

УДК 691.714:620.178.162:620.18  
EDN TBCSPZ

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИЗНОСОСТОЙКОЙ СТАЛИ И НАПЛАВОК В ПРОЦЕССЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

**Г.Д. Мотовилина**, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

**К.Е. Садкин**, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

**Е.И. Хлусова**, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

**Е.А. Яковлева**, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, e-mail: npk3@crism.ru

С целью оценки возможности применения в элементах морских конструкций, подвергаемых износу, проведены сравнительные триботехнические испытания листового проката из стали марки Magstrong H500 и наплавов, выполненных электродами марки ОЗН-400М и сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ. Исследована структура, определена твердость поверхностного слоя, подвергнутого истиранию, и способность его к упрочнению при трении. Показано, что, несмотря на близкие значения твердости, исследованные материалы обладают различной износостойкостью.

Наиболее высокую стойкость к изнашиванию имеет листовой прокат из стали марки Magstrong H500 с мартенситной структурой, которая обладает большей способностью к деформационному упрочнению. Наиболее низкой износостойкостью обладают образцы с наплавкой, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ, вследствие того, что у поверхности трения создаются самый тонкий слой с измененной деформированной структурой и широкая область «подстройки».

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

**Для цитирования:** Мотовилина Г.Д. Исследование упрочнения поверхностных слоев износостойкой стали и наплавов в процессе триботехнических испытаний / Г.Д. Мотовилина, К.Е. Садкин, Е.И. Хлусова, Е.А. Яковлева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 125 — 136. — EDN TBCSPZ.

## STUDY OF SURFACE LAYERS HARDENING OF WEAR-RESISTANT STEEL AND SURFACING DURING FRICTION TESTS

**G.D. Motovilina**, PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

**K.E. Sadkin**, PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

**E.I. Khlusova**, DSc, Professor, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

**E.A. Yakovleva**, PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: npk3@crism.ru

For evaluation of applicability in marine constructions, the comparative friction tests have been carried out to determine the wear resistance of Magstrong H500 steel rolled plates and surfacing made with OZN-400M electrodes and welding solid wire. The structure has been studied and the hardness of the surface layers subjected to abrasion has been determined. It is shown that materials with similar hardness values have different wear resistance.

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

**For citation:** Motovilina G.D., Sadkin K.E., Khlusova E.I., Yakovleva E.A. Study of surface layers hardening of wear-resistant steel and surfacing during friction tests. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 125 — 136. EDN TBCSPZ. (In Russ.)

## ВВЕДЕНИЕ

Для ряда конструкций рыбопромысловых судов, таких как башмаки тралов, шахты «moon pool», требуется применение износостойких материалов. В случае шахты для защиты ее днищевой части возможно применение как накладных листов из износостойкого проката, так и износостойких наплавочных материалов, обеспечивающих эксплуатацию в контакте с морской водой.

Выбор материалов должен быть обусловлен не только требованиями по износостойкости материалов и условиям эксплуатации, но и требованиями по технологичности при изготовлении корпусных конструкций.

Изнашивание (истирание) при трении определяется процессами, происходящими в области контакта материалов. Известно, что контактное давление при трении неизбежно упрочняет материал. Упрочняясь вследствие локализации пластической деформации при усилении контактного давления, поверхностный слой металлического материала по механическим свойствам может существенно отличаться от исходного состояния. Достоверно спрогнозировать сопротивляемость изнашиванию, ориентируясь на механические свойства (твердость), заявленные в сертификате на листовой прокат или в нормативной документации, затруднительно.

В процессе трения происходит изменение структуры контактирующей поверхности материала и ее «подстройка» к внешнему воздействию. В ряде работ показано, что упрочнение поверхности при трении можно рассматривать как один из аспектов при выборе износостойкого материала применительно к конкретным условиям эксплуатации [1 — 4].

Упрочнение в процессе трения (истирания) сплавов на основе железа возможно главным образом на основе следующих механизмов:

- закрепление и повышение плотности дислокаций в результате многократного пластического деформирования металлической матрицы любого исходного фазового состава [2];
  - закрепление дислокаций мелкодисперсными карбидами, выделяющимися по плоскостям скольжения кристаллической решетки в процессе трения [3];
  - превращение метастабильного остаточного аустенита в мартенсит деформацией при трении [5 — 7].
- Одновременно происходит механический наклеп как исходного твердого раствора, не претерпевшего превращений, так и образованного в процессе трения мартенсита. При этом степень упрочнения при участии деформационных фазовых превращений может быть выше, чем максимально достигаемая микротвердость исключительно при механическом наклепе.

Из литературных данных известно, что в процессе изнашивания при чрезвычайно интенсивных воздействиях на материал поверхностных слоев может иметь место существенный разогрев, активизирующий процессы старения твердых растворов, или растворения упрочняющей карбидной фазы [8]. Механизм упрочнения и твердость формирующегося поверхностного слоя определяются структурой и химическим составом выбранного материала [9, 10]. В общем случае стойкость к изнашиванию может быть оценена по результатам сравнительных исследований твердости и структуры исходного материала и их изменения в приповерхностном упрочненном слое после контакта с контртелом.

Целью работы являлось исследование сравнительной износостойкости и способности к упрочнению при трении поверхностных слоев листового проката из стали марки Magstrong H500 и различных наплавов.

## 1. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения триботехнических испытаний и сравнительной оценки износостойкости были выбраны:

- листовой прокат из стали марки Magstrong H500 толщиной 10 мм, предназначенный для изготовления и ремонта навесного оборудования карьерной и горно-шахтной техники (ковши, лопаты, отвалы и т.д.), навесного оборудования строительной и дорожно-строительной техники, кузовов карьерных самосвалов, бетономешалок и т.д.;

- сварочные (наплавочные) материалы: электроды марки ОЗН-400М (17Г4С1), которые широко применяются для наплавки деталей из углеродистых и низколегированных сталей, работающих в условиях трения и ударных нагрузок, и сварочная проволока марки Св-08Х16Н5М3АБ, обладающая высокой прочностью.

