

4. Повышение долговечности грунтовых насосов.

Приведены экспериментальные данные об относительной стойкости высоколегированных наплавов на основе железа при гидроабразивном изнашивании (ГАИ) и кавитационной эрозии (КЭ). Дан анализ взаимосвязи между указанными видами эрозии наплавов и образцов из сплавов на основе меди; предложены критерии их износостойкости в зависимости от особенностей микроструктуры

Listed is experimental data about high-alloy welds' relative stability on the iron base by hydroabrasive wear (HW) and cavitation erosion (CE). Correlation analysis between stated erosion welds' forms and samples made from the copper base alloy is given; its durability criteria depending on microstructure peculiarities are proposed.

Гидроабразивному изнашиванию подвергаются детали грунтовых насосов и грунтопроводов, перекачивающих и транспортирующих жидкие среды, содержащие абразивные частицы, а также гидротурбины, судовые движители, крыльевые устройства судов на подводных крыльях и другие детали, работающие в воде, засоренной абразивом. В ряде случаев интенсивность ГАИ может быть очень высокой. Так например, при работе грунтовых насосов при неоптимальных режимах, что имеет место при пониженных, в сравнении с расчетными напорами, в частности, при укороченном грунтопроводе при перегрузке пульпы из шаланд на склад, скорость местного изнашивания рабочих колес в районе выходных кромок лопастей может достигать 0,2 мм/ч [1, 2]. На рис. 1 а, б показано рабочее колесо грунтового насоса земснаряда ДЭ-252 после работы в течение 600 ч на добыче песка в Финском заливе. Опыт эксплуатации земснарядов показывает, что чаще всего интенсивное местное изнашивание развивается в зонах вихреобразования: на входе и выходе пульпы в межлопастное пространство рабочего колеса; около разного рода препятствий и при резких поворотах потока; при локальных перепадах давления в зоне всасывания и т. п.

На интенсивность ГАИ влияет скорость и структура двухфазного потока, концентрация абразивных частиц, их твердость, крупность и геометрия, соотношение между твердостью абразива и изнашиваемой детали (H_a / H_d), рельеф обтекаемых поверхностей и др. факторы [1-2].

Ведущие детали в гидромашинах часто кроме ГАИ подвергаются КЭ. В зоне вихреобразования эти разновидности эрозии могут протекать одновременно. В свое время С. П. Козырев исследовал ГАИ металлов при кавитации [5].

Основным способом восстановления изношенных деталей является наплавка износостойкими материалами (рис. 1 в). В настоящее время известны десятки марок наплавки и технологий их использования с целью повышения надежности разнообразного оборудования при ГАИ и КЭ.

Из опыта эксплуатации деталей, восстановленных наплавкой с грубым рельефом рабочих поверхностей, чаще всего в виде валиков после ручной или полуавтоматической наплавки, известно, что неровности на пути двухфазного потока способствуют развитию местного изнашивания (рис. 1 г). Для устранения очагов местного ГАИ поверхностей деталей, восстановленных наплавкой, в Ленинградском институте водного транспорта в свое время была разработана технология восстановления деталей с «выглаживанием» рабочих поверхностей после основной наплавки дополнительными самофлюсующимися газотермическими (плазменными) покрытиями [6].

