

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-97-108

HYDROABRASIVE WEAR OF JET PUMP NOZZLES

Y. N. Tsvetkov¹, V. A. Petrov¹, I. Y. Ivko²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Joint-Stock Company “Central Design Bureau for Marine Engineering “Rubin”,
St. Petersburg, Russian Federation

The measurements of hydroabrasive wear of the jet pumps nozzles, used on dredges operating on transferring pulp, are carried out. The measurement result is compared with the result of modelling the flow in the pump suction chamber near the nozzles. The modelling is carried out using the Fluent program complex as a part of the Ansys program; the pure water is being modelled in the suction pipe. This assumption is made taking into account that pulp contains approximately 10 percent by volume of sand, therefore the trajectories of sand particles movement coincide with the streamlines of water. The results of modeling have shown, that the angle of attack on the surface of nozzle nose part nearest to the pulpline outlet is close to zero, whereas the angles of attack on the surface of the nozzle nose part furthest from the pipeline outlet differ considerably from the zero and range from 20 to 50 degrees, that is the values at which the hydroabrasive wear increases severalfold compared to the angles close to zero. The results of modelling are confirmed by the examination of the worn nozzles. It is turned out that the nose part of the nozzles wears out along a circle unevenly, the part furthest from the pipeline outlet wears at higher rate, that leads to the bevel of the plane of the nozzle nose opening, the bevel angle reaches 20–25 degrees. The microhardness values of the nose part of the worn nozzle are also in agreement with the results of modelling. The measurements have shown, that the microhardness of the nose part of the worn nozzle is uneven along a circle, and the microhardness of the most worn side of the nozzle nose is least. This fact indicates that the different zones of the surface of the nozzle nose part differ from each other by the rigidity of stress state scheme in hydroabrasive attack. It can be used later in choosing the regime of laboratory tests on hydroabrasive wear.

Keywords: jet pump, nozzle, hydroabrasive wear, wear of nozzles, angle of attack, microhardness of worn surface.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., Vasiliy A. Petrov, and Ivan Ye. Ivko. “Hydroabrasive wear of jet pump nozzles.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 97–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-97-108.

УДК 621.43.032.69: 532.525.3

ГИДРОАБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ФОРСУНОК СТРУЙНОГО НАСОСА

Ю. Н. Цветков¹, В. А. Петров¹, И. Е. Ивко²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро
морской техники «Рубин», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Выполнен сравнительный анализ результатов измерений гидроабразивного износа форсунок струйных насосов, используемых на гидроперегрузателях, задействованных на перекачке суспензии воды с песком, и результатов моделирования потока в камере всасывания насоса в районе форсунок. Моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса Fluent в составе программного продукта Ansys.

При этом вместо пульпы во всасывающем патрубке смоделирована чистая вода с учетом того, что концентрация песка в суспензии составляет примерно 10 % по объему, поэтому траектории движения частиц песка совпадают с линиями тока воды. Результаты моделирования показали, что углы атаки на ближнюю к пульпопроводу поверхность форсунки, примыкающую к ее выходному отверстию, близки к нулю, тогда как углы атаки на поверхность форсунки, дальнюю от пульпопровода, существенно отличаются от нуля и составляют 20–50° — значения, при которых гидроабразивный износ возрастает в несколько раз по сравнению с углами атаки, близкими к нулю. Результаты моделирования подтверждены также обследованием изношенных форсунок: их носовая часть изнашивается по окружности неравномерно — с большей скоростью изнашивается сторона, дальняя от пульпопровода, что приводит к появлению скоса плоскости носового отверстия форсунок, при этом угол скоса достигает 20–25°. Значения микротвердости носовой части изношенной форсунки также соответствуют результатам моделирования. Измерения показали, что микротвердость носовой части форсунок неравномерна по окружности и наиболее изнашиваемая сторона носика форсунки имеет наименьшую микротвердость. Данный факт свидетельствует о том, что разные районы поверхности носовой части форсунок отличаются друг от друга жесткостью схемы напряженного состояния при гидроабразивном воздействии, что может быть в дальнейшем использовано при выборе режимов лабораторных испытаний на гидроабразивный износ.

Ключевые слова: струйный насос, форсунка, гидроабразивное изнашивание, износ форсунок, угол атаки, микротвердость изношенной поверхности.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Гидроабразивный износ форсунок струйного насоса / Ю. Н. Цветков, В. А. Петров, И. Е. Ивко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 97–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-97-108.

Введение (Introduction)

Обеспечение износостойкости деталей машин является ключевой проблемой в ходе повышения эффективности эксплуатации техники. На водном транспорте, эксплуатация которого осуществляется в водной среде, данная проблема является наиболее актуальной, так как помимо традиционных видов изнашивания судовое оборудование также подвергается ряду специфических видов разрушающего воздействия, включая гидроабразивное [1]–[3]. Например, гидроабразивный (ГА) износ является основной причиной ремонта оборудования судов технического флота: грунтовых насосов, пульпопроводов и струйных насосов [4].

