

Коэффициенты демпфирования:

– для КШМ ДВС:

$$b_1 = 0,04 \cdot \omega_e \cdot \theta_{\text{КШМ}} = 0,04 \cdot 565,545 \cdot 0,015 = 0,339 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с};$$

– для ГВ:

$$b_2 = 30 \cdot \frac{M_m}{n} = 30 \cdot \frac{118,803}{1045} = 3,410 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Амплитуда крутильных колебаний первой массы с учетом возмущающих моментов от двигателя и ГВ:

$$A_1 = \frac{M_{v=6} \sum_{i=1}^4 \bar{\alpha}_i + M_{v=6} \alpha_9}{\omega_v \cdot (b_1 \sum_{i=1}^4 \alpha_i^2 + b_2 \alpha_9^2)} = \frac{0,02 \cdot 10^3 \cdot 3,993 + 5,108 \cdot 2,636}{565,545 \cdot (0,339 \cdot 3,986 + 3,410 \cdot 6,948)} = 8,945 \cdot 10^{-3} \text{ рад}.$$

Амплитуды колебаний остальных масс дискретной модели представлены в таблице 3. По этим величинам была построена диаграмма амплитуд колебаний масс дискретной модели (рис. 4).

Таким образом, подтверждается вывод о самом опасном сечении валопровода, то есть на участке его соединения с ГВ.

Полученная в ходе расчетов величина резонансной частоты означает, что нежелательно эксплуатировать машину на соответствующих режимах. Рекомендуется выбирать такие условия работы, при которых частота вращения коленчатого вала будет находиться не в пределах значений 1045 и 1620 об./мин.

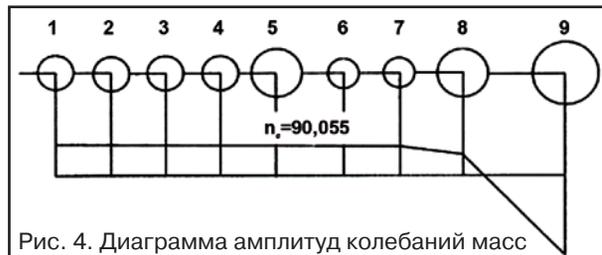


Рис. 4. Диаграмма амплитуд колебаний масс

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Обеспечение безопасной эксплуатации судового валопровода на этапах проектирования и строительства флота (на примере пассажирского теплохода пр. 82880) / Мартянов В.В., Окунев В.Н. // Речной транспорт (XXI век). 2020. – № 4(96). – с. 48-50.
2. В.К. Румб. Прочность судового оборудования. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2008. – 297 с.
3. С.П. Тимошенко. Колебания в инженерном деле. – М.: КомКнига, 2006. – 440 с.
4. Расчет характеристик колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода типа «Фонтанка» (пр. Р118) / Мартянов В.В. // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2012. – № 1 – с. 43-46.
5. Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. Р118 / Мартянов В.В. // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова». 2020. – № 2 (60). – с. 359-368.
6. Расчет характеристик колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «Волхов-1» (проект «Мойка») / Мартянов В.В. // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2013. – № 1(20) – с. 34-37.

## УЧРЕЖДЕНИЕ: Учебно-научно-производственный центр (УНПЦ) «Судоремонт» Волжского государственного университета водного транспорта (ВГУВТ)

**ТЕМА: Материаловедческий анализ восстановительной наплавки пальцев цепи черпакового земснаряда пр. Р-36**

**АВТОРЫ: А.Б. КОРНЕВ, к.т.н., доцент, начальник Центра; К.О. КАРАЗАНОВ, инженер научно-технического отдела (НТО); Е.А. ДАВЫДОВ, начальник НТО; Е.К. БЕРЕЗИН, к.т.н., заведующий учебно-производственной базой**

УДК 620.198

**В** настоящее время в Волжском и Камском бассейнах активно эксплуатируется значительное количество земснарядов пр. Р-36. Для поддержания их надлежащего технического состояния среди прочего реализуются мероприятия по повышению износостойкости (ИС) деталей черпаковой цепи.

