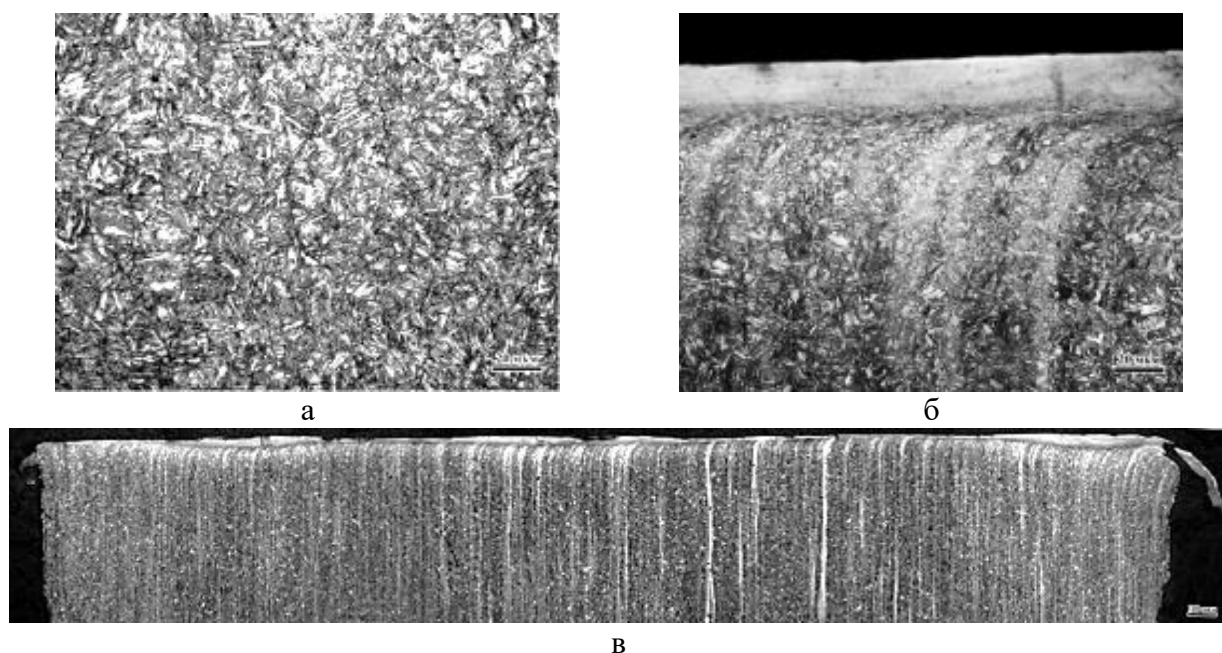


Рисунок 3 - Микроструктура образца из стали марки Magstrong H500 до (а) и после триботехнических испытаний (б, в).

Литая, дендритная микроструктура наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, образована преимущественно дислокационным пакетным мартенситом и бейнитом, рисунок 4 а. Деформированная область у поверхности трения имеет глубину ~ 20 - 50 мкм, при этом область структурной подстройки ниже деформированной области отсутствует, рисунок 4 б, в.