ГА-воздействие характеризуется высокой скоростью изнашивания, при этом конструктивные мероприятия, основанные на изменении геометрических характеристик изнашиваемых деталей и режима их эксплуатации, не могут привести к существенному снижению ГА-износов без потерь производительности оборудования. В настоящее время наиболее распространенным способом снижения ГА-износов является способ, основанный на применении износостойких материалов [3], [5]–[7]. Однако сложность выбора материала для ремонта или изготовления деталей указанного оборудования обусловлена тем, что износостойкость конкретного материала не является его абсолютной характеристикой, и даже в условиях одного вида изнашивания при изменении его режима происходит изменение относительной износостойкости материалов и ГА-изнашивание в данном случае не является исключением.

Выбор износостойкого материала производится по результатам лабораторных испытаний. Для того чтобы результаты испытаний достоверно описывали износостойкость материала в условиях эксплуатации, необходимо обеспечить режим, характеризующийся аналогичной последовательностью материалов в ряду износостойкостей, которая подобна реализуемой в натурных условиях [8]. Можно предположить, что последнего можно добиться, если обеспечить при испытаниях такую же жесткость схемы напряженного состояния поверхностных слоев, как и при ГА-изнашивании в условиях эксплуатации.

Очевидно, что схема напряженного состояния поверхностных слоев изнашиваемой поверхности зависит от сочетания основных параметров ГА-воздействия: скорости потока, угла атаки, размеров абразивных частиц и их концентрации в несущей жидкости и т. д. [9], [10]. В лабораторных условиях невозможно воспроизвести в точности все значения указанных ранее параметров.

В данном случае наиболее разумным представляется оценивать адекватность условий изнашивания в лаборатории условиям эксплуатации по какому-либо одному параметру, представляющему собой интегральную характеристику ГА-воздействия и характеризующему реакцию материала на изнашивающее воздействие. Известно, например, что к жесткости схемы напряженного состояния поверхностных слоев изношенной поверхности очень чувствительна пластичность металлических материалов [11], [12], а значит, и степень упрочнения изнашиваемой поверхности при гидроабразивном воздействии также зависит от жесткости схемы ее напряженного состояния. Поэтому в качестве такой интегральной характеристики реакции материала можно использовать увеличение микротвердости изнашиваемой поверхности, для чего необходимо вначале оценить принципиальную возможность данного подхода. С этой целью удобнее всего использовать форсунки струйных насосов, небольшие габариты которых позволяют произвести на них необходимые измерения.

Целью работы является оценка чувствительности метода микротвердости изнашиваемой поверхности к изменению условий ГА-изнашивания (на примере форсунок струйных насосов). Иными словами, необходимо оценить перспективность метода микротвердости с точки зрения применения его в будущем для оценки жесткости схемы напряженного состояния поверхностных слоев деталей при ГА-изнашивании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) смоделировать течение жидкости в рабочей камере струйного насоса, чтобы установить характер ГА-воздействия на разные участки поверхности форсунки;
- 2) провести измерения параметров ГА-износа форсунок струйного насоса;
- 3) оценить степень упрочнения разных районов поверхности металлических форсунок при ГА-воздействии;
- 4) выполнить сравнительный анализ результатов моделирования и измерений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Струйные насосы (рис. 1), установленные на гидроперегрузателях ГП-1, ГП-14, ГП-18 и других моделей, служат для облегчения заполнения участка пульпопровода от входного отверстия наконечника, всасывающего грунт, до грунтового насоса в начальный период работы и подачи пульпы к грунтовому насосу. Форсунки 1 установлены по окружности (8 шт.) круговой камеры 2, в которую вода подается по трубопроводу 3 под рабочим давлением. Вода из форсунок подается в камеру всасывания 4, создавая разрежение, под действием которого поток пульпы движется по пульпопроводу 5. В камере 4 возникает сложная картина течения, при этом частицы песка попадают и в зону форсунок 3, вызывая их изнашивание (скорость изнашивания зависит от крупности частиц добываемого песка и режима работы). Износ форсунок приводит к отклонению направления струи и, как следствие, снижению производительности насоса и повышению скорости изнашивания корпуса насоса, поэтому изношенные форсунки периодически заменяют на новые.

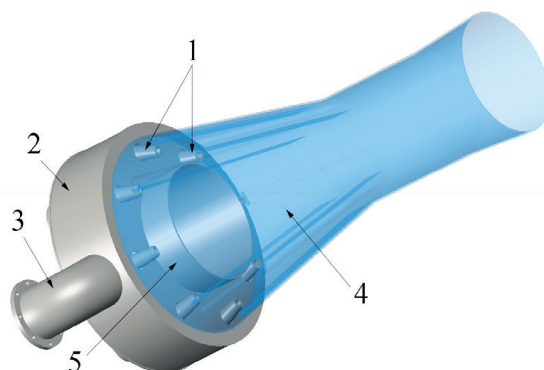


Рис. 1. Схема (3D-модель) струйного насоса

Моделирование течения жидкости в рабочей камере струйного насоса осуществлялось с использованием программного комплекса Fluent (в составе Ansys Student 2023 R1) с учетом рекомендаций [13], [14]. Была построена конечно-элементная модель струйного насоса. Базовый размер элемента сетки составляет 50 мм со сгущением в районах форсунок и созданием поверхностного слоя. В расчетах была использована модель $k-\epsilon$ турбулентности с опцией Enhanced Wall Treatment с учетом следующих граничных условий:

- условие симметрии;
- mass-flow-inlet для моделирования подачи чистой воды к форсункам;
- pressure-inlet на всасывающем патрубке;
- pressure-outlet на напорном патрубке;
- расход воды Q_p постоянный и равный 1250 м³/с (348 кг/с).