Кстати, данному важному вопросу посвящено несколько научно-практических работ [1, 2]. Специалисты серьезно изучали черпаковые пальцы из прочных сталей, например из стали Гадфильда (названной в честь разработчика) – материала аустенитного класса, обозначаемого, согласно ГОСТ 977-88, как 110Г13Л [3] и обладающего высокой ИС при относительно низкой твердости (200-250 НВ). Его сопротивление ударно-абразивному износу обусловлено более высокой склонностью к наклепу, по сравнению с обычными сталями с аналогичной твердостью. Легирование металла марганцем в пределах 11-14,5% способствует превращению при ударном воздействии аустенита в мартенсит с поглощением существенной доли энергии разруше-

ния [4, 5]. Этот эффект также связывают с динамическим деформационным старением [6]. Главными факторами способности материала к упрочнению некоторые ученые считают протекающие в его структуре процессы двойникования [7] и образования субзеренных границ [8].

Из 110Г13Л обычно изготавливают детали, предназначенные для эксплуатации в тяжелых условиях постоянного абразивного износа и ударной нагрузки. В качестве примеров [5, 6, 7, 9, 10], наряду с упомянутыми пальцами, можно привести крестовины железнодорожных и трамвайных путей, черпаки драг, конусы засыпных аппаратов доменных печей, зубья ковшей экскаваторов, иные элементы горно-металлургического оборудования.

Некоторые исследования показывают: сталь Гадфильда наиболее оправданно использовать для элементов стрелочных переводов железнодорожных и трамвайных путей. Напротив, при создании деталей машин, работающих в условиях абразивного и механического износа, ее применение скорее



Пальцы черпаковой цепи земснаряда после восстановления

нерационально, поскольку удельные давления при указанных условиях не достигают предела текучести [3].

Кроме того известно, что тяжело нагруженные соединения из данного материала демонстрируют высокую работоспособность только при термообработке, проводимой для получения чисто аустенитной структуры без карбидных включений. Если же такая сталь используется без термообработки (подобная операция ощутимо повышает стоимость производства), то срок эксплуатации деталей из нее значительно снижается [4].

Значит, актуальной представляется процедура восстановления для черпаковой цепи земснарядов пр. Р-36 изношенных пальцев из стали 120Г13, которую по опыту, накопленному УНПЦ «Судоремонт» ВГУВТ [1], лучше реализовывать с помощью технологии высокопроизводительной наплавки порошковыми самозащитными проволоками. Современные химсоставы [4] таких проволок позволяют получать наплавленный слой с высоким сопротивлением к упомянутым видам износа.

Однако существует мнение [7, 11], что сталь Гадфильда «обладает ограниченной свариваемостью», часто образует горячие и холодные трещины из-за возникновения карбидов в зоне термического влияния. По этой причине сварку и наплавку рекомендуется выполнять с максимальной скоростью охлаждения или при низких температурах. Для сварки рассматриваемого металла используются те же сварочные материалы, что и для коррозионноустойчивых сталей, то есть с высоким содержанием хрома и никеля. Но токарная обработка наплавленных слоев весьма затруднительна, и нужен подбор особого инструмента и режимов резания.

В литературных источниках описываются преимущественно способы ремонта деталей из стали Гадфильда для горнодобывающего и металлургического оборудования, хотя методика восстановления деталей цепи земснарядов способом наплавки очень востребована на речном флоте.

Пока продолжается поиск альтернативных технических решений [4], но на данный момент обстоятельства свидетельствуют о возможности и необходимости восстановления изношенных пальцев наплавкой, что подтверждается продолжительным периодом успешной деятельности УНПЦ «Судоремонт».

Суть осуществляемого специалистами подхода, результат которого показан на рис. 1, заключается в следующем: выполняются приемка после эксплу-

тации требующей обслуживания детали, ее очистка, замер параметров, проточка на токарном станке, дефектовка ультразвуковым методом (УЗМ), непосредственное восстановление – двуслойная наплавка порошковой проволокой с приданием необходимых геометрических размеров токарной обработкой и последующим повторным контролем УЗМ.

В рамках настоящей статьи приводятся результаты проверки работоспособности многократной наплавки на пальцы путем металлографического исследования структуры и свойств приповерхностного слоя изношенных, наплавленных и повторно изношенных деталей.

Так, были изучены ранее восстановленные пальцы черпаковой цепи земснаряда пр. Р-36 № 212, принадлежащего администрации Волжского бассейна, эксплуатировавшиеся в навигацию 3100 ч на песчаном грунте (фото 1).