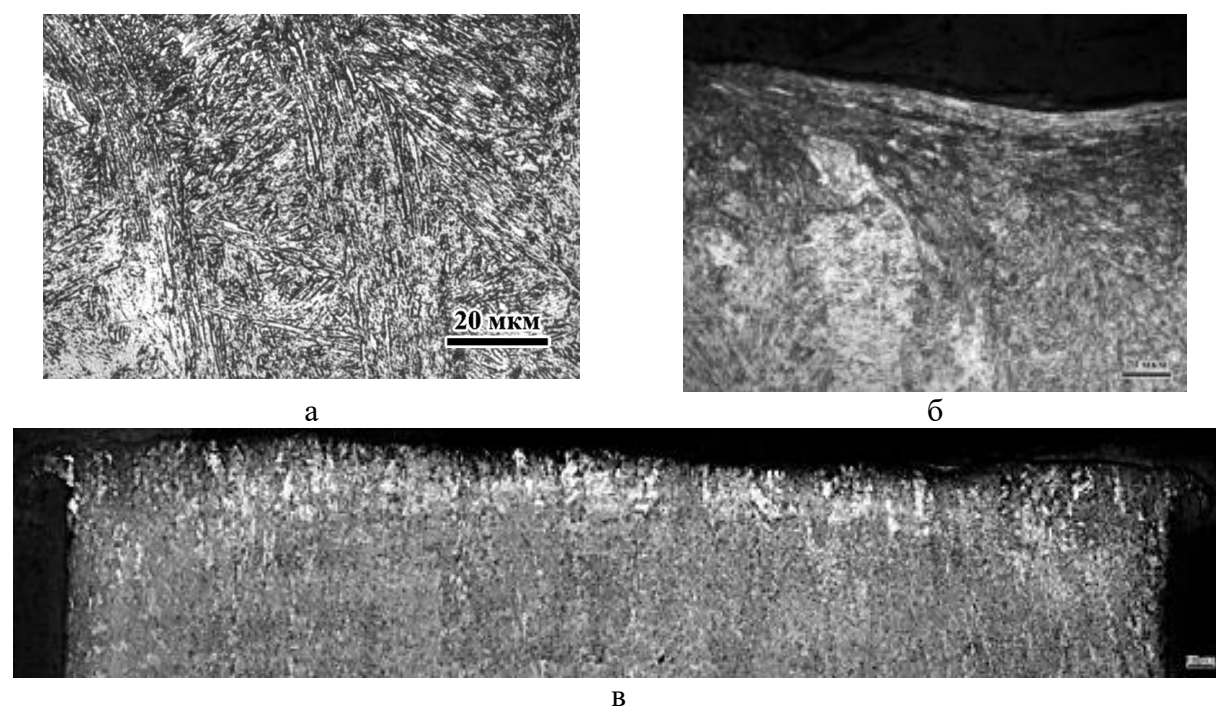


Рисунок 4 - Микроструктура образца из наплавки электродами ОЗН-400 М до (а) и после триботехнических испытаний (б, в).

Дендриты микроструктуры наплавки из сварочной проволоки Св-08Х16Н5М3АБ образованы мартенситом с прослойками аустенита, рисунок 5 а. Глубина деформированного слоя с вытянутыми фрагментами, ориентированными в направлении скольжения контртела у поверхности трения ~ 15 - 20 мкм. Область подстройки под деформированным слоем, образованная дендритами с границами,

частично ориентированными в направлении скольжения контртела, имеет глубину ≤ 120 мкм, рисунок 5 б, в.

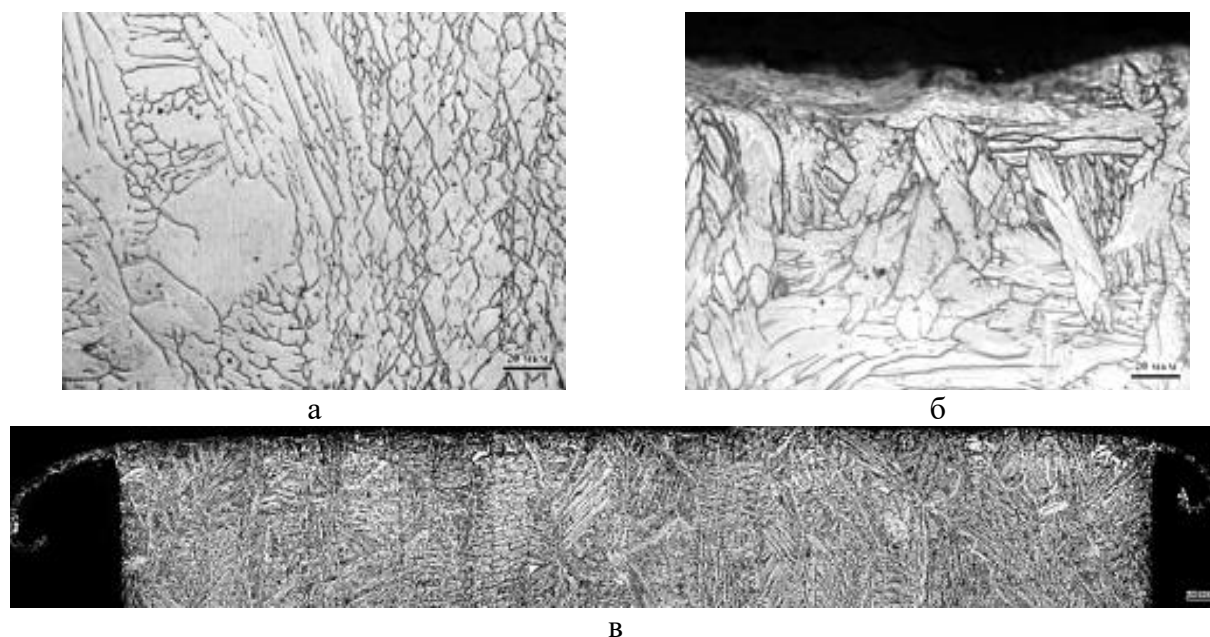


Рисунок 5 - Микроструктура образца из наплавки сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ до (а) и после триботехнических испытаний (б, в).

Результаты измерения микротвердости в поверхностных слоях испытанных образцов. Измерения микротвердости ($HV_{0,1}$) испытанных образцов для определения степени упрочнения поверхностного слоя в процессе трения были проведены с шагом 200 мкм при нагрузке 100 гс.

Микротвердость поверхностного слоя стали марки Magstrong H500 после трения возрастает до 698-757 $HV_{0,1}$, ($\sim 60-62$ HRC).

Наплавка, выполненная сварочными электродами ОЗН-400М, в процессе трения практически не упрочняется, но имеет высокие значения микротвердости как на поверхности трения, так и на удалении от нее, $\sim 440-450$ $HV_{0,1}$ (~ 45 HRC).