При моделировании вместо пульпы во всасывающем патрубке смоделирована чистая вода. Последнее допущение принято в связи с тем, что, как показывает опыт эксплуатации гидрореагентов, пульпа содержит песок с концентрацией примерно 10 % по объему, поэтому траектории движения частиц песка совпадают с линиями тока воды.

Традиционно форсунки изготавливаются из низкоуглеродистой нелегированной стали, однако при ремонте насосов стальные форсунки нередко заменяют фторопластовыми ввиду существенного облегчения процесса замены изношенной фторопластовой форсунки на новую по сравнению со стальными форсунками. Поэтому для проведения анализа изношенной поверхности были выбраны пять форсунок, бывших в эксплуатации: три форсунки из стали 20 и две — из фторопласта. Определение размеров изношенных форсунок при их визуальном осмотре выполняли с использованием штангенциркуля.

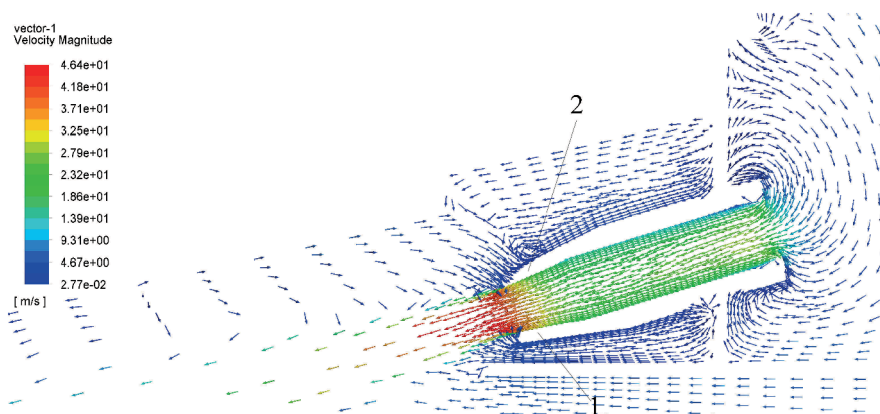
Наряду с измерением износа определяли шероховатость и микротвердость изношенной поверхности стальной форсунки. Для измерения шероховатости и микротвердости из трех форсунок выбрали имеющую наименьшие коррозионные повреждения поверхности, поскольку коррозия могла разрушить верхний наклепанный слой. Эту форсунку разрезали на отдельные части для удобства проведения измерений. Оценку шероховатости выполняли с помощью профилометра *MarSurfPS1*, на котором регистрировали среднее арифметическое отклонение профиля Ra (ИСО 4287–1997). Во всех измерениях шероховатости базовая длина была одинаковой и равной 0,8 мм, длина оценки включала пять базовых длин, а длина трассирования составила 5,6 мм. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3. Отпечатки наносили на те участки стальной форсунки, которые сохранили металлический блеск. Значения микротвердости определяли при трех нагрузках на индентор Виккерса: 0,49; 0,98 и 1,96 Н. При каждой нагрузке наносили шесть отпечатков — по три отпечатка на каждом из двух испытанных образцов — всего 18 отпечатков, и за результат брали среднее арифметическое значение.

Результаты и их обсуждения (Results and Discussion)

Как видно из результатов моделирования на рис. 2, угол атаки потока на наружную поверхность форсунки в районах, расположенных у выходного отверстия, отличается в зависимости от того, какая сторона рассматривается, — ближняя к всасывающему пульпопроводу или дальняя от него. Из представленного на рис. 2 распределения скоростей следует, что углы атаки на ближнюю к пульпопроводу поверхность 1, примыкающую к выходному отверстию форсунки, близки к нулю, тогда как углы атаки на поверхность 2 форсунки, дальнюю от пульпопровода, существенно отличаются от нуля. Для наглядности на рис. 3 в увеличенном виде представлено распределение скоростей потока в районе носовой части форсунки, изображенной сверху на рис. 2.

Как видно из рис. 3, а, для поверхности, наиболее близкой к выходному отверстию пульпопровода, векторы скоростей потока направлены вдоль поверхности, т. е. угол атаки близок к 0°, а для поверхности, наиболее удаленной от выходного отверстия пульпопровода (рис. 3, б) векторы скоростей потока направлены под углом к поверхности, при этом значения углов колеблются от 10 до 50°.

а)



б)

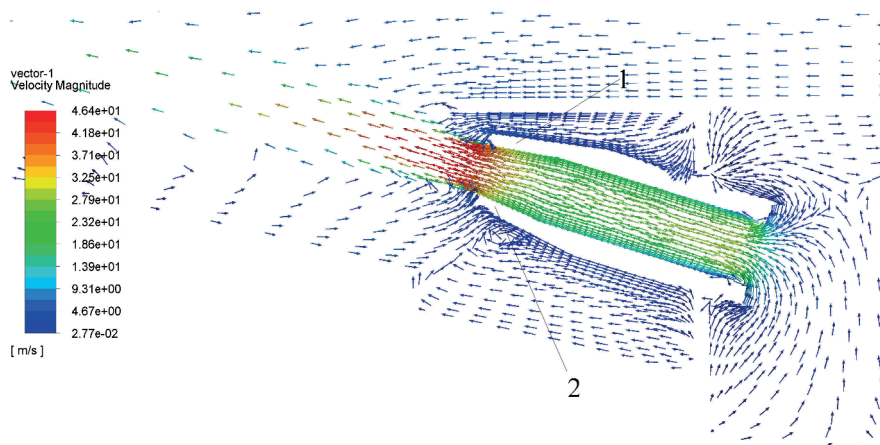
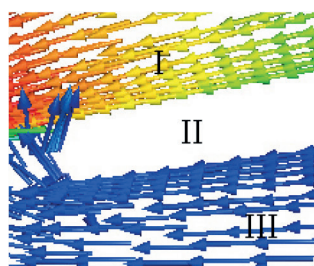


