

ISSN 0202-3776

# ОБОГАЩЕНИЕ РУД

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. ИЗДАЕТСЯ С 1956 ГОДА

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЛУБИНЫ КАМЕРЫ  
И ВЫСОТЫ ЗОНЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ  
ПРОТИВОТОЧНОЙ ФЛОТОМАШИНЫ

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОСВЕТЛЕНИЯ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД  
АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ ЗОЛОТА  
В ТЕХНОГЕННЫХ ПЕСКАХ РОССЫПНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ГИДРООТВАЛА  
УГЛЕДОБЫЧИ АНГРЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
С ПОЛУЧЕНИЕМ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ  
И БАКТЕРИАЛЬНО-ГУМИНОВЫХ УДОБРЕНИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ  
ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
К ГИДРОАБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ

S[401] 2022

[www.rudmet.ru](http://www.rudmet.ru)

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

Основан в 1956 году.  
Издается один раз в 2 месяца.  
Санкт-Петербург

**ОБОГАЩЕНИЕ РУД**

5[401]▶2022

Зарегистрирован Федеральной  
службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий  
и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор), ПИ № ФС77-51322  
от 19 октября 2012 г.

**УЧРЕДИТЕЛИ**

АО «Механобр инжиниринг»  
Научно-производственная корпорация  
«Механобр-техника» (АО)  
ФГАОУВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСиС»  
АО «Издательский дом  
«Руда и Металлы»  
При участии ИПКОН РАН  
и Государственного Эрмитажа

Журнал по решению ВАК Министерства  
образования и науки РФ включен  
в «Перечень ведущих рецензируемых  
научных журналов и изданий, в которых  
должны быть опубликованы основные  
научные результаты диссертации  
на соискание ученой степени доктора  
и кандидата наук» по разработке месторождений твердых полезных ископаемых

Журнал включен в Международную  
реферативную базу данных Scopus  
(2-й квартал, 2017) для научно-технических  
изданий, которая признана Министерством  
образования и науки РФ в качестве одного  
из критериев общероссийской оценки системы  
эффективности деятельности высших  
учебных заведений, а также Международную  
базу данных Chemical Abstracts Service

За сроки размещения метаданных  
опубликованных статей в базе данных Scopus  
редакция ответственности не несет

© Оформление. АО «Издательский дом  
«Руда и Металлы», «Обогащение руд», 2022.

Товарный знак и название «Обогащение руд»  
являются исключительной собственностью  
ИД «Руда и Металлы».

**Подписные индексы:**  
**10344** (ОК «Пресса России»)  
Цена свободная

**СОДЕРЖАНИЕ****ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ**

**Савичев А. Н., Красильников П. А.** Исследования по обогащению природного кварца из сырьевых источников с разным количеством флюидных включений.....3

**ОБОГАТИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**Зашихин А. В.** Разработка новых конструкций аппаратов для гравитационного обогащения.....11

**Шехирев Д. В.** Оптимизация глубины камеры и высоты зоны концентрирования противоточной флотомашин.....16

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЫРЬЯ**

**Кузин Е. Н., Мокрушин И. Г., Кручинина Н. Е.** Принципы пирометаллургической переработки кварц-лейкоксового концентрата с формированием фазы псевдобрукита. Часть 2. Фазовые превращения.....23

**ПРИРОДООХРАННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ**

**Бахарев С. А.** Повышение качества осветления производственных сточных вод акустическим методом.....29

**ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ**

**Алексеев В. С., Таганов В. В., Васюта А. Д.** Исследование миграции частиц золота в техногенных песках россыпных месторождений.....34

**Исоков М. У., Алимов Р. С., Алматов И. М., Соатов С. А.** Утилизация отходов гидроотвала угледобычи Ангреновского месторождения с получением гуминовых кислот и бактериально-гуминовых удобрений.....40

**Черкасова М. В., Куксов М. П., Самуков А. Д., Антонова В. С.** Особенности измельчения никелевых отходов в газовых средах.....46