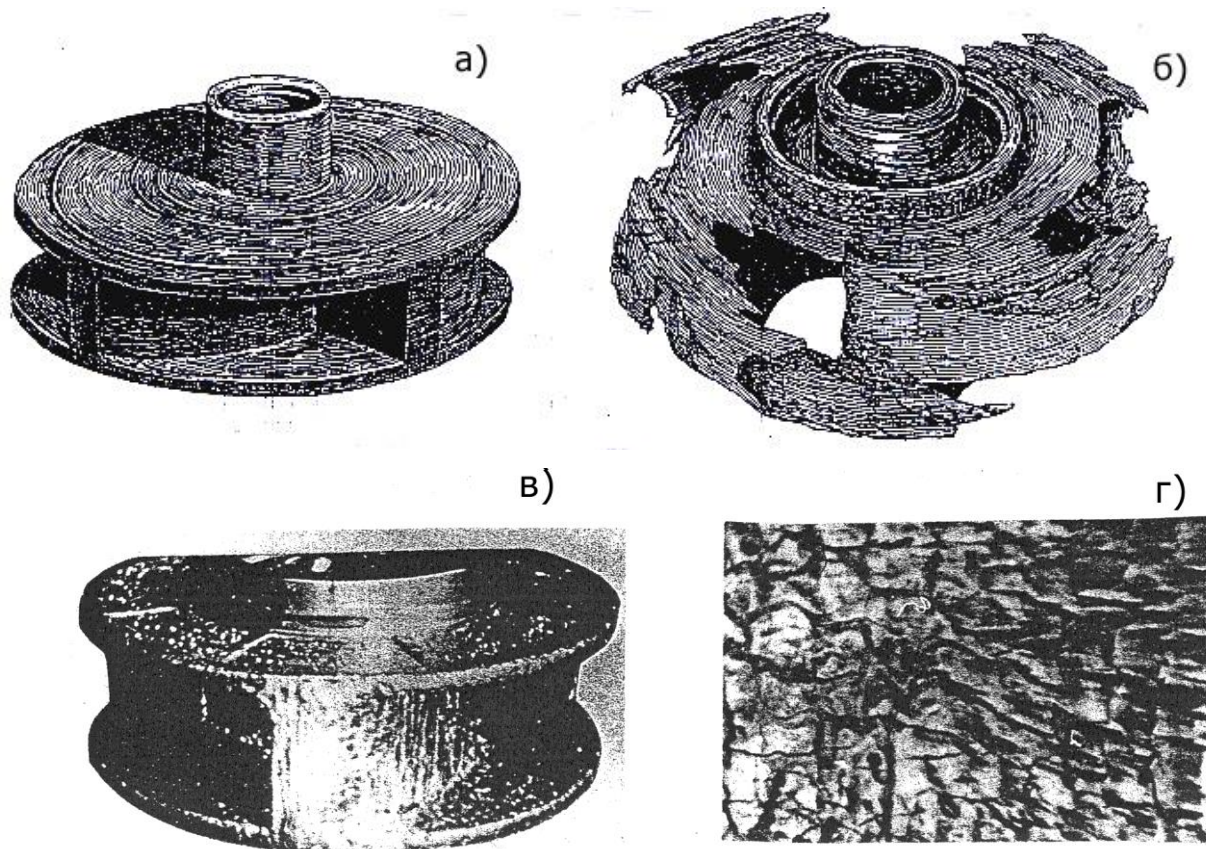


Рис. 1. Рабочее колесо грунтового насоса з/с ДЭ-250:
а – до эксплуатации; б – после работы в течение 600 часов;
в – после наплавки; г – износ наплавленного слоя.