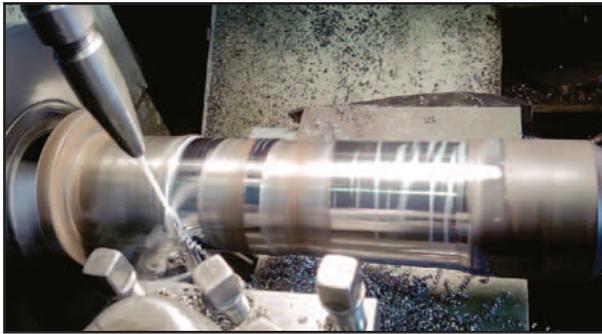
Эти детали изготовлены из высокомарганцевистой стали ЭИ-256 (120Г13), материалом для наплавки служит порошковая проволока ASM 4025 (химический состав вещества приведен в таблице). Такой наплавочный материал был выбран по причине удачного сочетания физико-механических и технологических свойств, обеспечивающих низкий коэффициент трения при хорошей чистоте поверхности после обработки, высокую коррозионную стойкость, а также высокую микротвердость (после наплавки – 250-300 HV, твердость наклепанного слоя – до 500 HV). Эта порошковая проволока должна обеспечивать не только восстановление геометрии изношенной поверхности, но и создание нового износостойкого слоя, по ряду параметров лучше исходного материала.

Металлографическое исследование выполнялось для образцов металла с поверхности пальцев двух видов: после эксплуатации и износа (образец № 1) и после восстановления двуслойной наплавкой, эксплуатации и износа (образец № 2).

Перед восстановлением пальцы контролировались УЗМ на наличие дефектов цилиндрической поверхности по специальной методике [12, 13]. Проверка обычно выявляет небольшое количество регулярно встречающихся незначительных дефектов, которые не оказывают влияния на работоспособность и эксплуатационные свойства деталей. В рассматриваемом случае существенных дефектов и следов разрушения обнаружено не было.

#### Химический состав материалов

Химический элемент, %	Материал основы ЭИ-256	Наплавка ASM 4025
C	1,00-1,40	0,40
Si	0,70	1,00
Mn	11,00-14,00	13,00
Cr	0,50	13,00
Ni	0,60	1,00
Mo	-	0,20
P	≤0,10	-
S	0,03	-
Cu	0,30	-
Fe	Ост.	Ост.



Токарная обработка пальца перед наплавкой

Перед нанесением наплавочного материала детали путем точения придавалась необходимая геометрическая форма, удалялся слой со следами коррозии и разрушения (фото 2).

Кстати, некоторые исследователи считают сталь Гадфильда нетехнологичной в связи со сложностью обработки резанием, которая обуславливает кратное удорожание механической обработки [4].

При токарной обработке наплавки было замечено, что процесс точения происходит приблизительно на 30% быстрее, чем для стали ЭИ-256 в основе детали.

Для проведения металлографического исследования из пальцев вырезались образцы размером примерно 15x15x15 мм. Абразивная резка осуществлялась на станке «Q-2А». Скорость вращения круга с абразивом из оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) составляла 2800 об./мин. Дальнейшая пробоподготовка проводилась с помощью шлифовально-полировального станка «MetaPol 1250-S». Шлифовка выполнялась на SiC бумаге при скорости вращения диска 280-300 об./мин. Полировка осуществлялась на тканевых кругах с добавлением алмазной суспензии с размером частиц 9, 6, и 3 мкм на скорости вращения 140-160 об./мин.

После каждого этапа шлифовки образцы тщательно промывались водой, а после каждой стадии полировки – водой и изопропиловым спиртом для удаления остатков абразивных частиц.

Микротвердость измерялась прибором «ЛОМО ПМТ-ЗМ» по методике Виккерса при нагрузке 100 г с выдержкой 10 с.

Для выявления микроструктуры изучаемых образцов применялось травление. В качестве химического вещества использовался стандартный для сталей реактив «Нитал» – раствор 5% азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>) в этиловом спирте (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH). Микроструктура фотографировалась на оптическом микроскопе «БиОптик СМ1-400» по методам светлого и темного поля.

В рамках исследования приповерхностного слоя измерялась микротвердость образцов в зависимости от расстояния до изношенной поверхности; результаты операций показаны на рис. 1 и 2.

Повышенные значения микротвердости до 2,5 мм глубины от поверхности пальца обусловлены характерной для сталей Гадфильда высокой склонностью к наклепу.

Было выявлено повышенное значение микротвердости на глубине до 4-7 мм от поверхности пальца и плавное снижение микротвердости в переходной зоне. Также отмечено совпадение значений микротвердо-



сти в приповерхностном слое у образцов № 1 и 2 на глубине до 1,5 мм.

Характерная микроструктура материала образца № 1 отражена на рис. 3 и 4.

