

## **Натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A**

Д.И. Лебедев, М.В. Федоров, Н.И. Голиков, Р.П. Тихонов, Г.Г. Винокуров

*Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск*

*Как показывает многолетняя практика, эксплуатация горнодобывающей техники при экстремальных условиях Севера приводит к интенсивному износу, в первую очередь рабочих элементов. Наиболее актуальным является повышение срока службы режущих деталей землеройной техники, работающей при низких климатических температурах. Материалы рабочих элементов землеройной техники являются достаточно дорогостоящими, поэтому для повышения износостойкости режущих деталей целесообразно их восстановление с упрочнением. При этом наиболее перспективным является использование высокоэнергетических технологий порошковой металлургии, которые в настоящее время достаточно разработаны. Актуальным является анализ характера изнашивания восстановленных рабочих элементов техники при эксплуатации в натуральных природно-климатических условиях Севера.*

*В работе приведены результаты натурных испытаний на износ и прочность наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A. Установлено, что восстановленная коронка имеет высокие показатели прочности к излому и износостойкости, по эксплуатационным свойствам практически не отличается от новых заводских аналогов. Представлены результаты аналитических исследований наплавленного слоя и сравнительных профилометрических измерений равновесных поверхностей трения. Установлено, что химический состав наплавленного слоя отличается от исходной стали коронки повышенным содержанием хрома (Cr), молибдена (Mo), марганца (Mn) и ванадия (V). Выявлено, что твердость материала наплавленного слоя составляет 55–62 HRC, что на ~40% выше твердости исходной коронки.*

*Ключевые слова: коронка рыхлителя, наплавка, порошковое покрытие, натурные испытания, износ, профиль, поверхность трения.*

## **Field Tests of Performance of Built-Up Ripper Crown of Komatsu D375A Bulldozer**

D.I. Lebedev, M.V. Fedorov, N.I. Golikov, R.P. Tikhonov, G.G. Vinokurov

*Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk*

*As the long-term practice shows operation of mining equipment under extreme conditions of the North results in intensive wear, first of all, of working elements. Increase of service life of the cutting details of the digging equipment working at low climatic temperatures is especially actual. Materials of working elements of digging equipment are rather expensive; therefore for increase of wear resistance of the cutting details their restoration with hardening is expedient. At the same time the most promising is use of high-energy technologies of powder metallurgy which are rather developed now. Therefore also the analysis of nature of wear of the restored working elements of equipment at operation in natural climatic conditions of the North is actual.*

*Results of field tests for wear and durability of the built-up crown of the ripper of the bulldozer Komatsu D375A are given in the work. It is established that the restored crown has high rates of durability to a break*

---

ЛЕБЕДЕВ Дмитрий Иосифович – к.т.н., н.с., e-mail: uranhai@rambler.ru; ФЕДОРОВ Михаил Владимирович – инженер I-й кат., e-mail: fedorov.83@mail.ru; ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич – к.т.н., в.н.с., e-mail: n.i.golikov@mail.ru; ТИХОНОВ Руслан Прокопьевич – вед. инж., e-mail: tichonovrp@mail.ru; ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич – к.т.н., в.н.с.; e-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru.

*and wear resistance and its operational properties practically doesn't differ from new factory analogs. The results of analytical study of the built-up layer and comparative profilometric measurements of equilibrium surfaces of friction are presented. It is established that the chemical composition of the built-up layer differs from initial steel of a crown in the increased content of chrome (Cr), molybdenum (Mo), manganese (Mn) and vanadium (V). It is revealed that the hardness of the material of the built-up layer makes 55–62 HRC that on ~ 40% are higher than the hardness of the initial crown.*

Key words: ripper crown, surfacing, powder covering, field tests, wear, profile, friction surface.

### Введение

Северные регионы Российской Федерации, в т.ч. Республика Саха (Якутия), являются одними из самых труднодоступных: большинство территорий не имеет круглогодичного транспортного сообщения. Они представляют собой области с экстремальными климатическими условиями, обладающие богатыми минеральными ресурсами, но отдаленные от промышленных центров РФ. Это обуславливает особенности требований к технике севера, ее эксплуатации, обслуживанию и формированию парка запасных частей.

