

8. *Мартьянов В. В.* Расчет характеристик колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода типа «Фонтанка» (проект Р118) / В. В. Мартьянов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 1 (XIII). — С. 43а–46.

9. *Румб В. К.* Прочность судового оборудования. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов / В. К. Румб. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2008.

10. *Мартьянов В. В.* Расчет крутильных колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «Максимус» // Материалы 6-й межвузовской науч.-практ. конф. «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 14 мая 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 146-150.

11. *Хандов А. М.* Программа расчета крутильных колебаний валопровода с четырехтактным двигателем / А. М. Хандов // Труды международного науч.-техн. семинара «Исследования, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2006. — С. 252–253.

УДК [621.74.046:621.83]:[669.15-194:669/78]

В. П. Булгаков,
д-р техн. наук, проф.;

С. С. Уксусов,
ст. преп.;

А. А. Цапко,
ст. преп.

ВТУЛКА ШАРНИРА ЧЕРПАКОВОЙ ЦЕПИ ЗЕМСНАРЯДА ИЗ ДВУХСЛОЙНОЙ БОРИРОВАННОЙ СТАЛИ

THE DREDGE CHAIN CHERPAKOVA HINGE PLUG FROM TWO-LAYER BORIROVANNY STEEL

Разработана технология производства отливки основной детали шарнира черпаковой цепи из стали 40ГТЛ с переменным химическим составом по бору от наружной поверхности втулки к внутренней. Термическая обработка повысила твердость поверхностных борированных слоев металла до 540 – 570 НВ, обеспечила максимальное сопротивление абразивному износу. Твердость неборированного металла составила 319 НВ. Значительно возросшая ударная вязкость и пластичность структуры промежуточной зоны исключает возможность хрупкого разрушения и расслоений от динамических нагрузок. В процессе эксплуатации металл втулок из борированных отливок показал высокую ударно-абразивную износостойкость, технологичность при монтаже, что позволяет использовать технологию внутреннего борирования не только для втулок, но и для других деталей шарнира черпаковой цепи, произвести замену высокомарганцевистой стали на углеродистую низколегированную с послойным борированием, повысить долговечность земснаряда.

The production technology of casting of the main detail of the hinge of a cherpakovy chain from steel 40GT with a variable chemical composition on pine forest from an external surface of the plug to the internal is developed. Heat treatment increased hardness superficial the borirovannykh of layers of metal to 540 – 570 HB, provided the maximum resistance to abrasive wear. Hardness not of borirovanny metal made 319 HB. Considerably the increased impact strength and plasticity of structure of an intermediate zone excludes possibility of fragile destruction and stratifications from dynamic loadings. In use metal of plugs from the borirovannykh of castings showed high shock and abrasive wear resistance, technological effectiveness at installation that allows to use technology of internal borating not only for plugs, but also for other details of the hinge of a cherpakovy chain, to make replacement of high-manganic steel on carbonaceous low-alloyed with layer-by-layer borating, to increase durability of the dredge.

Ключевые слова: земснаряд, ударно-абразивный износ, отливка, легированная сталь, внутреннее борирование, твердость, ударная вязкость, наклеп, мартенсит, износостойкость, долговечность.

Key words: The dredge, shock and abrasive wear, casting, the alloyed steel, internal borating, hardness, impact strength, peening, martensite, wear resistance, durability.



ДОЛГОВЕЧНОСТЬ дноуглубительного земснаряда, работающего в условиях ударно-абразивного воздействия при значительных динамических нагрузках, определяется комплексом механических свойств деталей соединительных звеньев черпаковой цепи: высокой абразивной износостойкостью поверхностных слоев, контактирующих с грунтом; высокой прочностью и ударной вязкостью; сопротивлением ползучести основного металла. Все эти свойства в одном сплаве можно получить, если использовать сталь, легированную хромом, никелем, вольфрамом, титаном, после термо- и термомеханической обработки, которая должна обеспечить наиболее износостойкую структуру [1].