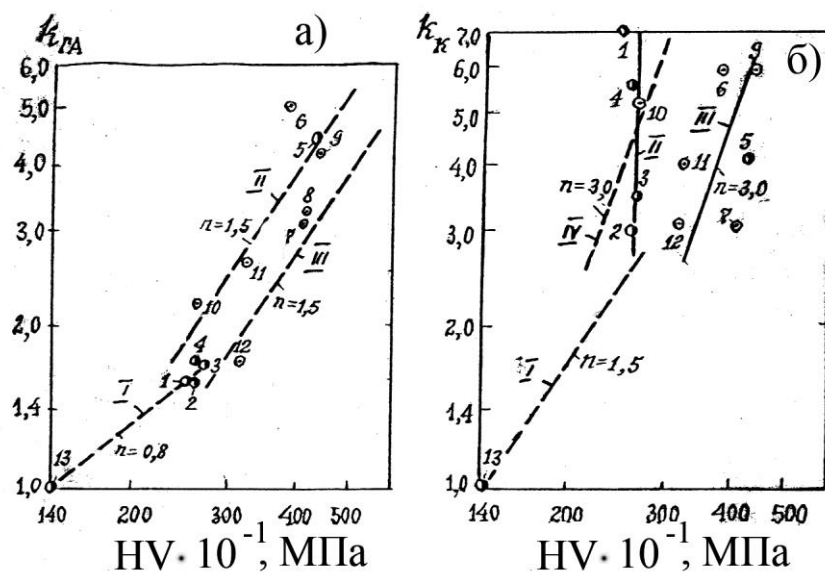


Рис. 2. Влияние твердости на износостойкость наплавов при гидроабразивном (а) и кавитационном изнашивании (б). Наплавки с аустенитной (А) и аустенитно-мартенситной (АМ) структурой: 30Х10Г10 (1); 40Х10Г16М2 (2); 50Х12Г10М2В (3); 50Х9Г9МВ (4); У20Х10Г10 (5); 1Х18Н9Т (13). Наплавки с мартенситной (М) структурой: У15Х23Т (6); Х17Т (7); Х17Ю (8); 4Х13 (9); 3Х13(10); 3Х13Т (11); 1Х13 (12).

Несмотря на то, что многие закономерности эрозии материалов настоящему времени установлены, тем не менее существует ряд вопросов, на которые нет убедительных ответов. Эти вопросы касаются, к примеру, критериев износостойкости наплавочных материалов, другими словами: какие свойства наплавов с гетерогенными структурами наилучшим образом коррелируют с их износостойкостью, или – существует ли взаимосвязь между коэффициентами относительной износостойкости материалов с неоднородными структурами при различных разновидностях изнашивания, например, между ГАИ и КЭ, или между ГАИ и коррозионной стойкостью материалов. Ответы на поставленные вопросы должны способствовать более обоснованному выбору наплавочных материалов и покрытий для деталей, подвергающихся при эксплуатации ГАИ и КЭ, а также коррозионному изнашиванию.

На рис. 2 приведены зависимости относительной износостойкости 12-и составов наплавов от их твердости при ГАИ (рис. 2 а) и КЭ (рис. 2 б). Наплавка образцов из Ст. 3 производилась электродной лентой и порошковыми проволоками соответствующего состава. Испытания на ГАИ производили на установке роторного типа Ленинградского металлического завода, при скорости перемещения образцов 16 м/с в рабочей среде, состоящей из воды и кварцевого песка крупностью 0,1...0,25 мм (190 г/л). Испытания

наплавов на КЭ производили на ударно-эрозионном стенде по методике, разработанной в Уральском политехническом институте [7, 8].

Влияние твердости на износостойкость $k_{ГА}$ при ГАИ наплавов оказалось возможным представить степенными зависимостями

$$k_{ГА} = \text{const}_1 HV^n, \quad (1)$$

где const_1 – опытная константа; $n = 0,8$ для линии I и $n = 1,5$ для линий II и III.

Отрезок I соответствует наплавкам с невысоким сопротивлением ГАИ. Это могут быть материалы с однородной структурой и с $HV \leq 2500$ МПа. При $HV > 2500$ МПа наблюдается масштабный переход с макро- на мезоуровень. При этом показатель степени в (1) удваивается. Важно отметить, что Cr-Mn наплавки с нестабильными аустенитом при деформации (т. 1-4) слабо сопротивляются ГАИ ($k_{ГА} \cong 1,6$). Наплавки с мартенситной структурой (т. 6-9) обладают примерно в 2 раза более высокой износостойкостью.

Зависимость кавитационно-эрозионной стойкости наплавов от их исходной твердости (рис. 2б) указывает на значительный разброс опытных данных. Для наплавов с $HV = 2500 \dots 2700$ МПа (линия II) k_k не зависит от исходной твердости. Опытные точки 1-4 на вертикальном отрезке II при одинаковой твердости указывают на возможность изменения k_k более чем в 2 раза. При этом нестабильность аустенита в структуре наплавов не проявляется.