Наиболее актуальным является повышение срока службы режущих деталей землеройной горнодобывающей техники, работающей при низких климатических температурах. Износ деталей буровой и землеройной техники, эксплуатируемой в горнодобывающей промышленности Крайнего Севера, по своим масштабам имеет практически катастрофический характер. Анализ данных показывает, что только вследствие окончательного износа рабочих элементов горнодобывающей техники ежегодно на предприятиях промышленности теряется около десятка тысяч тонн металла. Применяемые материалы рабочих элементов землеройной техники весьма дорогостоящие, поэтому возникает необходимость их восстановления, а также повышения износостойкости с целью более длительного использования. Для этого следует использовать высокоэнергетические технологии порошковой металлургии, которые в настоящее время достаточно разработаны [1–5].

Задача повышения ударно-абразивной и гидроабразивной износостойкости рабочих элементов землеройной техники, работающей при интенсивных эксплуатационных нагрузках севера, сохраняет свою актуальность. Нет достаточно полного объема информации о развитии ударно-абразивного разрушения в процессе эксплуатации изделий с учетом свойств материала и условий работы в северных регионах [6]. Поэтому анализ характера эксплуатационных разрушений техники в специфических природно-климатических условиях севера имеет большой практический интерес и может способствовать разработке мер, позволяющих не только восстанавливать изношенные детали, но и повышать

их служебные свойства. Особенно важным является установление влияния упрочняющей обработки на износостойкость восстановленного рабочего элемента. Для этого необходимо исследовать количественные характеристики микрогеометрии поверхности трения, изменение которых описывает процессы изнашивания рабочего элемента при эксплуатации техники [6–8].

Целью настоящей работы является установление физико-механических и эксплуатационных свойств напавленной коронки рыхлителя для бульдозера Komatsu D375A.

### Материалы и методика аналитических исследований

Объектом исследования является материал изношенной коронки рыхлителя землеройной машины, эксплуатирующейся в условиях Севера. Коронка итальянского производства (Italricambi) является рабочим элементом бульдозера Komatsu D375A, принадлежащего ОАО «Алмазы Анабара». Коронка изготовлена методомковки и предназначена для резания скальных и абразивных грунтов. Начальный вес коронки рыхлителя составляет 16 кг; рабочие элементы предоставлены после использования в производстве (рис. 1).

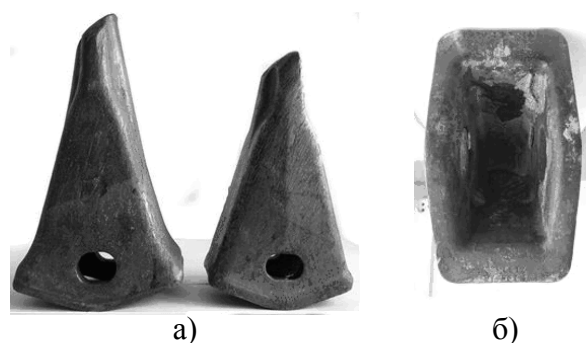


Рис. 1. Изношенные коронки рыхлителя: а) общий вид; б) вид сверху

На рис. 1, а–б показаны изношенные коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A, отработанные на карьере ООО «Монолит» (п. Верхний Бестях Хангаласского района Республики Саха (Якутия)). Износ коронки достаточно большой, практически отсутствует рабочая грань коронки. Перемещение режущей кромки исследуемой

## НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СЛУЖЕБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПЛАВЛЕННОЙ КОРОНКИ

коронки рыхлителя в результате изнашивания составило приблизительно  $\approx 100$  мм; на рис. 2, а показана характерная поверхность трения этого участка.