По характеру структуры износостойкие и высокопрочные материалы делятся на следующие группы:

1) материалы, содержащие небольшое количество легирующих элементов с мартенситной или промежуточной структурой при твердости 160 – 400 НВ (стали типа 15ХГ2С, 20Г5);

2) материалы с аустенитной структурой, износостойкость которых достигается упрочнением в холодном состоянии или обеспечивается созданием мартенситной структуры в поверхностном слое за счет деформации (стали 110 Г13, У15Х25Г2Н4С, у которых твердость после деформации достигает 400 – 500 НВ);

3) материалы с вязкой основой и карбидными включениями; при этом для карбидообразования используют углерод, марганец, хром, титан, вольфрам, молибден, никель и ванадий. К этой группе относятся высокоуглеродистые стали и чугуны (У40 Х20Г2С, У35Х25Г2Т2, У35Х12Г10С с твердостью 480 – 620 НВ);

4) мартенситно-стареющие стали: 25Х5ФМС, 35В9Х3СФ с твердостью после старения 480 – 520 НВ;

5) материалы, дополнительно легированные бором: У35Х20Г2Р3, У12Х8В12Р с твердостью 560 – 630 НВ [2].

Перечисленные сложнолегированные стали дороги и нетехнологичны в связи с тем, что плохо обрабатываются механическими способами, требуют специальной термообработки, а большой расход металла при эксплуатации ограничивает или исключает применение таких материалов в земснарядах.

Экономически целесообразно для работы в абразивной среде использовать углеродистую и низколегированную сталь. После термической и химико-термической обработки или наклепа металл приобретает высокую твердость, способствующую увеличению сопротивляемости изнашиванию. С повышением содержания углерода износостойкость стали возрастает, однако существенное значение имеет не только общее количество углерода, но и его расположение в структуре. Так, износостойкость детали увеличивается в два раза при замене стали 40Х на сталь 20Х после цементации и закалки до твердости 600 НВ [3].

Значительный рост износостойкости достигнут борированием поверхности среднеуглеродистой стали. Борирование производится при температуре 1000 °С в течение нескольких часов. В результате на поверхности металла образуются покрытия с высокой твердостью до 1800 МПа и износостойкостью в условиях статического нагружения. Высокая твердость борированной поверхности и низкая твердость матрицы (основного металла) при ударах приводит к отслоениям, которые становятся дополнительным абразивом, способствующим ускоренному износу шарнирного механизма в черпаковой цепи [4].

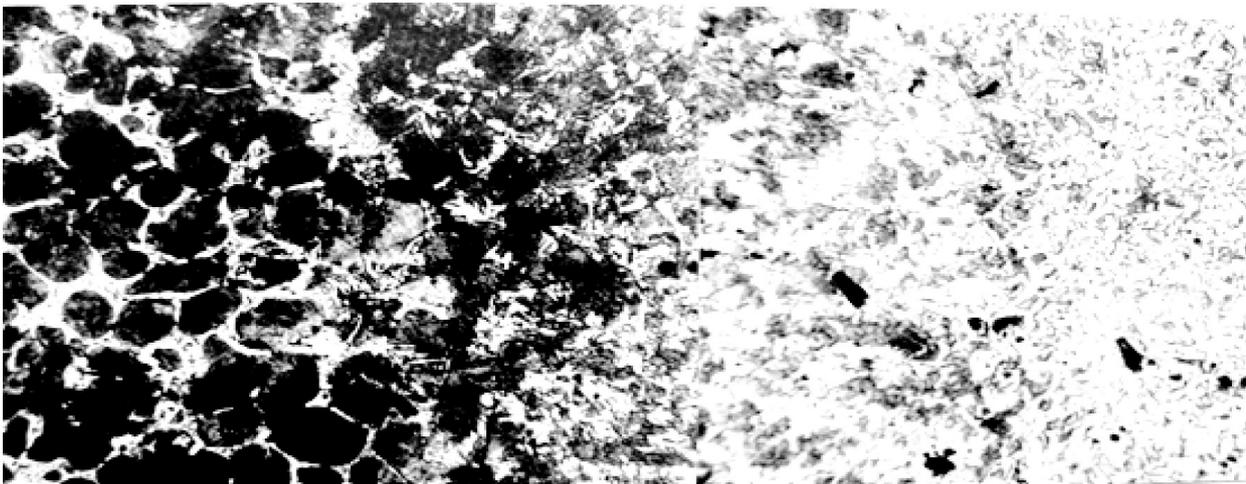
Опытным путем установлено, что абразивный износ двухфазных структур линейно связан с содержанием твердой структурной составляющей сплава. Для эффективного повышения износостойкости необходимо иметь в структуре большое количество твердых включений. Практически получение таких структур весьма затруднительно, поэтому можно сделать вывод о необходимости повышения твердости матрицы (основы сплава) путем введения в металл соответствующих элементов. В связи с этим рациональным способом повышения ударно-абразивной износостойкости может служить внутреннее борирование углеродистых сталей.