Более определенно ведут себя наплавки с мартенситной структурой – точки: 6, 7, 9, 11 и 12 на отрезке III, который указывает на существование кубической зависимости

$$K_k = \text{const}_2 HV^{3,0}, \quad (2)$$

где $\text{const}_2 \cong 10^{-9}$, которая удовлетворительно согласуется со структурно-энергетической моделью надежности материалов и покрытий [1-4]. В связи с этим при учете вторичной твердости наплавов линия IV с точками 1, 4, 10, 3 и 2 на рис. 2 б переместится вправо и совпадает с отрезком III, что для большинства наплавов даст единую кубическую зависимость $k_k(HV)$, аналогичную формуле (2).

Из сопоставления осредненных зависимостей $k_{ГА}(HV)$ на рис.2 а и $k_k(HV)$ на рис. 2 б следует важное для практики квадратичное соотношение $k_k = 0,33 k_{ГА}^2$. (3)

При неучете особенностей микроструктуры и вторичных свойств наплавов сопоставление $k_{ГА}$ с k_k (рис. 3 а) приводит к значительному разбросу опытных точек и весьма приближенные частные степенные зависимости, соответствующие четырем линиям (I-IV), вытекающим из общего соотношения $k_{ГА} = \text{const}_3 k_k^n$, в котором показатель степени n может изменяться в широких пределах, от 0,33 до 1,0 при средних значениях, равных 0,5...0,7.

При сравнительных испытаниях сплавов на основе меди, с более однородными структурами в сравнении со структурами наплавов, между k_k , $k_{ГА}$ и $k_{V_{кр}}$ проявляются четкие квадратичные (рис. 3 б) и линейные зависимости (рис. 3 в), позволяющие по результатам сравнительных испытаний материалов при одной разновидности изнашивания прогнозировать их износостойкость при других видах изнашивания, например при известной стойкости при ГАИ определять их кавитационную и коррозионную стойкость [2-4, 9].

На рис. 4 а по опытным данным С. П. Козырева [5], полученным после испытаний 17-и составов наплавов на эрозионно-ударном стенде при скорости струи 80 м/с, концентрации и крупности кварцевых абразивных частиц, равных 10% по объему и 0,2 мм соответственно, построена зависимость относительных весовых потерь образцов ($k_{\Delta G} = \Delta G_s / \Delta G_i$) от энергетического критерия $W_{кр}$, определенного по формуле

$$W_{кр} = HV_{30} a_n / \sqrt{\rho_m P}, \quad (4)$$

где HV_{30} – твердость по Виккеру; a_n – ударная вязкость (образцы без надреза); ρ_m – плотность наплавленного материала; P – наибольшее усилие разрушения призматических образцов при определении ударной вязкости [2].

Для всей совокупности опытных точек оказалась наиболее близкой зависимость $k_{\Delta G} = const_1 W_{кр}^{1,25}$. В то же время частную зависимость для хромистых наплавов на рис. 4 а можно представить более четкой квадратичной зависимостью, т. е. $k_{\Delta G} \sim W_{кр}^2$ (пунктирная линия). Таким образом, критерий $W_{кр}$, одновременно учитывающий твердость и хрупкость (пластичность) материалов [2, 5] оказался пригодным для приближенной оценки износостойкости наплавов при ГАИ.

На рис. 4 б и в показаны зависимости износостойкости наплавов 5-и составов от критерия $W_{кр}$ при ГАИ на установке лоткового типа при скорости перемещения обоймы с образцами, равной 11,2 м/с в емкости с рабочей смесью, состоящей из воды и 20% по объему гравия крупностью 5...10 мм (I вариант ударного ГАИ) и состоящей из воды и 70% по объему кварцевого песка крупностью 0,3...1,0 мм (II вариант безударного ГАИ). При этом критерий $W_{кр}$ представлен в виде произведения относительных коэффициентов $k_{w_{кр}} = k_{HV} k_{a_n} k_{(HV/P)^{0,5}}$ (в I варианте ГАИ, рис. 3 б) и $k_{w_{кр}} = k_{HV}$ (во втором варианте ГАИ, рис. 3 в).