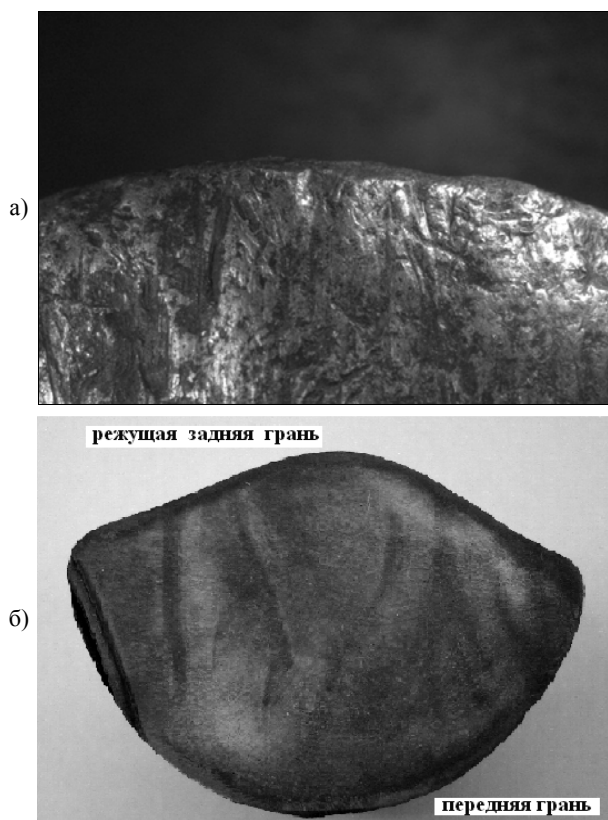


Рис. 2. Исходный материал коронки рыхлителя: а) поверхность трения; б) структура

Для исследования состава, структуры и свойств были изготовлены поперечные шлифы коронки (рис. 2, б). Металлографическим анализом выявлено, что металл коронки имеет, как это свойственно кованным изделиям, зонально неоднородное строение. По химическому составу материал коронки рыхлителя наиболее близок к отечественной легированной улучшаемой конструкционной стали 35ХГСА (ГОСТ 4543–71) [9]. Стали этого класса (хромансиль) применяются для ответственных сварных конструкций, а также при изготовлении деталей, работающих в условиях износа. Высокие прочностные свойства хромансиль обеспечиваются получением сорбитообразных структур, либо структуры нижнего бейнита. Легирующие элементы хромокремнемарганцевой стали повышают пределы текучести и прочности, расширяют область существования феррита и увеличивают его прочность [10]. Результаты исследования состава, структуры и свойств исходного материала коронки рыхлителя подробно приведены в ранней работе авторов [11].

Для предотвращения обнаруженного катастрофического износа исходного материала коронки при эксплуатации наиболее перспективным способом повышения износостойкости рабочего элемента выбрана технология наплавки его поверхности порошковой проволокой. Для восстановления рабочего элемента, работающего в условиях ударно-абразивного износа, была использована опытная порошковая проволока ПП 70Х4М3Г2ФТР диаметром 2,4 мм. В табл. 1 приведены технологические режимы наплавки опытной порошковой проволоки в зависимости от диаметра.

Таблица 1

Технологические режимы наплавки порошковой проволоки			
Диаметр, мм	Ток, А	Напряжение, В	Вылет проволоки, мм
2,4	300–350	24–28	20–40
2,8	350–400	28–32	30–50
3,0	380–420	30–35	35–60
3,2	400–420	30–35	40–70
3,6	420–500	32–36	40–70

Восстановление изношенных коронок рыхлителя до первоначальных размеров ввиду большого износа требует больших затрат и технологических трудностей, что является экономически невыгодным. Поэтому по рекомендуемым параметрам наплавки (табл. 1) был нанесен дополнительный упрочняющий слой металла порошковой проволокой ПП 70Х4М3Г2ФТР (рис. 3).

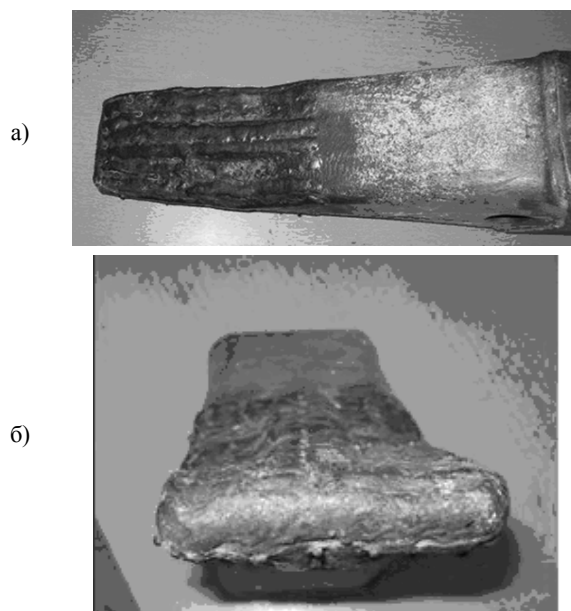


Рис. 3. Наплавленная коронка рыхлителя: а) общий вид; б) восстановленная поверхность трения

Химический состав материала коронки рыхлителя определен по данным спектрального анализа на спектрометре «WAS Foundry-Master». Для обеспечения достоверности среднее значение содержания каждого из легирующих элементов получено по результатам трех измерений.