После испытания повышение микротвердости поверхностного слоя наплавки сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ до 630 $HV_{0,1}$, (~ 56 HRC) достигается за счет формирования фрагментированной деформированной структуры. На удалении 1,4 мм от поверхности микротвердость наплавленного металла ниже, 400 - 435 $HV_{0,1}$ ($\sim 40-45$ HRC), что сопоставимо с твердостью наплавки из ОЗН-400М.

В таблице 2 представлены обобщенные данные по результатам исследований и испытаний.

Таблица 2- Обобщенные данные по результатам исследований и испытаний

Материал	Степень упрочнения поверхностного слоя при трении (твердость поверхностного слоя / твердость основного металла ($HV_{0,1}$)), %	Глубина слоя с измененной структурой на поверхности трения, мкм	Глубина области структурной «подстройки», мкм	Интенсивность изнашивания, мкм (при нагрузке 10 МПа)
Magstrong H500	15	20	15-35	~ 49
СВ-08Х16Н5М3АБ	46	15-20	120	~ 186
ОЗН-400М	-	20-50	нет	~ 68

Заключение

Проведенные исследования показали сопоставимость результатов триботехнических испытаний, полученных на стенде пяточного трения СПТ «М» и испытаний по экспресс-методике на машине трения ИИ5018. Установлено, что:

1. Наплавка электродами ОЗН-400М имеет характеристики износостойкости, близкие к характеристикам износостойкости листового проката стали марки Magstrong H500. Наплавка сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ обладает значительно меньшей износостойкостью по отношению к стали марки Magstrong H500 и электродам ОЗН-400М (в 4 и 3 раза соответственно при нагрузке 10 МПа).

2. На поверхностях трения листового проката из стали марки Magstrong H500 и образцов наплавки, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ в процессе триботехнических испытаний, формируется слой с измененной деформированной структурой, под которым расположена область «подстройки» с зернами, ориентированными в направлении скольжения контртела. При этом упрочнение поверхностного слоя для листового проката стали Magstrong H500 составляет ~ 25% а у наплавки проволокой Св-08Х16Н5М3АБ ~ 50%. В образцах из наплавки электродами марки ОЗН-400М упрочнения поверхностного слоя не происходит, деформированная область у поверхности трения сосредоточена в узком слое глубиной ~ 20 - 50 мкм, при этом область структурной «подстройки» ниже деформированной области, отсутствует,

3. Элементы разрушения поверхности: выкрашивание кромок образцов из наплавки, выполненных электродами марки ОЗН-400М и проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ, испытанных в паре со сталью Magstrong H500, начинается при меньших нагрузках, чем при испытаниях пары Magstrong H500/Magstrong H500. Наиболее значительные задиры и отслоения образуются на поверхности образцов из наплавки, выполненной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ, что обусловлено микроструктурой исходного материала с более низкой твердостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах /Б.И. Костецкий. – К. : Техника, 1970. – 396 с.
2. М.И. Андрущенко, Р.А. Куликовский, С.П. Бережный, О.Б. Сопильняк. Способность к самоупрочнению поверхности трения и износостойкость наплавленного металла в условиях абразивного изнашивания / Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. - №1. – 2009. – с.30-37.
3. Выбор состава хромомарганцевой стали с метастабильным аустенитом в качестве основы наплавочного материала / Малинов Л.С., Чейлях А.П., Харланова Е.Я., Барышникова Т. В. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1994. – № 8. – С. 45–46.
4. В.А. Батаев., А.А. Батаев., Л.И. Тушинский, Д.Е. Буторин. Образование ориентированных цементитных скоплений в деформированных углеродистых сталях. МИТОМ, 2001, № 5. С. 5-7.
5. Филиппов М. А. Стали с метастабильным аустенитом / Филиппов М. А., Литвинов В. С., Немировский Ю. Р. –М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
6. ГОСТ Р 50740-95. Триботехнические требования и показатели Общие технические требования.
7. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования.
8. СТО-07516250-151-2013. Оценки износостойкости пар трения. Методика.

G.D. Motovilina, K.E. Sadkin, E.I. Khlusova, E.A. Yakovleva
NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 191015, St. Petersburg, Shpalernaya st., 49,
e-mail: npk3@crism.ru, (812) 611-02-84

**THE WEAR RESISTANCE RESEARCH OF ROLLED MAGSTRONG H500 STEEL
AND WELDING SURFACE LAYERS ON LOW-CARBON STEEL DETAILS FOR
FISHING FLEET**

Abstract

To estimate possibility to replace details made from rolled plates Magstrong H500 steel the comparative research wear resistance and hardness capability of the surfacing made on the low-carbon steel details with OZN-400M electrodes and Sv-08H16N5M3AB welding wire were carried out. It was shown, that in spite of the closer hardness value of research materials provide different wear resistance.

Keywords: high-strength martensitic steel, surfacing, wear resistance, friction, surface layer, microstructure, microhardness.