Бор — ярко выраженный горофильный легирующий элемент, в металле сосредотачивается по границам зерен, увеличивает устойчивость структуры, понижает критическую скорость заковки и повышает прокаливаемость стали [5]. С целью определения влияния бора на абразивную стойкость металла была изготовлена партия втулок шарнирного механизма черпаковой цепи с различным содержанием бора. В процессе эксплуатации земснаряда выявлена не только высокая абразивная износостойкость борированного металла, но и его повышенная хрупкость [6]. В результате поиска возможностей устранения хрупкого разрушения борированного металла без потери стойкости против абразивного износа разработана технология изготовления двухслойных втулок. Расплавленную в индукционной печи сталь 40ГТЛ заливали в изложницу центробежной литейной машины. После заливки половины необходимого объема стали струя металла прерывалась и на литниковый желоб насыпалась боросодержащая лигатура по расчету. Затем заливка стали в изложницу продолжалась до конца [7].

По данной технологии получают отливки, у которых внутренние слои металла, контактирующие с абразивной средой, насыщены бором и после соответствующей термообработки приобретают структуру с высокой твердостью, а наружные слои, не содержащие бор, — высокую прочность, высокую ударную вязкость и пластичность. Макро- и микроисследования литых отливок показали четко отличающиеся слои металла с бором и без бора по всей длине втулки. Дефекты в переходной зоне не обнаружены (рисунок).

а)

б)



Микроструктура сечения втулки $\times 100$:
из зоны от внутренней поверхности втулки
до центральной оси (содержание бора до 0,5 %) (а);
из зоны внешней поверхности (без бора) (б)

Термическая обработка отливок — отжиг и нормализация — делают структуру более равновесной, а закалка с отпуском значительно повышают твердость за счет образования мартенсита, бейнита, коагуляции карбидов и боридов. Такая структура литых втулок является хо-

рошим доказательством надежного сплавления слоев металла и невозможности расслоения в процессе эксплуатации под влиянием больших ударных нагрузок. Влияние бора на твердость и ударную вязкость стали 40ГТЛ в литом состоянии, после отжига, нормализации и закалки показано в табл. 1.

Таблица 1

**Твердость борированной двухслойной втулки стали 40ГТЛ
после термической обработки**

№ п/п.	Содержание бора, %	Литое состояние		Отжиг		Нормализация		Закалка		Ударная вязкость МДж/м ²
		HRB	HB	HRB	HB	HRC	HB	HRC	HB	
1	0	71	116	79	140	11	192	40	375	20
2	0,3	85	160	87	167	15	212	53	525	10
3	0,6	90	180	94	201	32	311	54	535	9
4	1,0	98	220	101	235	33	321	55	540	8

В литом состоянии увеличение содержания бора от 0 до 1 % повысило твердость от 116 до 220 HB, что связано с увеличением скорости затвердевания металла. По границам первичных зерен образуются прослойки боридов, устойчивые при всех видах термической обработки. Отжиг приводит к некоторому оттеснению перлита в центральную часть объемов, окруженных прослойками боридов. Это повышает твердость от 140 до 230 HB. Нормализация (охлаждение металла на воздухе) привела к повышению твердости за счет образования среднедисперсного сорбита. Закалка в масле максимально повысила твердость борированной стали до 540 – 570 HB. Структура при этом содержит мелкодисперсный мартенсит-бейнит. Полученная после термообработки структура борированной стали отвечает всем требованиям к износостойчивому материалу.