Для изготовления образцов для испытаний на трение на пластины 100 × 80 × 10 мм из высокопрочной стали были выполнены наплавки:

- методом ручной дуговой сварки электродами ОЗН-400М (17Г4С1) Ø 4 мм;
- методом механизированной сварки неплавящимся электродом проволокой Св-08Х16Н5М3АБ Ø 1,2 мм.

В процессе сварки выполняли послойный визуальный контроль. Трещины и иные дефекты обнаружены не были.

Химический состав и механические свойства исследованных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав и механические свойства согласно требованиям нормативной документации**

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	—	—
Временное сопротивление, МПа		≥ 1500	—	1330
Предел текучести, МПа		≥ 1200	—	1040
Твердость HRC		50 — 53	38 — 48	40 — 43
Относительное удлинение A5, %		≥ 10 (A <sub>50</sub> , %)	—	15 — 16
Работа удара, KV (температура испытаний), Дж		≥ 30 (–40 °С) KCV	—	60 — 130 (20 °С)

Триботехнические испытания для оценки износостойкости проводили по двум методикам: по экспресс-методике определения триботехнических характеристик на машине трения ИИ 5018 и на стенде пяточного трения типа СПТ «М», предназначенного для воспроизведения и изучения основных закономерностей процесса износа материалов в условиях сухого, пограничного или жидкостного трения, в соответствии с ГОСТ Р 50740 и ГОСТ 30480 и СТО-07516250-151 [11 — 13].

Исследования проводили на парах трения, состоящих из исследуемых образцов и контртела из стали марки Magstrong H500.

**1.1. Проведение триботехнических испытаний по экспресс-методике на машине трения ИИ 5018.**

За основу методики экспериментальных исследований коэффициента трения и интенсивности изнашивания в диапазоне температур от 20 до 250 °С принята методика экспрессных комплексных триботехнических испытаний.

Условия испытания: линейная скорость скольжения 0,1 м/с, нормальная нагрузка на образец от 200 до 1000 Н, в синтетической морской воде.

Триботехнические испытания проводились с целью определения интенсивности изнашивания ( $I_h$ ) и коэффициента трения ( $f_c$ ). Следует отметить, что использование синтетической морской воды при проведении испытаний не подразумевает в данном случае моделирования коррозионных процессов вследствие ограниченности времени испытаний.

**1.2. Проведение триботехнических испытаний на стенде типа СПТ «М».**

Стенды типа СПТ представляют собой технологическое оборудование с регулируемым по скорости приводом и вертикальным валом и предназначены для воспроизведения и изучения основных закономерностей процесса износа материалов в условиях сухого или жидкостного трения.

Нагрузка на стенде создается «прижимным» механизмом. Величина усилия контролируется динамометром. Пара трения представляет собой шайбу и кольцо. Шайба имеет три отверстия диаметром 5 мм и глубиной 10 мм. В эти углубления, расположенные под углом 120°, вставляют цилиндрические образцы, изготовленные из испытуемого материала.

Испытания проводили по следующей схеме: приработка — удельная нагрузка 2,5 МПа (30 мин); + нагружение с удельной нагрузкой 5 МПа (30 мин); удельная нагрузка 5 МПа — пройденный путь 5000 м; удельная нагрузка 10 МПа — пройденный путь 5000 м; удельная нагрузка 15 МПа — пройденный путь 5000 м; удельная нагрузка 20 МПа — пройденный путь 5000 м.

Дополнительные условия испытаний: скорость скольжения — 0,25 м/с; среда — проточная бытовая вода. Испытания проводили при воздействии заданной осевой нагрузки.

Через фиксированное расстояние определяли износ посредством измерения высоты образцов с помощью компаратора марки ИЗВ-2 с ценой деления 0,1 мкм.

В процессе испытаний по индикатору (динамометру) фиксировали момент трения и вычисляли коэффициент трения  $\mu_c$  по формуле:

$$\mu_c = \frac{0,1 \times m \times k}{D_{\text{ср}} \times q \times S_d}, \quad (1)$$

где  $m$  — количество делений индикатора (динамометр);

$k$  — коэффициент, учитывающий упругую деформацию стальной пластины, изгиб которой фиксирует индикатор (динамометр);

$D_{\text{ср}}$  — средний диаметр дорожки трения, мм;

$S_d$  — площадь дорожки трения, мм<sup>2</sup>.

Для оценки возможности упрочнения материала при истирании были проведены исследования поверхности трения образцов после испытаний на стенде типа СПТ «М» методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и оптической металлографии. Исследование поверхности трения испытанных образцов выполняли с применением РЭМ «Philips 535», исследования микроструктуры методами оптической металлографии — с помощью светового инвертированного металлографического микроскопа «Axiovert 40 MAT».

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

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Результаты триботехнических испытаний.

Результаты определения интенсивности изнашивания и коэффициента трения по экспресс-методике после испытания на машине трения ИИ 5018 представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения коэффициента трения, интенсивности изнашивания в зависимости от контактного и номинального давления, определенные по экспресс-методике на машине трения ИИ 5018**

Нормальная нагрузка, Н	200	400	600	800	1000
Пара трения Magstrong H500 (45 HRC) / Magstrong H500 (45 HRC)					
Контактное давление (начальное), МПа	10,88	19,21	33,89	36,07	42,18
Интенсивность изнашивания, $I_h$ , мкм/км	25,12	44,76	86,24	104,58	163,75
Коэф. трения, $f_{\text{тр}}$	0,43	0,41	0,40	0,40	0,45
Пара трения ОЗН-400М (38 — 48 HRC) / Magstrong H500 (45 HRC)					
Контактное давление (начальное), МПа	11,88	20,00	31,03	31,03	41,91
Интенсивность изнашивания, $I_h$ , мкм/км	17,69	30,33	53,36	53,36	86,21
Коэф. трения, $f_{\text{тр}}$	0,42	0,42	0,44	0,44	0,44
Пара трения Св-08Х16Н5М3АБ (40 — 43 HRC) / Magstrong H500 (45 HRC)					
Контактное давление (начальное), МПа	4,89	10,30	13,09	15,68	19,31
Интенсивность изнашивания, $I_h$ , мкм/км	77,30	156,62	202,34	235,49	322,05
Коэф. трения, $f_{\text{тр}}$	0,46	0,42	0,41	0,38	0,39