Наблюдался определенный разброс по размеру зерен, но в основном микроструктура металла основы была представлена крупным аустенитным зерном. При этом фиксировалось большое количество пор, в которых после пробоподготовки проявился травитель.

Микрофотографии наплавки образца № 2 приведены на рис. 5, 6, 7.

Наплавленный слой отличается однородной структурой, без заметных включений, крупных пор и иных дефектов. Видны мелкие поры размером до 10 мкм, равномерно распределенные внутри зерен и по их границам. Для идентификации пор в наплавленном слое делались фотографии по методике темнопольной микроскопии (контраст изображения увеличивается за счет регистрации только света, рассеянного изучаемым образцом).

Особое внимание уделялось области соединения наплавки и материала основы. Микрофотографии переходной зоны показаны на рис. 8, 9, 10.

С помощью оптического микроскопа были определены основные зоны микроструктуры образца:

1) Зона наплавки толщиной 2,5 мм.

Микротвердость – от 325 до 375 HV. Микроструктура – мелкое аустенитное зерно величиной 80 мкм,

Микроструктура основного металла

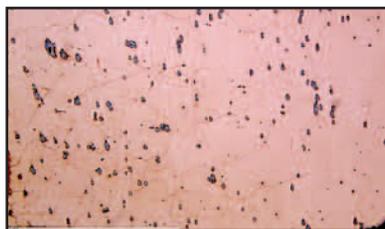


Рис. 3. Увеличение x50



Рис. 4. Увеличение x200

### Микроструктура наплавленного слоя

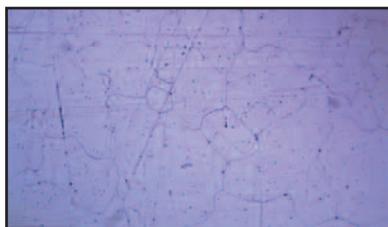


Рис. 5. Увеличение x200

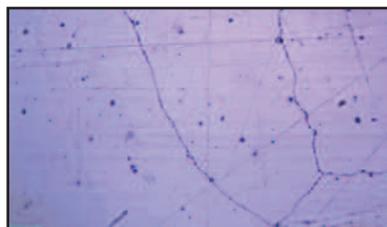


Рис. 6. Увеличение x1000, светлое поле

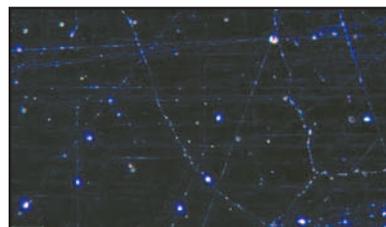


Рис. 7. Увеличение x1000, темное поле

образованное в процессе наплавки и упрочненное в процессе эксплуатации.

2) *Зона перемешивания* толщиной 0,2 мм.

Микротвердость – около 325 HV. Микроструктура – мелкое зерно в переходной зоне, где металл наплавки диффундирует в область основного сплава; средний размер частицы – 30 мкм.

3) *Зона упрочненного аустенита* толщиной 0,2 мм.

Микротвердость – около 325 HV. Микроструктура – относительно мелкое аустенитное зерно величиной 150 мкм.

Микроструктура образца № 2



Рис. 8. В области наплавки

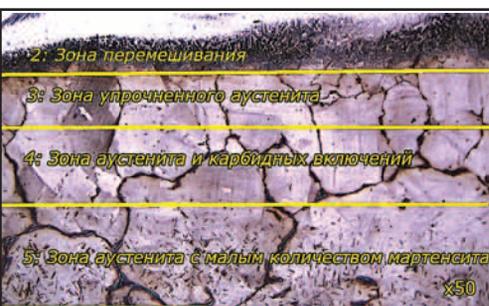


Рис. 9. В области зоны термического влияния

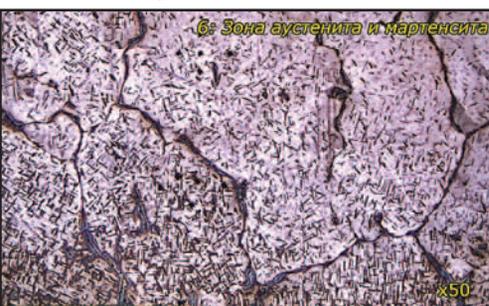


Рис. 10. В области материала основы

Причиной образования мелкого зерна в зоне термического влияния может являться остаточная деформация после эксплуатации и деформация, внесенная при подготовке детали к наплавке путем токарной обработки.