Несмотря на инверсию в расположении наплавленных образцов в I и II вариантах ГАИ, зависимости $k_{\Delta G}$ от критерия $W_{кр}$ в обоих случаях оказались линейными при высоком коэффициенте корреляции, что обусловлено близостью химсостава и структуры наплавов.

Практический интерес представляет оценка влияния на интенсивность ГАИ материалов отношения твердости абразивных частиц H_a к твердости изнашиваемой поверхности детали H_d . В свое время Хрущовым М. М. и Бабичевым М. А. в работах [10, 11] была установлена фундаментальная закономерность абразивного изнашивания материалов на машине X4-Б, заключающаяся в том, что при некотором (критическом) отношении $H_a / H_d \cong 2$ изнашивающая способность абразива достигает максимума и при дальнейшем увеличении H_a / H_m не изменяется. Наши опыты показали, что эта закономерность проявляется и при ГАИ. Так при ГАИ на установке лоткового типа образцов из стали ОХ17Н3Г4Д2Т в рабочей среде, состоящей из воды и абразивных частиц различной твердости в равных объемных соотношениях критическое соотношение H_a / H_m равно примерно четырем при использовании рабочей смеси с частицами корунда [3]. Аналогичный результат был получен при обработке резцами с твердым сплавом ВК6 деталей из стали 1Х18Н9Т: максимальная износостойкость и режущая способность резцов соответствовала критическому отношению твердости инструмента H_n к твердости стружки H_c , равному 4,0...4,5.

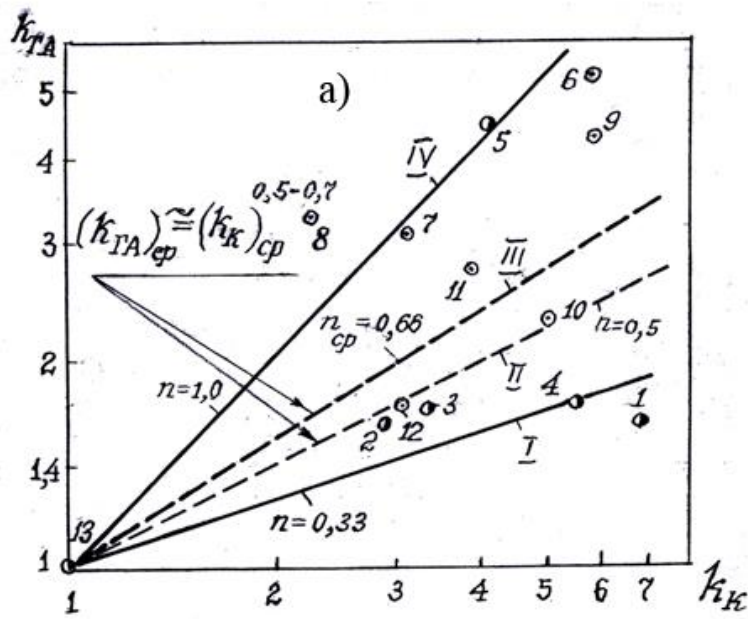
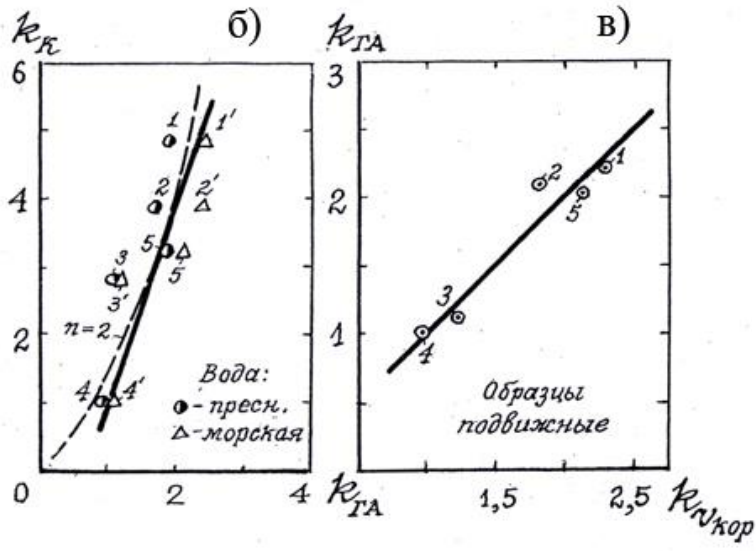
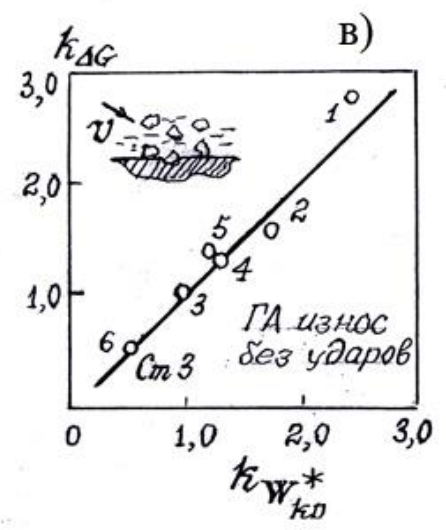
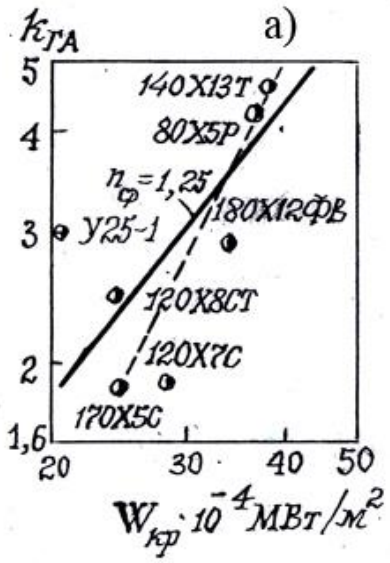