Коэффициент трения, определенный по экспресс-методике, с увеличением номинальной нагрузки изменяется незначительно для всех исследуемых пар трения и составляет  $\sim 0,38 — 0,45$ , что близко к имеющимся данным для пар трения «сталь по стали» в условиях недостаточной смазки. Наименьшая интенсивность изнашивания у наплавки ОЗН-400М в паре трения ОЗН-400М / Magstrong H500.

По результатам испытаний построена зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления (рис. 1а). По характеру расположения кривых видно, что разница в интенсивности изнашивания при увеличении нагрузки для листового проката стали марки Magstrong H500 и электродов ОЗН-400М незначительна и находится в пределах погрешности измерений.

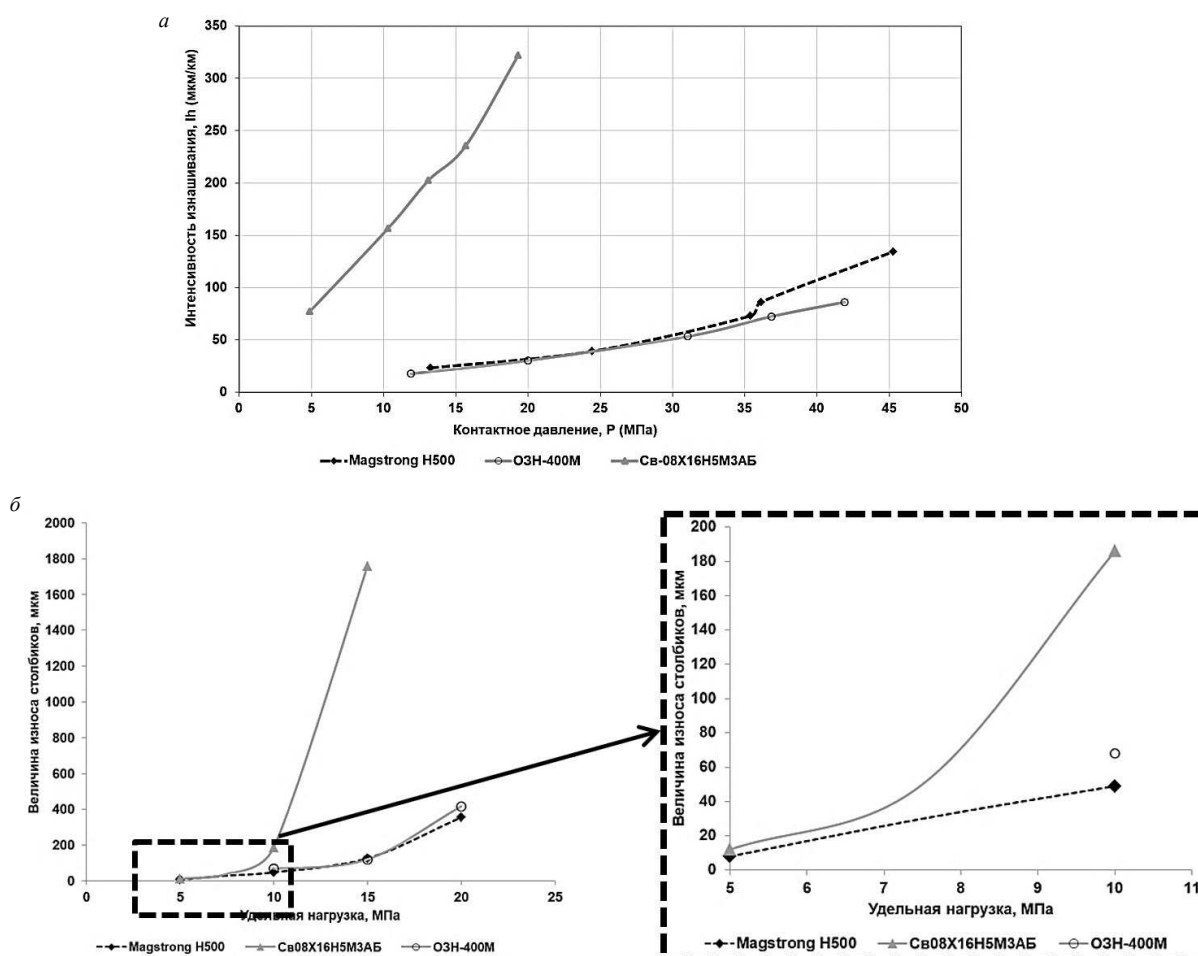


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления по экспресс-методике ИИ 5018 (а); зависимость величины износа образцов-столбиков из исследуемых материалов от удельной нагрузки на стенде СПТ «М» в паре трения «исследуемый материал / сталь марки Magstrong H500» (б)

Результаты триботехнических испытаний на стенде типа СПТ «М» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения величины износа столбиков в паре трения:  
исследуемый материал/сталь марки Magstrong H500 на стенде типа СПТ «М»

Удельная нагрузка, МПа	5	7,5	10	15	20
Пара трения Magstrong H500/Magstrong H500					
Величина износа столбиков, мкм	8	—	49	126	355
Коэффициент трения	0,29	—	0,45	0,45	0,38
Пара трения O3H-400M/Magstrong H500					
Величина износа столбиков, мкм	—	—	68	121	417
Коэффициент трения	—	—	0,45	0,30	0,40
Пара трения Sv-08X16H5M3AB / Magstrong H500					
Величина износа столбиков, мкм	12	—	186	1756	—
Коэффициент трения	—	—	0,48	0,40	—

Коэффициент трения в паре трения «исследуемый материал / сталь Magstrong H500», определенный на стенде типа СПТ «М», изменяется в более широких пределах и составляет 0,27 — 0,45, но также характерен для пар трения «сталь по стали» в условиях недостаточной смазки. На рис. 1б представлена зависимость величины износа образцов-столбиков от удельной нагрузки.