Металлографические исследования микроструктуры материала коронки рыхлителя проведены на оптических микроскопах «Neophot-32» и «AxioObserverD1m». Твердость материала коронки рыхлителя измерена с помощью прибора «ТЭМП-2», нагрузка на индентор 1 Н.

Микрогеометрия поверхности трения коронки исследована профилометром SJ-201P, строгие поверхности трения – на стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000C». Обработка экспериментальных результатов проведена в программной среде MathCad и в электронных таблицах Excel.

### Натурные испытания наплавленных коронок

Износостойкий наплавленный слой данной коронки предназначен для разрыхления скальных пород бульдозером Komatsu D375A (рис. 4). Для проведения натурных испытаний были изготовлены опытные коронки с наплавленным покрытием, в табл. 2 приведен химический состав легирующих элементов наплавленного металла.

Таблица 2

Химический состав наплавленного металла, полученного порошковой проволокой, %

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
91,1	0,536	0,265	1,15	0,03	0,0245	2,78	2,40
Ni	Al	Co	Cu	Ti	V	Nb	W
0,0754	0,0101	0,005	0,196	0,196	1,17	0,0170	0,0150

В результате сравнения данных химического анализа установлено, что состав наплавленного слоя металла отличается от исходной стали коронки повышенным содержанием хрома (Cr), молибдена (Mo), марганца (Mn) и ванадия (V) [9, 11].

Твердость наплавленного металла составляет 55–62 HRC, что значительно выше значений твердости исходного материала коронки без упрочняющего покрытия ~41–45 HRC.

В работе проведены испытания на износ и прочность восстановленной наплавкой коронки рыхлителя в натурных условиях эксплуатации бульдозера Komatsu D375A (рис. 4). Восстановленные образцы коронок рыхлителя испытывались в течение трех часов на участке скальной плиты площадью ~600 м<sup>2</sup>, длиной прохода рав-

ной ~30 м в количестве 40 проходов. Расстояние между проходами составляет ~50 см, глубина прохода ~40 см (рис. 4, а). Во время проведения натурных испытаний периодически, после каждой проходки, производился визуальный измерительный контроль коронок. Результатами контроля установлено, что рабочая поверхность коронки не изнашивалась, геометрические размеры коронки практически не изменились.

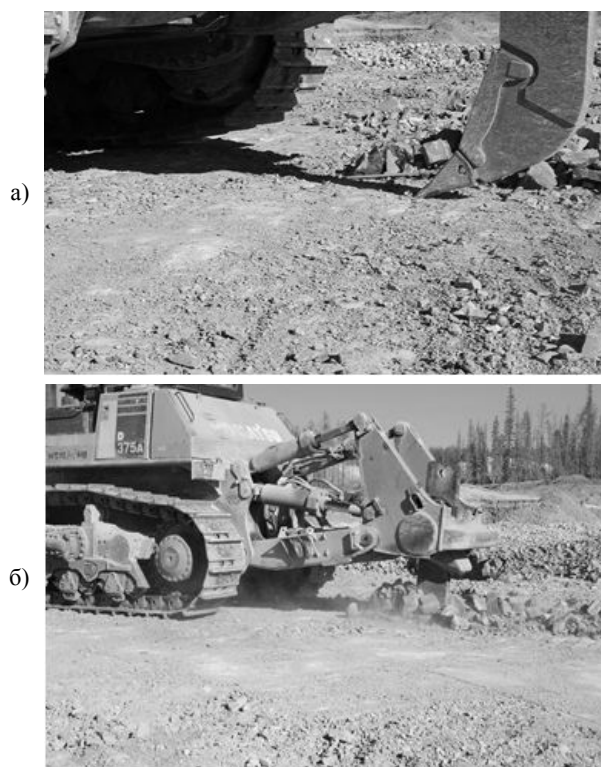


Рис. 4. Натурные испытания коронки бульдозером Komatsu D375A: а) рыхлитель с коронкой; б) испытания на излом при разных углах атаки

Для проверки технических характеристик восстановленных коронок рыхлителя проведены испытания на излом (отжим с изменением угла атаки, рис. 4, б). При этом изгибающая нагрузка на коронку передается с изменением угла атаки под собственным весом бульдозера, в данном испытании коронка выдержала нагрузку 1/3 веса бульдозера (общий вес Komatsu D375A 69 тонн). Это свидетельствует о том, что восстановленная коронка рыхлителя имеет высокие показатели прочности к излому.