Рис. 3. а – соотношения между износостойкостью наплавов при гидроабразивном ($k_{ГА}$) и кавитационном (k_K) изнашивании; точки соответствуют высоколегированным наплавкам (т. 1-13) на рис. 2; б – соотношение между относительной износостойкостью бронз и латуней при кавитации и гидроабразивном изнашивании; в – то же между $k_{ГА}$ и относительной скоростью коррозии $k_{v,кор}$:



1 – БрА9Ж4Н4; 2 – БрА9Ж4Н3; 3 – Л67А5Мц2Ж2; 4 – Л55Мц3Ж1; 5 – Ni-Al бронза «Новостон».

Рис. 4. Износостойкость наплавов в зависимости от энергетических критериев $W_{кр}^*$ (а) и $k_{W_{кр}^*}$ (б) и (в): Ст. 3 (т. 6); 85Х8Г4СФЮТЗР (1); 85Х8Г4СФЮТЗ (2); 85Х8Г4С (3); 85Х8Г4СФ (4); 85Х8Г4СФЮ (5).



В заключении статьи можно привести результаты производственных испытаний рабочих колес грунтовых насосов, проработавших на четырех земснарядах от 380 до 1330 ч (табл.). Наиболее высокую износостойкость показали рабочие колеса, наплавленные порошковой проволокой ПП 70Х20РЗ-0. Эффективность их эксплуатации оказалась в 3 раза выше эффективности работы штатных колес без наплавки.