Рис. 2. Результаты моделирования течения жидкости в струйном насосе в районе расположения форсунок:
а — сверху от пульпопровода; б — снизу от пульпопровода

а)



б)

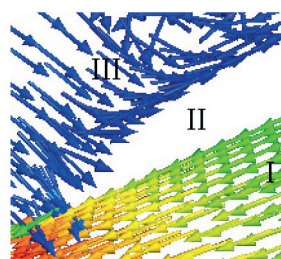


Рис. 3. Распределение скоростей потока на границе с носовой частью 1 (а) и носовой частью 2 (б):
I — поток воды в канале форсунки; II — стенка форсунки;
III — поток снаружи форсунки

Известно, что зависимость износа от угла атаки абразивных частиц при гидроабразивном [15], [16] и газоабразивном [17] видах изнашивания большинства сплавов, за исключением сравнительно хрупких таких как белый чугун [17], имеет максимум. При ГА-изнашивании указанный максимум в зависимости от вида сплава и условий воздействия соответствует значению угла атаки в диапазоне от 20° до 50° . Например, в работах [15] и [16] были испытаны углеродистые стали,

близкие по составу к стали форсунок: износ имел максимум на углах атаки 30° и 45° соответственно. При этом износ для углов атаки, близких к 0° и 90° , снижается по сравнению с максимумом в несколько раз. Таким образом, распределение скоростей потока на рис. 2 указывает на то, что носовая часть форсунок изнашивается по окружности неравномерно, и с большей скоростью будет изнашиваться сторона, дальняя от пульпопровода.

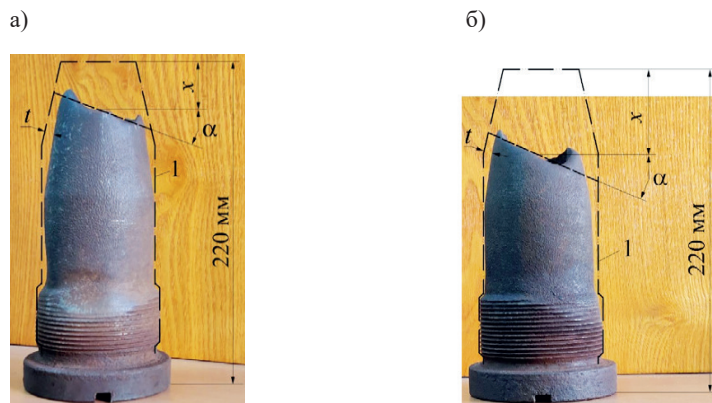


Рис. 4. Общий вид изношенных форсунок из стали 20 с контуром l исходной формы до ГА-воздействия:
 a — форсунка с малым износом;
 b — форсунка со сравнительно большим износом

Данный вывод подтверждается осмотром изношенных форсунок (рис. 4) — видно, что неравномерность износа носика форсунок приводит к появлению скоса плоскости носового отверстия форсунок, характеризуемого углом α (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики ГА-изнашивания форсунок из низкоуглеродистой стали после эксплуатации) в течение одной навигации (около 1400 ч работы)

Материал форсунки	Номер рисунка	Параметры износа			Средние скорости изнашивания	
		Угол скоса α , град.	Укорочение x , мм	Утонение t стенки, мм	$\Delta x / \Delta \tau$, мм/ч	$\Delta t / \Delta \tau$, мм/ч
Сталь 20	Рис. 3, a	20	30	7	0,021	0,0050
Сталь 20	Рис. 3, b	25	55	6	0,039	0,0043

При этом меньше изнашивается сторона носика форсунки, расположенная ближе к пульпопроводу (рис. 5).

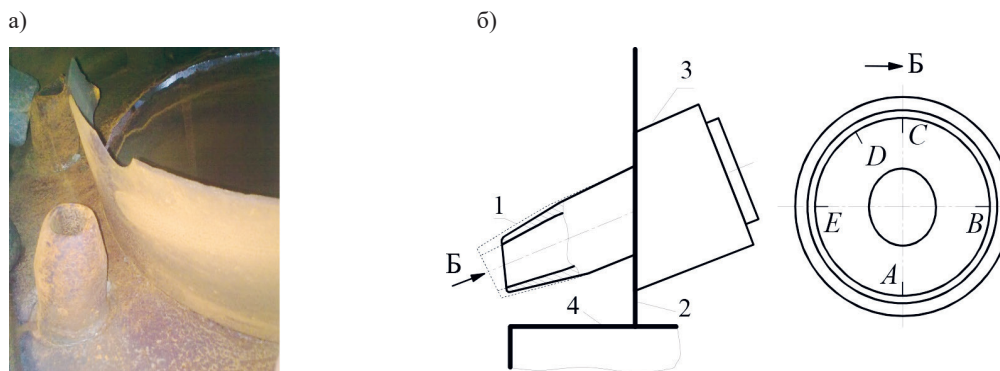


Рис. 5. Вид изношенных форсунок (a) внутри камеры всасывания и схема расположения форсунки (b) в насосе:
 l — контуры новой форсунки; 2 — передняя стенка круговой камеры;
3 — переходник с внутренней резьбой для установки форсунки; 4 — пульпопровод;
 A, B, C, D, E — районы поверхности носовой части, в которых происходили измерения микротвердости