Полученные по обоим методикам результаты испытаний показали сходимость: близкую износостойкость к стали марки Magstrong H500 имеет наплавка сварочными электродами ОЗН-400М. Наплавленный сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ материал обладает меньшей износостойкостью по отношению к стали марки Magstrong H500.

## 2.2. Формирование рельефа на поверхности трения исследуемых образцов.

На рис. 2 приведены фотографии поверхности трения образцов-столбиков из исследуемых материалов после испытаний на стенде СПТ «М».

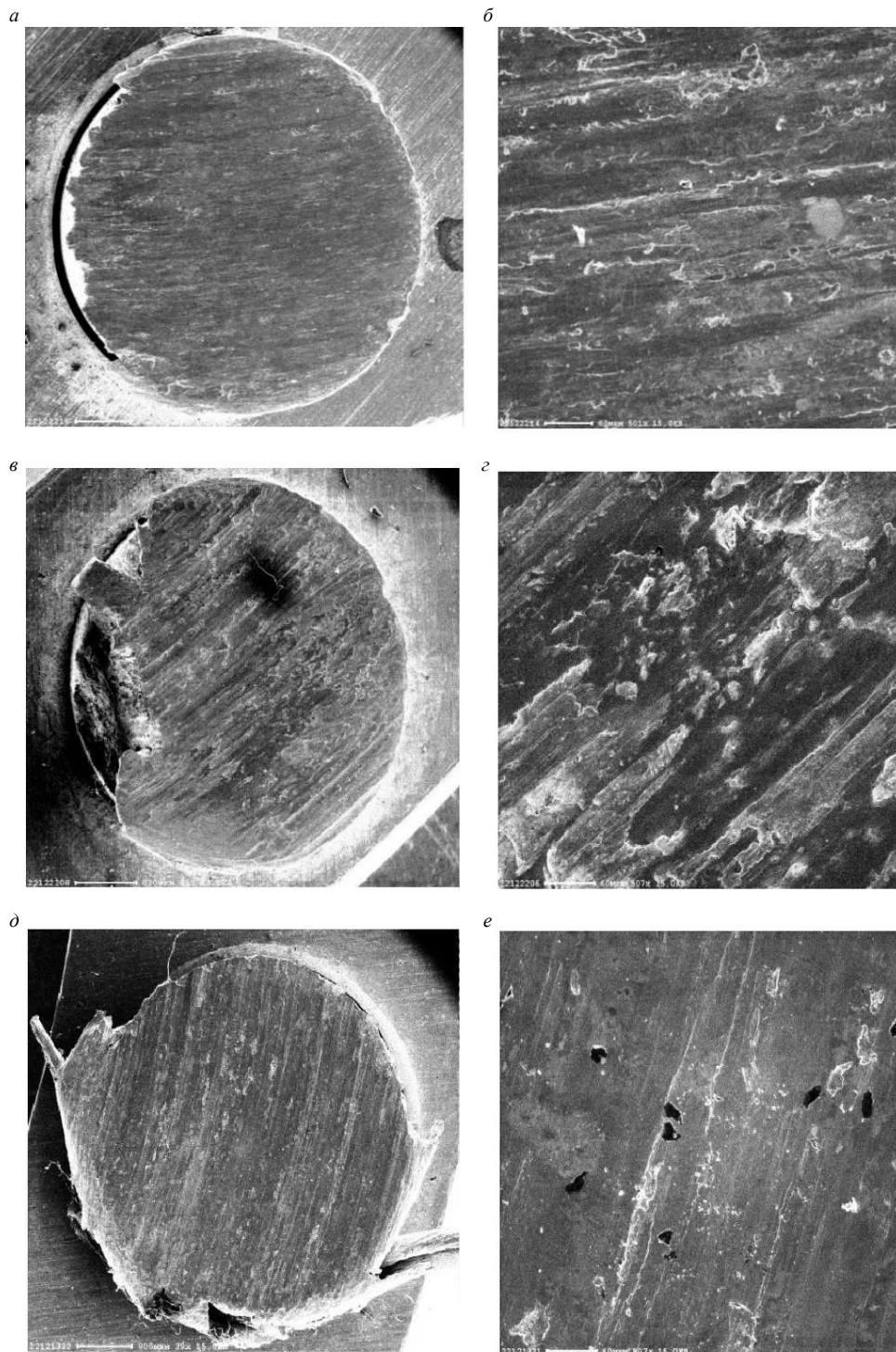


Рис. 2. Вид поверхности трения образцов после проведения испытаний на стенде типа СПТ «М» в парах трения Magstrong H500/Magstrong H500 (а, б), ОЗН-400М/Magstrong H500 (в, г), Св-08Х16Н5М3АБ/Magstrong H500 (д, е)

После испытаний пары Magstrong H500/Magstrong H500 при нагрузке 25 МПа на образцах наблюдается выкрашивание кромок, по краям дорожек трения присутствуют задиры протяженностью до 200 мкм. Поверхность трения образцов характеризуется заглаженным рельефом (рис. 2а, б).

На образцах из наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, при испытаниях в паре со сталью Magstrong H500 частичное выкрашивание кромок начинается при нагрузке 15 МПа. На поверхности трения формируется рельеф, который также содержит следы выкрашивания (рис. 2в, г). По контуру образца по краям отдельных дорожек трения наблюдаются задиры и отслоения, особенно существенные в местах выхода внутренних трещин, образовавшихся при формировании наплавки.