Таким образом, натурными испытаниями в процессе рыхления горной породы (скальнико-плита) установлено, что восстановленная коронка имеет высокую работоспособность, практически не отличается от новых заводских аналогов. Визуальный осмотр восстановленной коронки после выполненного объема работ пока-

зал, что ее поверхность практически не подверглась износу; отсутствуют сколы, трещины и деформации на наплавленных слоях и не наблюдается изменений геометрических размеров.

**Профилометрические исследования поверхности трения коронок**

Для количественной оценки уровня рельефности поверхности трения коронки проведены профилометрические измерения. Важнейшей характеристикой микрогеометрии поверхности трения, показывающей динамику изнашивания в зависимости от параметров (нагрузки, скорости скольжения, температуры и т. д.) является равновесная шероховатость. Существуют многочисленные классические работы, связывающие характеристики материала и условия трения с равновесной шероховатостью [6–8].

В работе измерены характеристики поверхностей трения исходной и наплавленной коронок рыхлителя:

-шероховатость

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i|,$$

-среднеквадратическое отклонение профиля

$$Rq = \left( \frac{1}{N} \sqrt{\left( \sum_{i=1}^N y_i^2 \right)} \right)$$

и высота неровностей по десяти точкам

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 y \max_i + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 y \min_i .$$

Выявлены следующие особенности равновесной поверхности трения исходного материала коронки рыхлителя (табл. 3, рис. 2, а).

Поверхность трения режущей грани имеет градиентную по высоте структуру и характеризуется более высокими значениями параметров Ra, Rq, Rz. Данные характеристики влияют на уровень критических давлений на выступы поверхности трения, когда упругие деформации переходят в пластические [7, 8]. При таких давлениях начинаются необратимые процессы на поверхности рабочего элемента, приводящие к его катастрофическому изнашиванию (рис. 1).

Металлографический анализ равновесной поверхности трения исходной коронки показывает, что основными элементами при ударно-абразивном изнашивании являются лунки, риски и борозды [11]. Глубина и форма лунок, борозд разнообразны, они определяются абразивными частицами разрабатываемого грунта (рис. 2, а). В рельефе поверхности изнашивания ко-

ронки рыхлителя можно выделить две типичные формы лунок: открытые и закрытые. Контур открытых лунок и размеры борозд в ряде случаев соответствуют форме абразивной частицы.

Т а б л и ц а 3

**Характеристики равновесной поверхности трения исходной коронки, мкм**

№ участков	Передняя грань			Режущая задняя грань		
	Ra ср.	Rz ср.	Rq ср.	Ra ср.	Rz ср.	Rq ср.
1	9,6	45,63	11,91	21,38	110,5	26,37
2	11,82	63,47	14,62	17,70	95,48	22,76
3	15,24	67,46	17,54	21,87	87,24	24,99
4	17,27	86,97	21,41	24,07	109,4	27,79
5	16,37	73,49	19,97	24,31	103,0	28,21
6	16,49	76,75	19,48	17,19	66,21	20,84

Закрытые лунки весьма разнообразны: иногда края лунок полностью сомкнуты, в других случаях видна деформация краев лунки. Формирование лунок и борозд обусловлено механизмом «пластического» ударно-абразивного изнашивания, когда первоначально на поверхности изнашивания продавливаются лунки при соударении с частицами абразива, а затем частицы «пропахивают» металл, деформируя и отесняя его в стороны. Если металл достаточно твердый и прочный, на его поверхности формируются риски, что обычно обусловлено срезом металла в виде стружки. Если металл весьма пластичный, его резания не происходит – происходит вытеснение. Все эти процессы сопровождаются отрывом частиц металла и образованием продуктов изнашивания [11].