Стремление снизить влияние износа форсунок на производительность насоса привело к использованию в ряде случаев форсунок цилиндрической формы (рис. 6, б). Увеличение толщины стенки форсунки в районе выходного отверстия способствовало существенному увеличению времени до полного износа (полного разрушения) стенки форсунки, поэтому укорочение форсунки цилиндрической формы (см. рис. 6, б справа) за одинаковое время эксплуатации не такое существенное, как в случае с форсункой, имеющей сужающийся носик (рис. 6, а). Для сравнения слева от изношенной фторопластовой форсунки на рис. 6, б показана новая форсунка из стали 20 аналогичных исходных размеров.

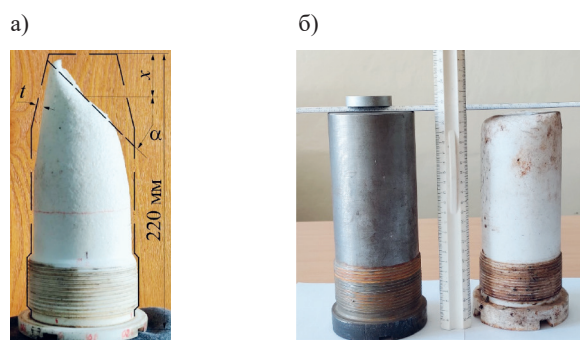


Рис. 6. Вид изношенных форсунок из фторопласта с конической носовой частью (а) и цилиндрической формой (б)

Значения микротвердости носовой части изношенной форсунки также соответствуют результатам измерения, которые показали, что микротвердость носовой части форсунок неравномерна по окружности и наиболее изнашиваемая сторона носика форсунки имеет наименьшую микротвердость (рис. 7). В статье [18] показано, что независимо от угла атаки гидроабразивного потока износ сталей изменяется прямо пропорционально продолжительности воздействия, т. е. изнашивание происходит без инкубационного периода. Это свидетельствует о том, что основным механизмом потери материала с поверхности является микрорезание. Тем не менее в рамках одного механизма разрушения поверхности при гидроабразивном воздействии разные районы поверхности носовой части форсунок отличаются друг от друга жесткостью схемы напряженного состояния.

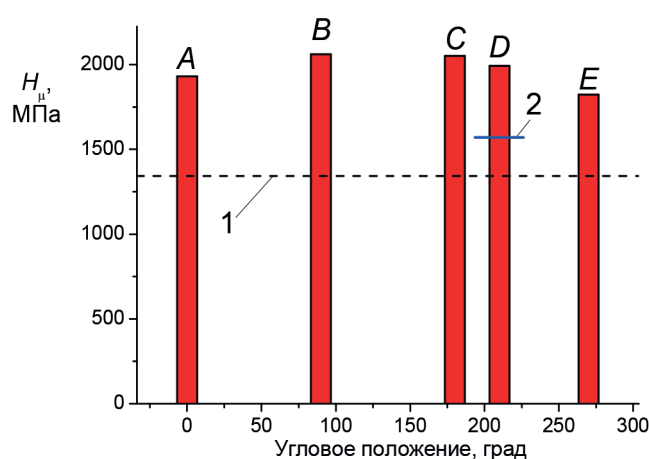


Рис. 7. Распределение микротвердости по окружности носовой части изношенной форсунки в районах A, B, C, D и E поверхности:

1 — микротвердость поверхности в исходном состоянии;
2 — микротвердость «сползшего» слоя

Изменение микротвердости изношенной форсунки по окружности ее носовой части подтверждено результатами оценки шероховатости этих районов (табл. 2).

Таблица 2

Значения параметра Ra , мкм, на поверхности изношенной форсунки из стали 20

Район	Измерения при движении щупа		Среднее значение
	в окружном направлении	в продольном направлении	
<i>A</i>	6,149	10,70	8,42
<i>B</i>	5,758	5,793	5,78
<i>C</i>	3,744	4,459	4,10
<i>D</i>	3,715	4,247	3,98
<i>E</i>	6,440	5,964	6,20

Как видно, зоны, в которых наблюдается минимальное упрочнение (*A* и *E*), имеют большую шероховатость, которую действительно можно объяснить большими углами атаки абразивных частиц на эти зоны. Зоны *C* и *D* подвергаются скользящему воздействию абразивных частиц, оставляя неглубокие борозды на поверхности. Такому воздействию соответствуют невысокие скорости изнашивания (см. значения $\Delta t/\Delta t$ в табл. 1). На поверхности зон *A* и *E* абразивные частицы, по всей видимости, оставляют из-за большего угла атаки более короткие и более глубокие вмятины с наплывами по периферии.