На образцах наплавки сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ при испытании 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 (рис. 2д, е).

### 2.3. Исследование микроструктуры материала до и после триботехнических испытаний.

Микроструктура образцов до и после испытаний представлена на рис. 3 — 5. Микроструктура стали марки Magstrong H500 в состоянии поставки мелкозернистая, полосчатая (структурные полосы расположены вдоль направления прокатки), мартенситная, типична для листового проката данного класса прочности (рис. 3а). После испытаний, в процессе которых нагружение происходило перпендикулярно структурным полосам, в поверхностном слое образуется деформированная мелкодисперсная структура. Слой с измененной структурой толщиной  $\sim 5$  — 20 мкм распределен по поверхности неравномерно, в процессе трения происходило не только его наращивание, но и отделение. Под слоем с измененной структурой расположена область зерен, ориентированных в направлении трения, глубиной от 15 до 35 мкм (рис. 3б, в). В работе [10] близкие к наблюдаемым изменения поверхностного слоя после трения связывают с формированием ячеистой структуры в процессе пластической деформации при умеренных температурах и выделением карбидных частиц из твердого раствора.

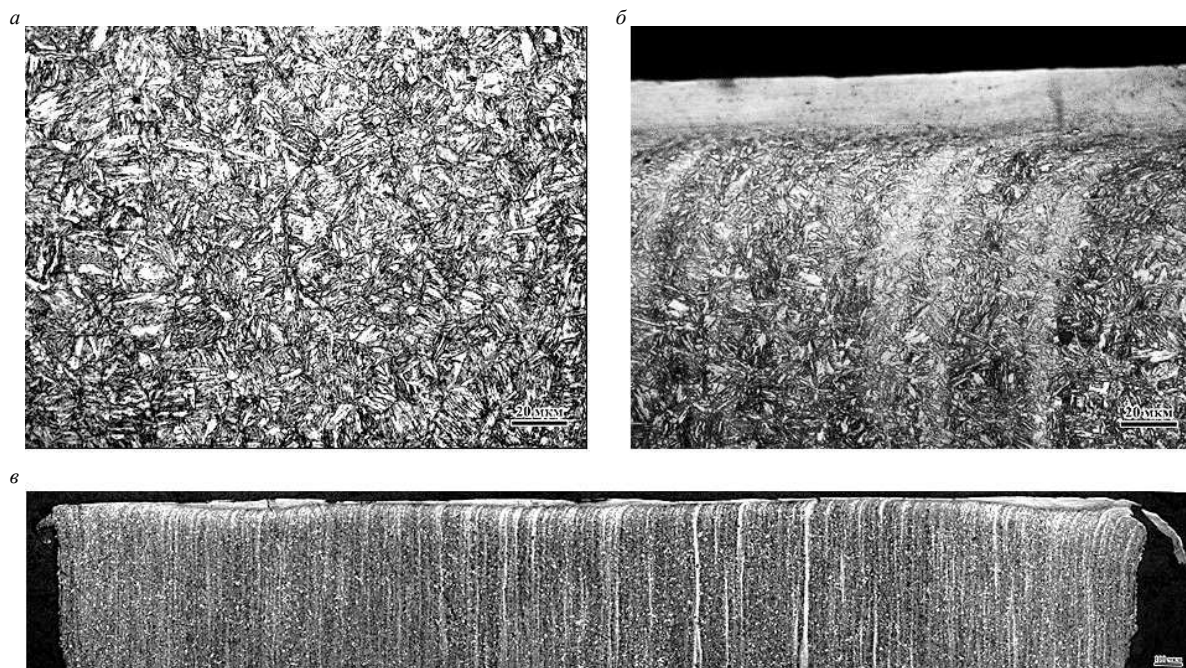


Рис. 3. Микроструктура образца из стали марки Magstrong H500 до (а) и после (б, в) триботехнических испытаний

Исходная микроструктура наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, литая, дендритная, представлена преимущественно дислокационным пакетным мартенситом и бейнитом (рис. 4а). Деформированная область у поверхности трения сосредоточена в узком слое глубиной  $\sim 20$  — 50 мкм, при этом область структурной «подстройки» ниже деформированной области, то есть область зерен, ориентированных в направлении трения, отсутствует (рис. 4б, в).