**ОБОРУДОВАНИЕ**

**Григорьева А. Н.** Исследование стойкости перемешивающих устройств к гидроабразивному изнашиванию.....51

**КОНГРЕССЫ, КОНФЕРЕНЦИИ, СИМПОЗИУМЫ**

**Чекушина Т. В.** Международная конференция «Плаксинские чтения – 2022».....3 (обл.)

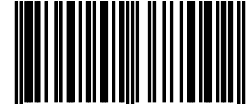
**Юбилей**

Юбилей Елены Александровны Павловой.....10

85 лет Исааку Исоровичу Максимову.....56

**Реклама**.....2–4 (обл.); 22, 50

ISSN 0202-3776



9 770202 377002 &gt;

# OBOGASHCHENIE RUD

## Mineral Processing Journal

Founded in 1956. Issued every two months

### CONTENTS

#### BENEFICIATION TECHNOLOGY

**Savichev A. N., Krasilnikov P. A.**

Studies on the processing of natural quartz from raw material sources with different amounts of fluid inclusions.....3

#### BENEFICIATION PROCESSES

**Zashikhin A. V.** Design of new gravity concentration devices.....11

**Shekhirev D. V.** Optimization of cell depth and concentration zone height in a countercurrent flotation machine.....16

#### COMPLEX RAW MATERIAL UTILIZATION

**Kuzin E. N., Mokrushin I. G., Kruchinina N. E.**

Principles of pyrometallurgical processing of quartz-leucosene concentrates with the formation of a pseudobrookite phase. Part 2. Phase transformations.....23

#### ENVIRONMENT PROTECTION TECHNOLOGY

**Bakharev S. A.** Improving the clarification quality of industrial wastewater by acoustic method.....29

#### SECONDARY RAW MATERIAL PROCESSING

**Alekseev V. S., Taganov V. V., Vasyuta A. D.**

Study on migration of gold particles in technogenic sands of placer deposits.....34

**Isokov M. U., Alimov R. S., Almatov I. M., Soatov S. A.**

Recycling of Angren coal mining tailings to obtain humic acids and bacterial-humic fertilizers.....40

**Cherkasova M. V., Kuksov M. P., Samukov A. D., Antonova V. S.** Specific features of nickel waste grinding in gaseous media.....46

#### EQUIPMENT

**Grigoryeva A. N.** Study on agitator resistance to hydroabrasive wear.....51

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

**Аксенова Г. Я.**, канд. геол.-минерал. наук,  
**Александрова Т. Н.**, член-кор. РАН,  
**Арсентьев В. А.**, д-р техн. наук  
(главный редактор),

**Бажин В. Ю.**, д-р техн. наук, доцент,  
**Баранов В. Ф.**, д-р техн. наук,  
**Блехман Л. И.**, канд. техн. наук,  
**Бричкин В. Н.**, д-р техн. наук, проф.,  
**Воробьев А. Г.**, д-р экон. наук, проф.,  
**Газалеева Г. И.**, д-р техн. наук,  
**Герасимов А. М.**, канд. техн. наук,  
**Зуев В. В.**, д-р геол.-минерал. наук,  
**Карапетян К. Г.**, д-р техн. наук, доцент,  
**Кибирев В. И.**, канд. техн. наук,  
**Котова О. Б.**, д-р геол.-минерал. наук,  
**Максимов И. И.**, д-р техн. наук, проф.  
(председатель редсовета),

**Маякова Е. А.** (зав. редакцией),  
**Михайлова Н. В.**, канд. техн. наук,  
**Петров С. В.**, канд. геол.-минерал. наук,  
**Пелевин А. Е.**, д-р техн. наук, доцент,  
**Рябой В. И.**, д-р техн. наук, проф.,

**Таранов В. А.**, канд. техн. наук,  
**Титков С. Н.**, канд. техн. наук,  
**Устинов И. Д.**, д-р хим. наук,  
(зам. главного редактора),  
**Чантурия В. А.**, академик РАН,  
**Чантурия Е. Л.**, д-р техн. наук, проф.  
(зам. главного редактора),

**Шендерович Е. М.**, канд. техн. наук,  
**Шехирев Д. В.**, канд. техн. наук,  
**Юнгмейстер Д. А.**, д-р техн. наук, проф.,  
**Юшина Т. И.**, канд. техн. наук  
(зам. председателя редсовета).