Интересное явление, зарегистрированное при ГА-изнашивании форсунок, — «сползший» слой (рис. 8), при котором создается впечатление, что поверхностные слои *1* теряют устойчивость и подобно слоям, сдуваемым с поверхности воды, налитой в блюдце, сползают с нее, образуя участок в виде тонкой пластинки 2, выступающей за пределы поверхности. Схожие явления наблюдались и в других исследованиях. Например, в работе [3] при испытании сталей и других сплавов на установке лоткового типа в результате значительных пластических деформаций было замечено сползание поверхностного слоя толщиной несколько микрометров так, что он выступал на 1–2 мм за плоскость грани, перпендикулярной изнашиваемой поверхности образца.

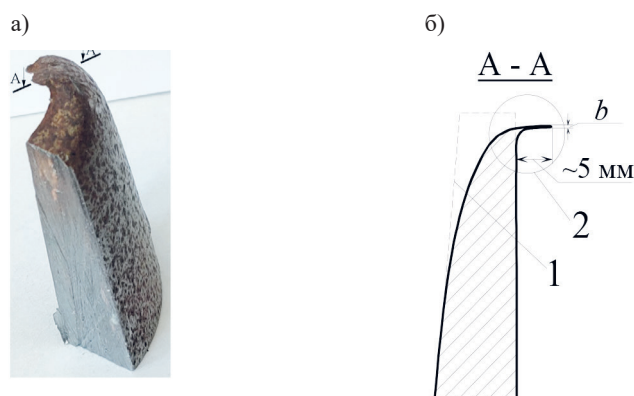


Рис. 8. Общий вид (а) и схема (б) «сползшего» слоя с носика стальной форсунки

Возможность рассматриваемого явления обусловлена окатанной формой частиц речного песка [4], [10] и фактически при ГА-воздействии имеет место не микрорезание, а выглаживание поверхности в результате интенсивной пластической деформации поверхности. Такой механизм повреждающего воздействия подтверждается образованием ряби на металлической поверхности [10], являющейся признаком пластического течения металла поверхности. Образование ряби как индикатора пластического течения отмечалось также при газоабразивной эрозии. Например, в статье [19] подробно исследовано образование регулярных микроволн (ряби) на поверхности алюминия и силумина при газоабразивном воздействии. В качестве эродента использовались стеклянные шарики диаметром 0,4 мм и частицы корунда Al_2O_3 средним диаметром 0,406 мм, имеющие угловатую форму. Изнашивание металла стеклянными шариками характеризовалось наличием инкубационного периода, в течение которого потери массы отсутствовали, и именно в инкубационный период про-

исходило образование ряби. Исследования поверхности на электронном сканирующем микроскопе показали, что рябь образуется складками пластически вытесненного металла, при последующих ударах частиц происходит его отделение в виде чешуек с задней поверхности гребней. При воздействии только угловатых частиц Al_2O_3 были зарегистрированы явные признаки микрорезания, причем при изнашивании смесью стеклянных шариков и частиц корунда при постепенном увеличении относительной доли частиц корунда в смеси интенсивность проявления ряби уменьшалась. Тем не менее сравнительно большие протяженность и толщина «сползшего» слоя (см. рис. 8, б) позволяют усомниться в том, что причиной такого образования являются пластические деформации тончайшего поверхностного слоя.

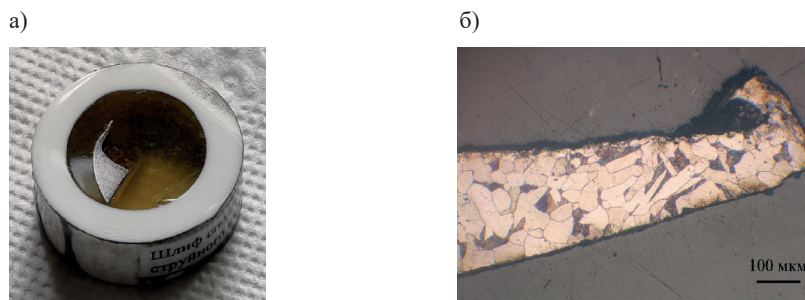


Рис. 9. Микрошлиф (а) «сползшего» слоя и его структура (б), выявленная травлением микрошлифа в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты

С целью определения истинной причины этого явления был изготовлен микрошлиф (рис. 9, а) сечения *A-A* (см. рис. 8, а) этого слоя. Была измерена микротвердость шлифа и травлением в 4 %-м спиртовом растворе HNO_3 исследована форма зерен (рис. 9, б) в пределах этого слоя. Микротвердость «сползшего» слоя оказалась сравнительно невысокой, т. е. заметно ниже микротвердости, измеренной в зонах *A*, *B*, *C*, *B*, *D* и *E*, что противоречит предположению о большой пластической деформации, испытанной этим слоем при течении. Анализ формы зерен на микрошлифе (см. рис. 9, б) не выявил искажения их формы (отсутствовала вытянутость зерен в направлении, соответствующем направлению атаки ГА-потока), характерной для больших пластических деформаций. Таким образом, обнаруженный «сползший» появился не в результате течения поверхностного слоя при больших пластических деформациях, а по всей видимости, явился следствием того, что после того как стенка носовой части форсунки в результате изнашивания превратилась в тонкую пластину, энергии ГА-потока оказалось достаточно для того, чтобы согнуть эту пластинку.