4) *Зона аустенита* с зернами толщиной 0,3 мм и карбидными включениями по их границам.

Микротвердость – около 325 HV.

Появление карбидных включений, представленных сочетанием  $Fe_3C$  и  $Mn_3C$  (из-за высокой легированности стали марганцем), обусловлено распространением зоны термического влияния при наплавке.

5) *Зона крупных (около 500 мкм) аустенитных зерен* толщиной 1,0 мм.

Микротвердость – от 275 до 300 HV. Снижение показателя связано с большим аустенитным зерном и

малой долей высокотвердых мартенситных включений. Отсутствие мартенсита может свидетельствовать о его распаде из-за влияния высоких температур. Значит, допустимо предположение о границах распространения зоны термического влияния.

6) *Дальнейшая зона* образца, представленная совокупностью крупных (порядка 500 мкм) аустенитных зерен и мартенситных внутризеренных включений размером около 40-50 мкм.

Микротвердость – 325 HV. Повышение показателя обусловлено вкладом высокой твердости мартенситной фазы. В дальнейшей части образца (в направлении к центру) объемная доля мартенсита быстро возрастает, после чего плавно снижается до полного исчезновения.

В наплавленном слое и на границе с основным материалом были обнаружены поры размерами до 10 мкм. Хотя обычно в дефектной структуре наплавленного слоя встречаются крупные поры, трещины, несплошности. Однако при исследовании слоя наплавки ASM 4025 на сталь ЭИ-256 такие дефекты не были выявлены.

Анализируемый материал основы представляет собой зерна аустенита с небольшим разбросом по размерам. Отмечается небольшое количество пор с приблизительными размерами до 10 мкм. Таким образом иллюстрируется разница между количеством пор в структуре основного материала двух разных пальцев.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 1) Режимы механической обработки.

Сравнение режимов резания материала основы детали и наплавленного слоя позволяют заключить, что обрабатываемость слоя наплавки существенно выше. Это приводит, в свою очередь, к положительному экономическому эффекту применения наплавки за счет существенного ускорения процессов механической обработки деталей при ремонте.

### 2) Распределения микротвердости.

В различных литературных источниках показано, что заметное повышение твердости у стали Гадфильда возникает при повышении степени относительной деформации. Регулярно сообщается о повышении твердости с 200 до 350-400 HV при глубине наклепанного слоя до 7 мм [8, 14]. Для эффективного восстановления и последующей эксплуатации детали необходимо получить микротвердость в наплавленном слое равную или более высокую, чем на поверхности наклепанного слоя стали Гадфильда. Совпадение значений микротвердости в области приповерхностного слоя свидетельствует о корректном выборе порошковой проволоки для восстановления изношенной детали. Плавное снижение микротвердости в переходной зоне служит доказательством

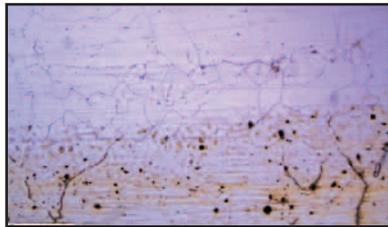


Рис. 11. Микроструктура исходной зоны, увеличение  $\times 200$



Рис. 12. Микроструктура металла основы, увеличение  $\times 50$

высокого качества наплавки. Используемая УНПЦ «Судоремонт» методика восстановления деталей позволяет получить поверхностный слой с повышенной микротвердостью, что обеспечивает повышенное сопротивление износу при эксплуатации.

### 3) Микроструктура.

Наклеп поверхностного слоя стали Гадфильда обусловлен деформированием и разделением зерен аустенита плоскостями скольжения и двойниками с повышенной плотностью дислокаций [8]. Соответственно, в качестве причины упрочнения поверхностного слоя в образце № 1 можно принять разделение крупных зерен аустенита на субзеренную структуру и накопление дефектов на малоугловых границах. Наличие подобных конфигураций заметно на образце № 1 (см. рис. 6) в виде протяженных параллельных полос.

### 4) Коррозионное поведение.

Выявлено существенное отличие в коррозионной стойкости материала наплавки от стойкости материала основы. Сталь Гадфильда обычно описывается как довольно уязвимая к коррозионному разрушению. Данный факт нашел подтверждение в ходе эксперимента: длительное воздействие раствора 5% азотной кислоты сильно выделило границы зерен стали ЭИ-256, но не оказало значительного влияния на микроструктуру наплавленного слоя. Таким образом, выбор порошковой проволоки ASM 4025 позволяет создать покрытие на стали Гадфильда, имеющее более высокую коррозионную стойкость, чем основной материал. Указанный эффект подтверждает свойство наплавочной проволоки ASM 4025 повышать работоспособность шарнирных соединений в зазорах. Актуальность применения коррозионностойкой наплавки не вызывает сомнений. Попадание абразивных частиц в открытые зазоры с последующим схватыванием (заеданием) и вырыванием отдельных фрагментов приводит к значительным разрушениям, что достаточно подробно описано в литературе [3].