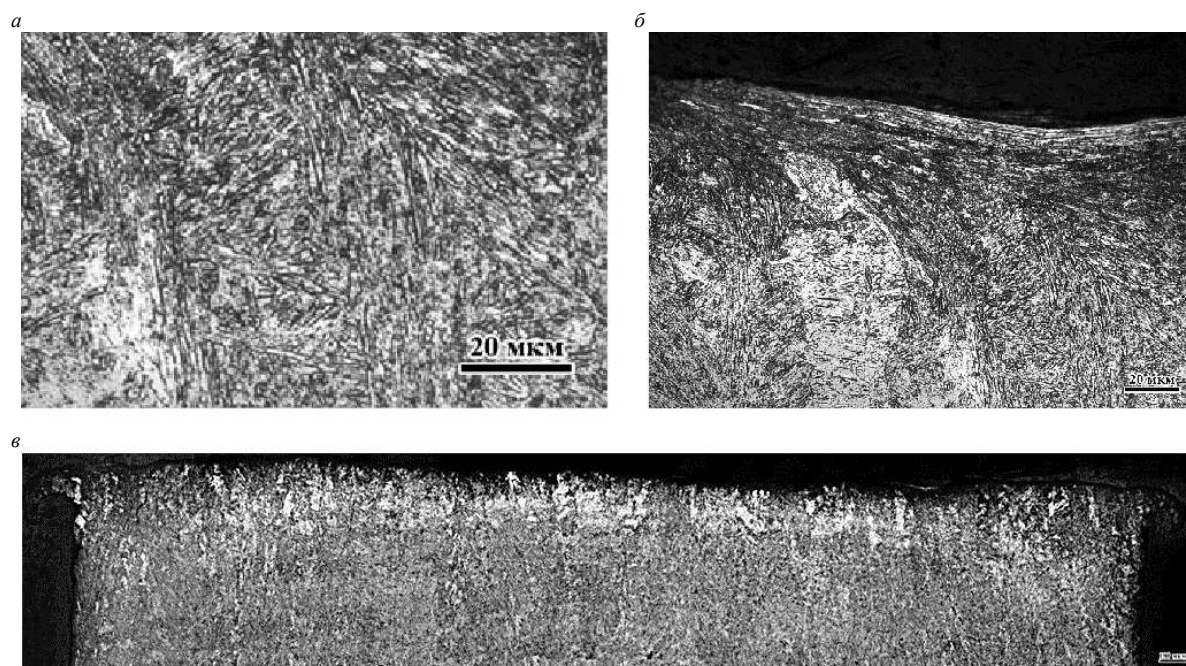


Рис. 4. Микроструктура образца из наплавки электродами ОЖН-400 М до (а) и после (б, в) триботехнических испытаний

Микроструктура наплавки, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ, мартенситная с прослойками аустенита, имеет дендритное строение (рис. 5а). У поверхности трения присутствует деформированный слой с измененной структурой глубиной  $\sim 15 - 20$  мкм, вытянутые фрагменты которой ориентированы в направлении скольжения контртела. Область «подстройки» под деформированным слоем, образованная дендритами с границами, частично ориентированными в направлении скольжения контртела, имеет глубину  $\leq 120$  мкм, рис. 5б, в.

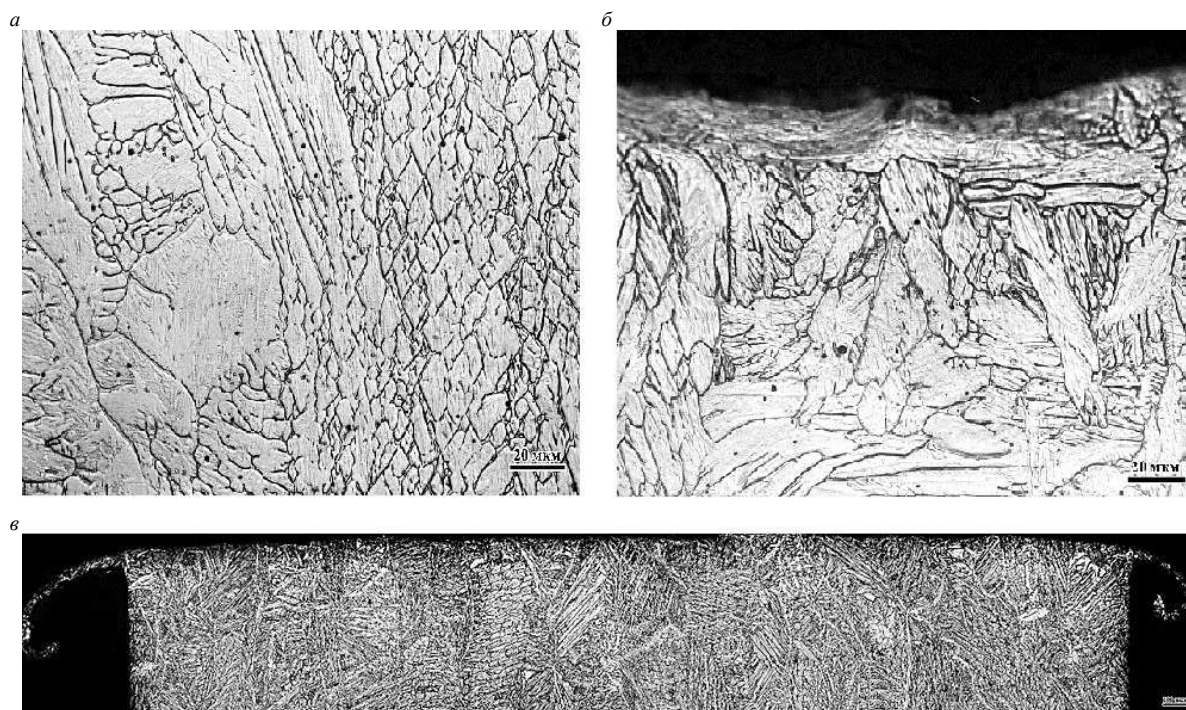


Рис. 5. Микроструктура образца из наплавки сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ до (а) и после (б, в) триботехнических испытаний



#### 2.4. Результаты измерения микротвердости в поверхностных слоях испытанных образцов.

Для определения степени упрочнения поверхностного слоя в процессе трения были проведены измерения микротвердости  $HV_{0,1}$  (с шагом 200 мкм при нагрузке 100 гс) испытанных образцов, результаты приведены на рис. 6.