Заключение (Conclusion)

Носовая часть форсунок струйных насосов, используемых на гидроперегрузателях, задействованных на перекачке пульпы, изнашивается неравномерно по окружности при ГА-воздействии: с большей скоростью изнашивается сторона форсунки, дальняя от пульпопровода, что приводит к появлению скоса носовой части форсунки. Результаты моделирования потока жидкости в камере всасывания насоса показали, что большая скорость ГА-изнашивания дальней от пульпопровода стороны форсунки объясняется тем, что углы атаки потока на нее составляют $20-50^\circ$, в то время как углы атаки потока на сторону форсунки, ближнюю к пульпопроводу, близки к нулю.

Микротвердость поверхности носовой части изношенной форсунки также переменна по окружности: минимальна в тех районах поверхности, скорость которых наибольшая, и максимальна в тех районах, где скорость изнашивания минимальная. Различие значений упрочнения разных зон носовой части форсунки указывает на то, что в разных зонах поверхности реализуется разная жесткость схемы напряженного состояния при гидроабразивном воздействии, что может быть в дальнейшем использовано при выборе режимов лабораторных испытаний на гидроабразивный износ.

Благодарности (Acknowledgements)

Авторы выражают глубокую благодарность начальнику РЭБ флота в г. Отрадное Ленинградской области А. М. Олейнику за предоставленную возможность провести обследование форсунок струйных насосов на действующих судах технического флота и оказанное при этом содействие в предоставлении необходимой информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев С. П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С. П. Козырев. — М.: Машиностроение, 1971. — 240 с.
2. Супрун В. К. Абразивный износ грунтовых насосов и борьба с ним / В. К. Супрун. — М.: Машиностроение, 1972. — 104 с.
3. Погодаев Л. И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. — Л.: Судостроение, 1984. — 264 с.
4. Петров В. А. Гидроабразивное изнашивание оборудования судов технического флота / В. А. Петров, А. М. Олейник, Ю. Е. Ежов, Ю. Н. Цветков // 67-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета. — Астрахань: Астраханский гос. техн. ун-т, 2023. — С. 583–587.
5. Антоев К. П. Исследование стойкости к гидроабразивному воздействию перспективных полимерных футеровочных материалов / К. П. Антоев, С. Н. Попов, Б. Н. Заровняев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2019. — № 1. — С. 185–191.
6. Атрощенко В. А. Повышение эффективности транспортных трубопроводов закладочного комплекса применением полиуретанового покрытия / В. А. Атрощенко, В. И. Александров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № 10–1. — С. 25–38. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_25.
7. Felix D. Hydro-abrasive erosion of hydraulic turbines caused by sediment — a century of research and development / D. Felix, I. Albayrak, A. Abgottsporn, R. M. Boes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2016. — Vol. 49. — Is. 12. — Pp. 122001. DOI: 10.1088/1755-1315/49/12/122001.
8. Тененбаум М. М. Сопротивление гидроабразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. — М.: Машиностроение, 1976. — 271 с.
9. Цветков Ю. Н. Определение коэффициента жёсткости напряжённого состояния поверхности металлов при гидроабразивном изнашивании / Ю. Н. Цветков, Л. И. Погодаев // Проблемы машиностроения и надёжности машин (Машиноведение). — 1994. — № 6. — С. 109–114.
10. Цветков Ю. Н. Напряжённое состояние металлов при изнашивающем воздействии абразива / Ю. Н. Цветков, Л. И. Погодаев. — СПб.: СПбГУВК, 2004. — 94 с.
11. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. — М.: Металлургиздат, 1970. — 196 с.
12. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. — Л.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
13. Никущенко Д. В. Исследование течений вязкой несжимаемой жидкости на основе расчетного комплекса FLUENT: учеб. пособие / Д. В. Никущенко. — СПб.: Изд-во СПбГМУ, 2004. — 94 с.
14. Клюев А. С. Сравнение результатов численного расчёта струйного насоса в CFD пакетах ANSYS и OpenFOAM / А. С. Клюев, Я. И. Чернышев, Е. А. Иванов, И. О. Борщев // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. — С. 388–403. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-367.
15. Javaheria V. Slurry erosion of steel — Review of tests, mechanisms and materials / V. Javaheria, D. Portera, V. T. Kuokkala // Wear. — 2018. — Vol. 408–409. — Pp. 248–273. DOI: 10.1016/j.wear.2018.05.010.
16. Al-Bukhaiti M. A. Effect of impingement angle on slurry erosion behaviour and mechanisms of 1017 steel and high-chromium white cast iron / M. A. Al-Bukhaiti, S. M. Ahmed, F. M. F. Badran, K. M. Emara // Wear. — 2007. — Vol. 262. — Is. 9–10. — Pp. 1187–1198. DOI: 10.1016/j.wear.2006.11.018.
17. Young J. P. Particle erosion measurements on metals / J. P. Young, A. W. Ruff // Journal of Engineering Materials and Technology. — 1977. — Vol. 99. — Is. 2. — Pp. 121–125. DOI: 10.1115/1.3443420.

18. Yao J. Experimental Investigation of Erosion of Stainless Steel by Liquid-solid Flow Jet Impingement / J. Yao, F. Zhou, Y. Zhao, H. Yina, Q. Guo, N. Li // *Procedia engineering*. — 2015. — Vol. 102. — Pp. 1083–1091. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.231.