Качественная картина рельефа поверхности трения исходной коронки согласуется с изменением шероховатости (рис. 5, а, б, табл. 3) ввиду более значительного разупрочнения режущей грани по сравнению с передней, износ которой идет с образованием преимущественно лунок и борозд, дающих значительные перепады рельефа; изменение твердости металла передней грани менее значительно и структурные элементы рельефа представлены в основном царапинами и рисками.

Для сравнения в работе исследованы характеристики Ra, Rz, Rq поверхности трения наплавленной коронки рыхлителя в процессе эксплуатации (табл. 4). Шероховатость при натуральных испытаниях возрастает, далее снижается до существенно меньших значений, чем у обеих граней исходной коронки (табл. 3, 4).

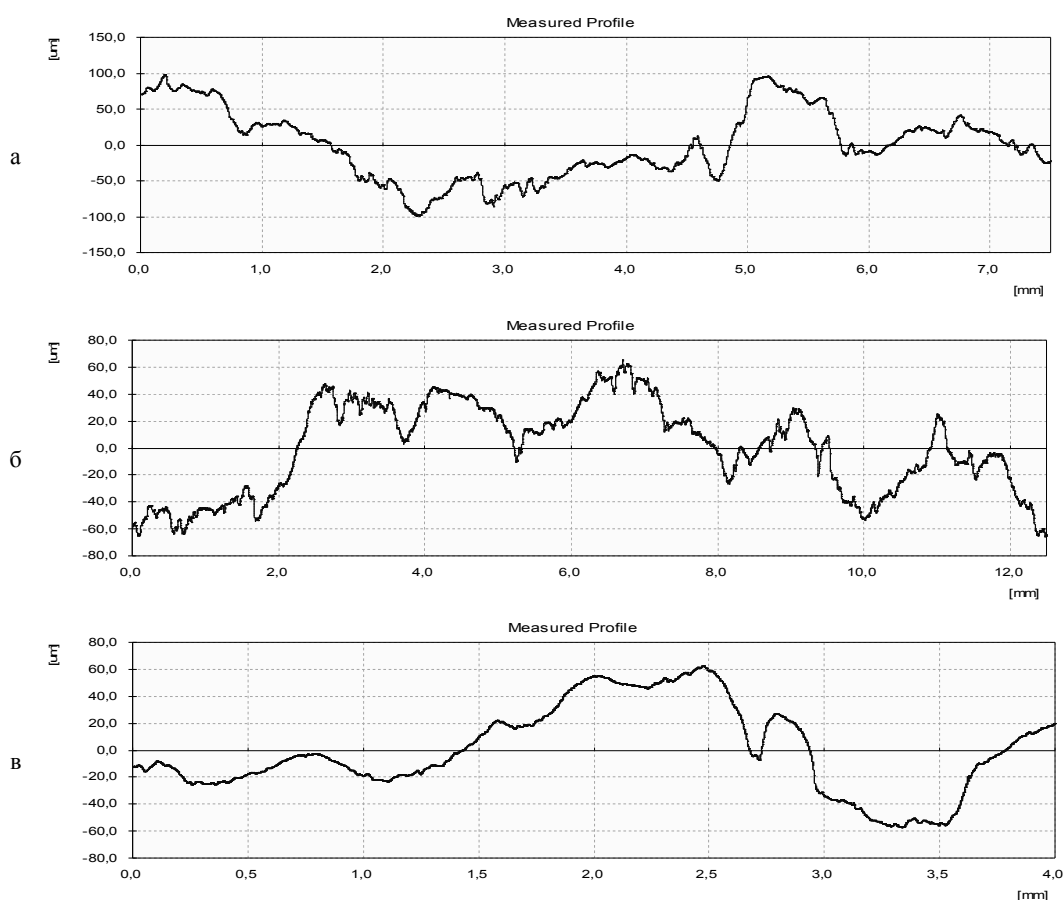


Рис. 5. Профили равновесной поверхности трения: а – исходная коронка, режущая грань; б – исходная коронка, передняя грань; в – наплавленная коронка

Как показывает практика, для износостойких порошковых материалов и покрытий при трении скольжения приработка занимает 1–2 ч испытаний.