## ВЫВОДЫ

1. Технологический процесс восстановления пальцев черпаковой цепи земснарядов пр. Р-36 наплавкой порошковой проволоки ASM 4025 решает задачу обеспечения параметров износостойкости исходной стали ЭИ-256.

2. Применимость данной технологии доказана на практике фактическим количеством партий восстановленных пальцев и результатами их наработки; подтверждена металлографическими исследованиями материала наплавки, зоны термического влияния и основного материала детали.

3. Ряд свойств материала наплавки улучшают работоспособность пары трения «втулка–палец» за счет

лучших параметров качества обработки, коррозионной стойкости и предпосылок отсутствия заеданий в зазоре сопряжения.

4. Эксплуатационно и материаловедчески доказана возможность повторной наплавки пальцев, что дополнительно приводит к увеличению толщины износостойкого слоя.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Д.Э. Бессмертный. Повышение работоспособности черпаковой цепи дноуглубительных земснарядов на основе выбора материалов при изготовлении сменно-запасных деталей в судоремонте (дисс. канд. техн. наук). – Н.Новгород. 2006. 2. Е.В. Фунтикова. Принятие технических решений на основе моделирования и прогнозирования альтернативных технологий в судоремонте (дисс. канд. техн. наук). – Н.Новгород. 1999. 3. Восстановление рабочих устройств земснарядов износостойкими наплавками / Погодаев Л.И., Кузьмин А.А., Ежов Ю.Е., Донских Д.Ф. // Журнал университета водных коммуникаций: судостроение и судоремонт. 2011. – Вып. 2. – с. 62-70. 4. Повышение долговечности изнашивающихся деталей дорожно-строительных машин / Загорский Я.В., Загорский В.К., Кусова И.В. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2016. – № 1 – с. 236-254. 5. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах / Болобов В.И., Баталов А.П., Бочков В.С., Чупин С.А. // Записки Горного института. СПб. 2014 – т. 209. – с. 17-22. 6. Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel / Y. Dastur, W. Leslie // Metallurgical transactions A. 1981. – vol. 12A. – p. 749-769. 7. Failure analysis of a crossing rail made of Hadfield steel after severe plastic deformation induced by wheel-rail interaction / O. Zambrano, G. Tressia, R. Souza // Engineering failure Analysis. 2020 – № 115. 8. Закономерности формирования структуры поверхностного слоя стали Гадфильда при трении / Иванов Ю.Ф., Алешина Е.А., Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Сизова О.В., Громов В.Е. // Физическая мезомеханика. 2006. – т. 9, № 6. – с. 83-90. 9. Комплексная технология восстановления черпаков драг / Бройдо В.Л., Черняк С.С. // Вестник ИГТУ. 2016. – т. 20, № 11. – с. 184-193. 10. Влияние вида упрочняющей обработки на износостойкость материалов горного оборудования / Болобов В.И., Чупин С.А. // Записки Горного института. СПб. 2014. – т. 216. – с. 44-48. 11. Особенности структуры сварных железнодорожных крестовин, сформированных с использованием стыковой контактной сварки и импульсно-дуговой наплавки / Никулина А., Поречина А., Хлебников С., Батаева З., Потапов В. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. – т. 22, № 2. – с. 53-62. 12. Предремонтная диагностика металла пальцев черпаковой цепи с помощью ультразвука / Березин Е.К., Родюшкин В.М. // Контроль. Диагностика. 2019. – № 12. – с. 48-52. 13. Оценка качества восстановления наплавкой порошковой проволокой быстроизнашивающихся деталей черпаковой цепи с помощью ультразвука / Березин Е.К., Родюшкин В.М. // Научные проблемы водного транспорта. 2020. – № 65. – с. 11-15. 14. О возможности эффективного наклепа стали Гадфильда в условиях работы брони шаровых мельниц / Бочков В.С., Болобов В.И., Баталов А.П., Бойцов Ю.П. // Записки горного института. СПб. 2012. – т. 196. – с. 226-230.