Сравнительную абразивную износостойкость отливок из двухслойной борированной стали определяли по скорости весового линейного износа на установке, снабженной вращающимся абразивным кругом диаметром 500 мм. Одновременно изнашивалось три образца, расположенных под углом 120° друг от друга и при одинаковом расстоянии от центра диска, который своим весом прижимал образцы к абразивному кругу. Для равномерности изнашивания диск вращался, причем каждый образец, двигаясь по сложной траектории, проходил одинаковый путь по абразиву [8]. Результаты определения скорости весового и линейного износа приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Скорость весового и линейного износа двухслойной борированной втулки
стали 40ГТЛ после термической обработки**

№ п/п	Содержание бора, %	Литое состояние		Отжиг		Нормализация		Закалка		Ударная вязкость МДж/м ²
		V	L	V	L	V	L	V	L	
1	0	14,6	32,4	12,9	30,1	6,	11,2	3,2	8,0	20
2	0,3	9,3	23	8,0	20	3,0	7,2	0,8	1,4	10
3	0,6	5,3	13,7	4,3	12,7	2,7	6,8	0,4	1,2	9
4	1,0	3,9	10,2	3,0	8,0	2,1	4,9	0,3	0,8	8

Скорость весового износа V , мг/мин,

$$V = G/3t,$$

где G — суммарная потеря массы трех образцов, мг; t — время изнашивания, мин.

Скорость линейного износа L , мкм/мин,

$$L = \Delta H / 3t,$$

где ΔH — изменение линейных размеров образцом, мкм; t — время изнашивания, мин.

Разрушение металла при ударно-абразивном воздействии осуществляется путем микро-резания и многократной пластической деформацией поверхности трения. При движении абразивной массы по поверхности скользящих деталей происходит непрерывное деформирование и упрочнение основы металла вместе с мелкими карбидами, рассеянными по всему объему. Это сопровождается наклепом деформированных слоев и заметным сопротивлением абразивному износу [9].

В литом состоянии борированный металл имеет повышенную твердость, и после всех видов термической обработки абразивный износ снижается с увеличением содержания бора, который является главным фактором получения абразивно-стойкой структуры. Чем выше твердость и ниже пластичность матрицы, тем выше сопротивление сплава истиранию. Максимальное сопротивление абразивному износу наблюдается на втулках, содержащих бор до 1 % при твердости 540 НВ. Наружный слой металла, не содержащий бор, имеет твердость 319 НВ при ударной вязкости 20 МДж/м², исключая хрупкое разрушение [10].

По разработанной технологии изготовлена партия двухслойных втулок с переменным химическим составом по бору от внешней поверхности к внутренней. Отливки технологичны, они хорошо обрабатываются резанием и при монтаже шарнира в цепь трещины и другие дефекты не возникают. В процессе эксплуатации земснаряда металл втулок показал абразивную износостойкость, соизмеримую со сталью Гатфильда (лучшим из известных ударно-абразивно-стойких материалов). Это позволяет использовать технологию внутреннего борирования не только для втулок, но и для других деталей шарнира черпаковой цепи, и произвести замену дорогой марганцовистой стали на борированную углеродистую, увеличить межремонтные сроки, повысить долговечность земснаряда.

Список литературы

1. Булгаков В. П. Критерии выбора материала для шарнирных соединений черпаков земснаряда / В. П. Булгаков, С. С. Уксусов, Л. А. Цапко // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. — 2011. — № 3. — С. 141–143.
2. Меликов В. В. Многоэлектродная наплавка / В. В. Меликов. — М.: Машиностроение, 1988.
3. Бернштейн М. Л. Металловедение и термическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахштадт. — М.: Металлургия, 1983.
4. Алиев А. А. Диффузионное борирование стали и шероховатость поверхности / А. А. Алиев, В. П. Булгакова, Б. С. Приходько // Вестник АГТУ. — 2005. — № 2 (25). — С. 61–64.
5. Вязников Н. Ф. Легированная сталь / Н. Ф. Вязников. — М.: Металлургиздат, 1968.
6. Булгаков В. П. Повышение долговечности узла крепления черпаков дноуглубительного земснаряда / В. П. Булгаков, С. С. Уксусов, Л. А. Цапко // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 7–8.
7. Алиев А. А. Борирование из паст / А. А. Алиев, А. Г. Ворошнин. — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2006.
8. Хрущев М. М. Абразивное изнашивание металлов / М. М. Хрущев. — М.: Наука, 1970.
9. Булгаков В. П. Модель изнашивания трибосистемы при ударноабразивном воздействии / В. П. Булгаков, С. С. Уксусов, Л. А. Цапко // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 20–22.
10. Ворошнин Л. Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. — Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001.