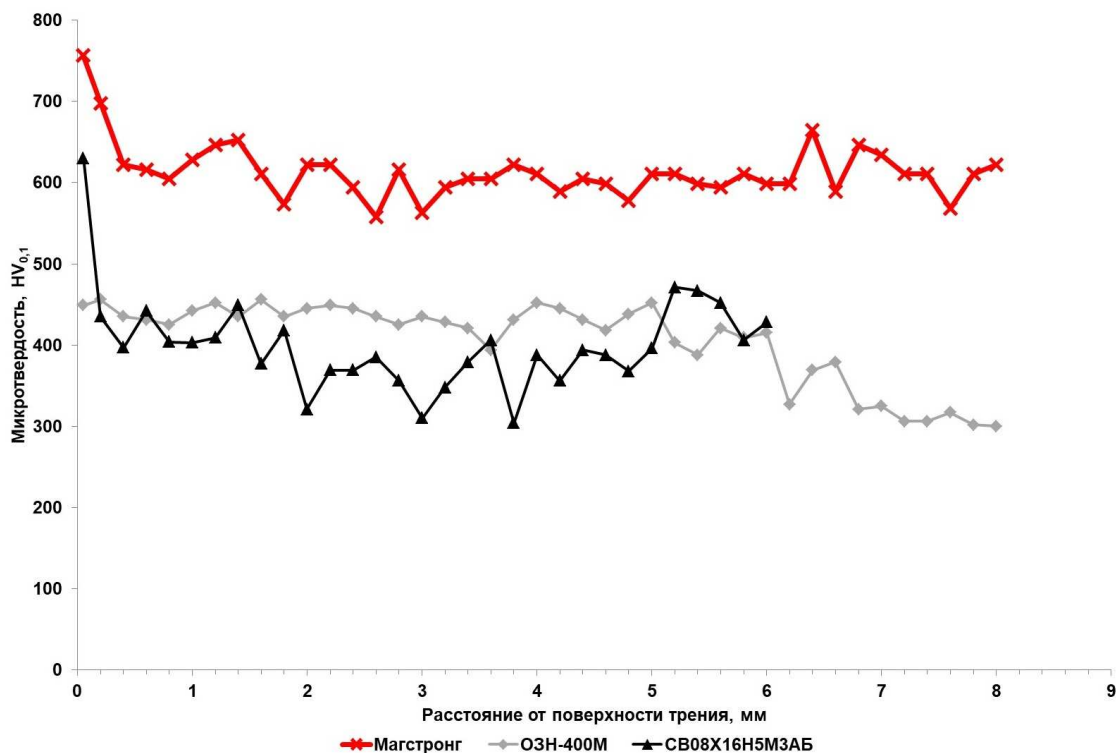


Рис. 6. Изменение микротвердости в поверхностных слоях образцов, испытанных на износ при трении в паре «исследованный материал / сталь марки Magstrong H500»

Наиболее высокие значения микротвердости приповерхностного слоя наблюдаются для стали марки Magstrong H500. Установлено, что после трения микротвердость поверхностного слоя стали марки Magstrong H500 возрастает до 698 — 757  $HV_{0,1}$  (что примерно соответствует ~60 — 62 HRC).

Повышение микротвердости поверхностного слоя (до 630  $HV_{0,1}$ , ~56 HRC) после испытания наплавки сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ достигается за счет формирования фрагментированной деформированной структуры. На удалении 1,4 мм от поверхности микротвердость наплавленного металла составляет ~400 — 435  $HV_{0,1}$  (примерно соответствует ~40 — 45 HRC), что сопоставимо с заявленной твердостью сварочной проволоки Св-08Х16Н5М3АБ.

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

Таким образом, упрочнение поверхностного слоя наблюдается для листового проката стали Magstrong H500 (~25 %) и наплавки проволокой Св-08Х16Н5М3АБ (~50 %). Слой распределен по поверхности неравномерно, в процессе испытаний происходит его наращивание и отделение. Образование поверхностного слоя с повышенной твердостью происходит, по-видимому, вследствие деформационного упрочнения. Для наплавки, выполненной электродами ОЗН-400М, образования упрочненного слоя не происходит из-за низкой деформационной способности наплавленного металла.

Обобщенные данные представлены в табл. 4.

Таблица 4

## 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

Наиболее высокую стойкость к изнашиванию показал листовой прокат из стали марки Magstrong H500. Его исходная мартенситная структура обладает достаточной прочностью и наибольшей способностью к деформационному упрочнению, что обеспечивает отсутствие разрушений поверхностного слоя до нагрузки 25 МПа.

Ближние значения износостойкости демонстрирует наплавка, выполненная электродами ОЗН-400М. При испытании образцов из наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, имеющей мартенситную структуру с грубым дендритным строением, упрочненный слой не образуется из-за отсутствия способности к деформационному упрочнению наплавленного металла. Частичное выкрашивание кромок начинается уже при нагрузке 15 МПа, чему способствует в том числе наличие внутренних трещин по границам дендритов.

Максимальная интенсивность изнашивания наблюдается у образцов из наплавки, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ.

Это происходит из-за того, что у поверхности трения образцов из наплавки создается самый тонкий слой с измененной деформированной структурой и широкая область «подстройки». Несмотря на резкое упрочнение тонкого слоя с измененной структурой, масштабные разрушения поверхностного слоя начинаются уже при нагрузке 10 МПа.

Таким образом, все исследованные материалы деформируются и разрушаются при трении различным образом, что подтверждается проведенными исследованиями и согласуется с имеющимися литературными данными [9,10,14].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования сравнительной износостойкости и способности к упрочнению при трении поверхностных слоев листового проката из стали марки Magstrong H500, наплавки с использованием электродов марки ОЗН-400М и проволоки Св-08Х16Н5М3АБ в паре с контртелом из стали Magstrong H500 показали следующее.

1. Листовой прокат стали марки Magstrong H500 и наплавка электродами ОЗН 400М обладают близкими характеристиками износостойкости. 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).

2. Частичное 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 может быть связано с более низкой твердостью исходного материала.

3. В процессе триботехнических испытаний на поверхностях трения листового проката из стали марки Magstrong H500 и образцов наплавки, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ, формируется слой с измененной деформированной структурой, под которым расположена область «подстройки» с зернами, ориентированными в направлении скольжения контртела. Упрочнение поверхностного слоя наблюдается для листового проката стали Magstrong H500 (около 25 %) и наплавки проволокой Св-08Х16Н5М3АБ (около 50 %).

На образцах из наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, деформированная область у поверхности трения сосредоточена в узком слое глубиной ~20 — 50 мкм, при этом область структурной «подстройки» ниже деформированной области, то есть область зерен, ориентированных в направлении трения, отсутствует, упрочнения поверхностного слоя не происходит.

4. Наиболее высокая стойкость к изнашиванию образцов из стали марки Magstrong H500 объясняется тем, что исходная мартенситная структура листового проката обладает большей способностью к деформационному упрочнению.

В образцах из наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М и имеющей мартенситную структуру с грубым дендритным строением, поверхностный слой с измененной структурой быстро разрушается, его упрочнения не происходит, при этом область «подстройки» не успевает формироваться.