Если предположить, что через 3 часа работы формируется равновесная поверхность трения упрочненной коронки, это свидетельствует о механизме ударно-абразивного изнашивания наплавленного слоя, отличном от стального материала (рис. 5, а, в). Поэтому для исследования изнашивания актуальным является проведение в дальнейшем металлографического анализа поверхности трения наплавленной коронки.

Таблица 4  
Характеристики равновесной поверхности трения наплавленной коронки, мкм

Время, час	Ra ср.	Rz ср.	Rq ср.
0	2,28	11,89	2,82
1 ч	14,47	68,96	17,48
2 ч	21,66	97,21	26,08
3 ч	4,21	21,06	5,24

### Выводы

1. Проведены натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A. Разупрочнение исходной хромокремнемарганцевой стали коронки в приповерхностных областях в результате воздействия ударно-абразивных эксплуатационных нагрузок приводит к катастрофическому износу рабочего элемента.

Натурными испытаниями в процессе рыхления бульдозером горной породы (скальникоплита) установлено, что восстановленная коронка имеет высокие показатели прочности к излому и износостойкости, в целом не отличается от новых заводских аналогов. Установлено, что поверхность трения практически не подвергается износу; отсутствуют сколы, трещины и деформации в наплавленных слоях; не наблюдается изменений геометрических размеров восстановленной коронки.

2. Аналитическими исследованиями выявлено, что химический состав наплавленного слоя отличается от исходной стали коронки повышенным содержанием хрома (Cr), молибдена

(Mo), марганца (Mn) и ванадия (V). Твердость материала наплавленного слоя составляет 55–62 HRC, что на ~40% выше твердости исходной коронки.

3. Профилометрическими исследованиями равновесных поверхностей трения коронки установлено, что характеристики Ra, Rz, Rq наплавленной поверхности существенно ниже, чем у исходной коронки. Это свидетельствует о механизме ударно-абразивного изнашивания наплавленного слоя, отличном от стального материала. Поэтому для исследования процессов изнашивания наплавленной коронки актуальным является проведение в дальнейшем металлографического анализа поверхности трения.

Исследования в работе проведены на оборудовании ЦКП «Станция натуральных испытаний» Института физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН.

### Литература

1. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
2. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харлампьев, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардаговская. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
3. Шехтер С.Я. Наплавка металлов / С.Я. Шехтер, А.М. Резницкий. – М.: Машиностроение, 1982. – 71с.

4. Линник В.А. Современная техника газотермического нанесения покрытий / В.А. Линник, П.Ю. Пекшев. – М.: Машиностроение, 1985. – 128с.

5. Бороненков В.Н. Основы дуговой металлизации: физико-химические закономерности / В.Н. Бороненков, Ю.С. Коробов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012. – 268 с.

6. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

7. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

8. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1. Теоретические основы. – 400 с.

9. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов. / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

10. Лахтин Ю.М. Основы металловедения. – М.: Металлургия, 1988. – 320 с.

11. Винокуров Г.Г. Изменение структуры и изнашивание породоразрушающего элемента бульдозера при эксплуатации в условиях Севера / Г.Г. Винокуров, С.П. Яковлева, А.К. Кычкин, М.И. Васильева, Н.Ф. Стручков, М.В. Федоров // Металлы. – 2009. – № 5. – С. 74–80.

Поступила в редакцию 20.04.2016

УДК 621.184.2:621.78.019:620.18

## Причины послеремонтного разрушения труб поверхностей нагрева котла, эксплуатируемого в арктических условиях

С.П. Яковлева, С.Н. Махарова

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск*

*Представлены результаты исследования качества материала, природы и причин разрушения конвективных труб водогрейного котла, снабжавшего теплом арктический поселок. Определен химический состав металла труб (углеродистая сталь марки 20), исследованы особенности его структуры, природа и уровень повреждений, повлекших аварийную утечку технологической среды. В зоне разрушения выявлены необратимые физико-химические изменения стали, обусловившие потерю ее работоспособности, – высокотемпературная трансформация карбидной составляющей (сфероидизация, графитизация). Усугубляющим фактором повреждений структуры явилось присутствие алюминия, повышающего склонность перлитных сталей к графитизации при воздействии высоких температур. В результате появления термических дефектов структуры, разупрочнения и снижения коррозионной*

ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав.отд., e-mail: spyakovleva@yandex.ru; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., в.н.с.