Результаты сравнительных производственных испытаний рабочих колес грунтовых насосов, защищенных износостойкими наплавками

Таблица 1

Номер земснаряда и рабочее колесо грунтового насоса	Длительность работы τ , ч	K_T	Переработано грунта V , тыс. м ³	K_V	Стоимость новой детали, руб.	Стоимость детали с учетом наплавки и эксплуатации, руб.	Защиты 1 тыс. м ³ грунта, руб.	Материал наплавки	$k_s = \frac{k_r + k_v}{2}$	
									k_r	k_v
Земснаряды 124, 203, 131. Рабочее колесо ЗГМ-2 м	380	1	75,3	0	437	437	5,8	Без наплавки	1	
Земснаряд 131. Рабочее колесо ЗГМ-2 м	436	1,15	128	1,7	437	508	3,97	Т-590	1,42	
Земснаряд 203. Рабочее колесо ЗГМ-2 м	477	1,25	160	2,12	437	565	3,54	ПП 300Х25РТ	1,68	
Земснаряд 124, 131. Рабочее колесо ЗГМ-2 м	831	2,18	187	2,48	437	645	3,45	ПП 70Х20РЗ-0	2,33	Средний 3,06
То же, но с учетом работы после реставрации	1331	3,5	307	4,07	437	663,	2,16	ПП70Х20РЗ-0, реставр. после 831 ч электродами Т-590	3,8	
Земснаряд 119. Рабочее колесо 16Р-9	449	1,18	130	1,73	443	527	4,06	ПП 350Х20Г5Т	1,45	

Выполненные исследования позволяют сделать некоторые выводы:

1. Исходная твердость наплавки не может служить достаточно надежным критерием их износостойкости при ГАИ и КЭ.

2. Более объективными критериями износостойкости наплавки могут служить вторичные свойства материалов, например их твердость, измеренная на изношенной поверхности

[2-4 и др.], а также энергетические критерии, учитывающие комплекс прочностных и пластических свойств материалов.

3. Удовлетворительная корреляция между стойкостью наплавов и других материалов при ГАИ и КЭ наблюдается для образцов и деталей со сходной микро- и макроструктурой изнашиваемых поверхностей (рабочих слоев).

4. При ГАИ существует критическое соотношение между твердостью абразивных частиц и твердостью детали $H_a / H_d \cong 4$ превышение которого не увеличивает изнашивающую способность гидроабразивной среды.

5. Повышенная износостойкость наплавов ПП нп 70Х20Р3-0 можно связать с высокой прочностью гетерогенной структуры, когда в ледебуритной матрице присутствуют высокотвердые бориды хрома с $H\mu = (1200...2350) \cdot 10^{-1}$ МПа.

Список литература:

1. **Борщевский Ю. Т., Погодаев Л. И.** Повышение эффективности землесосных снарядов. Киев: «Бу д івельник». 1974. –248 с.
2. **Погодаев Л. И., Шевченко П. П.** Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. Л.: «Судостроение». 1984. –264 с.
3. **Погодаев Л. И., Лукин Н. В.** Режимы работы и долговечность деталей землесосных снарядов. – М.: Транспорт, 1990. –192 с.
4. **Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н.** Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. – СПб.: Академия транспорта РФ, 2006. – 608 с.
5. **Козырев С. П.** Гидроабразивный износ металлов при кавитации. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
6. **Ежов Ю. Е.** Совершенствование технологии ремонта и прогнозирование износостойкости рабочих устройств судов технического флота. Автореф. канд. дисс. Л.: ЛИВТ. 1991. – 28 с.
7. **Хомусько Ф. А.** Исследование гидроабразивной и кавитационной стойкости наплавленного металла // Автоматическая сварка. N 6 (183), 1968. – С. 29-31.
8. **Хомусько Ф. А., Минц Р. И.** Разработка метода кавитационностойкой наплавки // Автоматическая сварка», N 7, 1962. – С. 32-35.
9. **Лазаренко С. П., Чебукова В. В., Аравин Б. П.** Исследование коррозионной стойкости легированных алюминиевых бронз для изготовления гребных винтов // Технология судостроения, 1971, N4. – С. 135-140.
10. **Хрущов М. М., Бабичев М. А.** Исследования изнашивания металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 325 с.

11. **Хрущов М. М., Бабичев М. А.** Исследование влияния абразивных частиц на изнашивание металлов / Износ и антифрикционные свойства материалов. Сборник XX. - М.: «Наука». 1968. – С. 48-64.