Наиболее низкой износостойкостью обладают образцы с наплавкой, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ, так как у поверхности трения создается самый тонкий слой с измененной деформированной структурой и широкая область «подстройки». Несмотря на резкое упрочнение тонкого слоя с измененной структурой, масштабные разрушения поверхностного слоя начинаются уже при нагрузке 10 МПа.

Металлографические исследования выполнены на оборудовании центра коллективного пользования «Состав, структура, свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрущенко М.И. Способность к самоупрочнению поверхности трения и износостойкость наплавленного металла в условиях абразивного изнашивания / М.И. Андрущенко, Р.А. Куликовский, С.П. Бережный, О.Б. Сопильняк // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. — 2009. — № 1. — С. 30 — 37.
2. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. — Киев: Техника, 1970. — 396 с.
3. Попов В.С. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Брыков, Н.С. Дмитриченко, П. Г. Приступа. — М.: Металлургия, 1978. — 232 с.
4. Бойцов А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев, Л.А. Хворостухин. — М.: Машиностроение, 1991. — 144 с.
5. Малинов Л.С. Выбор состава хромомарганцевой стали с метастабильным аустенитом в качестве основы наплавочного материала / Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Е.Я. Харланова, Т. В. Барышникова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 1994. — № 8. — С. 45 — 46.
6. Филиппов М.А. Стали с метастабильным аустенитом / М.А. Филиппов, В.С. Литвинов, Ю.Р. Немировский. — М.: Металлургия, 1988. — 256 с.
7. Садовский В.Д. Остаточный аустенит в закаленной стали / В.Д. Садовский, Е.А. Фокина. — М.: Наука, 1986. — 113 с.
8. Батаев В.А. Образование ориентированных цементитных скоплений в деформированных углеродистых сталях / В.А. Батаев., А.А. Батаев., Л.И. Тушинский, Д.Е. Буторин // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2001. — № 5. — С. 5 — 7.
9. Белый А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. — М.: Машиностроение, 1991. — 208 с.
10. Буров С.В. Роль структуры поверхностных слоев в обеспечении износостойкости металлических материалов: автореф. дисс ... канд. техн. наук / С.В. Буров. — Новосибирск, 2007. — 20 с.
11. ГОСТ Р 50740-95. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общее положение.
12. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования.
13. СТО-07516250-151-2013. Оценка износостойкости пар трения. Методика.
14. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. II и III. Деформация / М.А. Штремель. — М.: МИСиС, 1997. — 527 с.

## REFERENCES

1. Andrushchenko M.I., Kulikovskii R.A., Berezhnyi S.P., Sopil'nyak O.B. Spособnost' k samouprochneniyu poverkhnosti treniya i iznosostoykost' naplavlennogo metalla v usloviyakh abrazivnogo iznashivaniya [The ability to self-strengthen the friction surface and wear resistance of the deposited metal under conditions of abrasive wear]. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroyenii* [New Materials and Technologies in Engineering]. 2009. No 1. P. 30 — 37.
2. Kostetskii B.I. Trenie, smazka i iznos v mashinakh [Friction, lubrication and wear in machines]. Kiev: Tekhnika, 1970. 396 p.
3. Popov V.S., Brykov N.N., Dmitrichenko N.S., Pristupa P.G. Dolgovechnost' oborudovaniya огнеупорного производства [Durability of refractory production equipment]. — М.: Metallurgiya, 1978. 232 p.
4. Boitsov A.G., Mashkov V.N., Smolentsev V.A., Khvorostukhin L.A. Uprochnenie poverkhnostei detalei kombinirovannymi sposobami [Hardening of detail surface by mixed method]. Moscow: Mashinostroyenie, 1991. 144 p.
5. Malinov L.S., Cheilyakh A.P., Kharlanova E.Ya., Baryshnikova T.V. Vybora sostava khromomargantsevoi stali s metastabil'nym austenitom v kachestve osnovy naplavochnogo materiala [Selection of the composition of chromium-manganese steel with metastable austenite as the basis of the surfacing material]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 1994. No. 8. P. 45 — 46.
6. Filippov M.A., Litvinov V.S., Nemirovskii Yu.R. Stali s metastabil'nym austenitom [Steels with metastable austenite]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 256 p.
7. Sadovskii V.D., Fokina E.A. Ostatochnyi austenit v zakalenoй stali [Retained austenite in hardened steel]. Moscow: Nauka, 1986. 113 p.
8. Bataev V.A., Bataev A.A., Tushinskij L.I., Butorin D.E. Formation of oriented cementite congestion in strained carbon steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001. No. 5. P. 5 — 7. (In Russ.)



9. Belyi A.V., Karpenko G.D., Myshkin N.K. *Struktura i metody formirovaniya iznosostoikikh poverkhnostnykh sloev* [Structure and methods of forming wear-resistant surface layers]. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 208 p.
10. Burov S.V. *Ro' struktury poverkhnostnykh sloev v obespechenii iznosostoikosti metallicheskih materialov* [The role of the structure of surface layers in ensuring the wear resistance of metallic materials: PhD thesis]. Novosibirsk, 2007. 20 p.
11. GOST P 50740-95. *Tribotekhnicheskie trebovaniya i pokazateli. Printsipy obespecheniya. Obshchee polozhenie* [Thribotechnical requirements and indices. Principles of provision. General].
12. GOST 30480-97. *Obespechenie iznosostoikosti izdelii. Metody ispytaniy na iznosostoikost'. Obshchie trebovaniya* [Products wear resistance assurance. Methods of wear resistance tests. General requirements].
13. STO-07516250-151-2013. *Otsenki iznosostoikosti par treniya. Metodika* [Estimates of wear resistance of friction pairs. Methodology].
14. Shtremel M.A. *Prochnost' splavov* [Strength of alloys. Parts II and III. Deformation]. Moscow: MISiS, 1997. 527 p.