19. Talia J. E. Erosion ripple formation mechanism in aluminum and aluminum alloys / J. E. Talia, Y. A. Ballout, R. O. Scattergood // *Wear*. — 1996. — Vol. 196. — Is. 1–2. — Pp. 285–294. DOI: 10.1016/0043-1648(96)06928-1.

REFERENCES

1. Kozyrev, S. P. *Gidroabrazivnyy iznos metallov pri kavitatsii*. M.: Mashinostroyeniye, 1971.
2. Suprun, V. K. *Abrazivnyy iznos gruntovyh nasosov I bor'ba s nim*. M.: Mashinostroyeniye, 1972.
3. Pogodayev, L. I., and P. A. Shevchenko. *Gidroabrazivnyy i kavitatsionnyy iznos sudovogo oborudovaniya*. L.: Sudostroyeniye, 1984.
4. Petrov, V. A., A. M. Oleynik, Y. E. Ezhov, and Y. N. Tsvetkov. “Gidroabrazivnoye iznashivaniye oborudovaniya sudov tekhnicheskogo flota.” *67th Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya AGTU*. Astrakhan': Astrakhanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2023. 583–587.
5. Antoyev, K. P., S. N. Popov, and B. N. Zarovnyayev. “A study of promising polymer lining materials resistance to hydroabrasive effects.” *Izvestiya Tula State University 1* (2019): 185–191.
6. Atroshchenko, V. A., and V. I. Alexandrov. “Increasing the Efficiency of the Transport Pipelines of the Stowing Complex with the Application of a Polyurethane Coating.” *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)* 10–1 (2022): 25–38. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_25.
7. Felix, David, I. Albayrak, A. Abgottspon, and R. M. Boes. “Hydro-abrasive erosion of hydraulic turbines caused by sediment—a century of research and development.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 49. Is. 12. IOP Publishing, 2016. DOI: 10.1088/1755-1315/49/12/122001.
8. Tenenbaum, M. M. *Soprotivlenie gidroabrazivnomu iznashivaniyu*. M.: Mashinostroyeniye, 1976.
9. Tsvetkov, Yu. N., and L. I. Pogodaev. “Opredelenie koeffitsienta zhestkosti napryazhennogo sostoyaniya poverkhnosti metallov pri gidroabrazivnom iznashivanii.” *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin (Mashinovedenie)* 6 (1994): 109–114.
10. Tsvetkov, Yu. N., and L. I. Pogodaev. *Napryazhennoe sostoyanie metallov pri iznashivayushchem vozdeystvii abraziva*. SPb.: SPbGUVK, 2004.
11. Kolmogorov, V. L. *Napryazheniya, deformatsii, razrusheniye*. M.: Metallurgizdat, 1970.
12. Smirnov-Alyayev, G. A. *Mekhanicheskie osnovy plasticheskoi obrabotki metallov*. L.: Mashinostroyeniye, 1968.
13. Nikushchenko, D. V. *Issledovanie techenii vyazkoi neszhimaemoy zhidkosti na osnove raschetnogo kompleksa FLUENT*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2004.
14. Klyuyev, A., Ya. Chernyshev, E. Ivanov, and I. Borshchev. “Comparison of jet pump numerical calculation results in Ansys and Openfoam CFD packages.” *Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmomatika. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: POLITEKH-PRESS, 2020. 388–403. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-367.
15. Javaheri, Vahid, David Porter, and Veli-Tapani Kuokkala. “Slurry erosion of steel—Review of tests, mechanisms and materials.” *Wear* 408–409 (2018): 248–273. DOI: 10.1016/j.wear.2018.05.010.
16. Al-Bukhaiti, M. A., S. M. Ahmed, F. M. F. Badran, and K. M. Emara. “Effect of impingement angle on slurry erosion behaviour and mechanisms of 1017 steel and high-chromium white cast iron.” *Wear* 262.9–10 (2007): 1187–1198. DOI: 10.1016/j.wear.2006.11.018.
17. Young, J. P., and A. W. Ruff. “Particle erosion measurements on metals.” *Journal of Engineering Materials and Technology* 99.2 (1977): 121–125. DOI: 10.1115/1.3443420.
18. Yao, Jun, Fang Zhou, Yanlin Zhao, Hao Yin, Qixun Guo, and Ning Li. “Experimental investigation of erosion of stainless steel by liquid-solid flow jet impingement.” *Procedia engineering* 102 (2015): 1083–1091. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.231.
19. Talia, J. E., Y. A. Ballout, and R. O. Scattergood. “Erosion ripple formation mechanism in aluminum and aluminum alloys.” *Wear* 196.1–2 (1996): 285–294. DOI: 10.1016/0043-1648(96)06928-1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Петров Василий Андреевич — аспирант
Научный руководитель: Цветков Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: 9522114620w@gmail.com
Ивко Иван Евгеньевич — инженер-конструктор
Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»
191119, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 90
e-mail: ivkoie@live.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov, Yuriy N. — Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Petrov, Vasiliy A. — Postgraduate
Supervisor: Tsvetkov, Yuriy N.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: 9522114620w@gmail.com
Ivko, Ivan Ye. — Structural engineer
Joint-Stock Company “Central Design Bureau for Marine Engineering “Rubin”
90 Marata Str., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
e-mail: ivkoie@live.com

*Статья поступила в редакцию 17 ноября 2023 г.
Received: November 17, 2023.*