Иностранные члены редсовета:

**Вутов Ц.**, д-р, проф. (Болгария),  
**Довнорович С.**, д-р (Польша),  
**Ёнал Г.**, проф. (Турция),  
**Пилов П. И.**, д-р техн. наук, проф.  
(Украина).

Редактор *И. Н. Сапрыкина*

Адрес редакции:  
199106, Санкт-Петербург, 22 линия, 3.  
Телефон/факс: (812) 324 89 45.  
E-mail: obrud@mekhanobr.spb.ru  
Internet: <http://www.rudmet.ru>

Издатель: Издательский дом «Руда и Металлы», 119049, Москва, Ленинский пр., д. 6, стр. 2, офис 622.

*Фото на обложке — с сайта fonar.tv.*



УДК 622.7.061.4 : 620.178

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ К ГИДРОАБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ

А. Н. ГРИГОРЬЕВА (ООО «ТД «Элма-Астерион», г. Санкт-Петербург, РФ)\*

При перемешивании пульп вращающиеся элементы мешалки взаимодействуют со взвешенными абразивными частицами горной породы, что ведет к необходимости их замены из-за гидроабразивного изнашивания. Представлены результаты исследования стойкости различных материалов к гидроабразивному износу в условиях коррозионно-абразивной среды. В качестве объектов исследования были выбраны образцы, выполненные в виде прямоугольных пластин толщиной 3–4 мм. Использовались стали марки СтЗсп, 12Х18Н10Т, а также композитный материал, состоящий из стекловолокна и полимерных связующих. По результатам испытаний стойкость композитного материала намного превосходит металлические образцы. Это объясняется главным образом инертностью полимерных материалов к коррозии.

**Ключевые слова:** вращающиеся элементы мешалки, композитный материал, гидроабразивное изнашивание, перемешивающее устройство, коррозионная среда.

DOI: 10.17580/or.2022.05.09

### Введение

Перемешивающие устройства, работающие в коррозионно-активной среде, выполняют важную технологическую задачу, в том числе при переработке горнорудного сырья. Так, например, в процессе выщелачивания (сущность этого процесса состоит в том, что раствор кислоты проникает внутрь пористого носителя и растворяет целевой компонент, а растворенное вещество диффундирует вдоль пор и переходит в основную массу жидкого растворителя) от интенсивности перемешивания зависит скорость массообмена между частицами и жидкостью, а следовательно, эффективность и скорость извлечения металла. Еще одним примером применения мешалок в агрессивной среде с абразивными частицами является процесс производства экстракционной фосфорной кислоты, который заключается в разложении фосфатного сырья серной кислотой в присутствии раствора разбавления (циркулирующей фосфорной кислоты) с образованием пульпы, ее разделении и отмывке фосфорной кислоты от фосфогипса.

Одной из самых распространенных проблем эксплуатации перемешивающих устройств при взаимодействии с абразивными пульпами, где в качестве жидкой фазы выступает агрессивная жидкость, является их быстрый износ и преждевременный выход из строя [1, 2].

Традиционно перемешивающие устройства выполняются из различных марок стали, которые, как правило, подвержены сильной коррозии. Поэтому в последнее время начали использовать полимерные и

композитные материалы в виде футеровки либо цельномонолитных конструкций [3–5]. Следовательно, изучение износа материалов для изготовления мешалок является достаточно актуальной задачей.

В настоящее время на территории РФ действует государственный стандарт ГОСТ 11012-69. Пластмассы. Методы испытаний на абразивный износ. Известны также зарубежные стандарты ASTM D060, DIN 52347. Методы испытаний, описанные в данных документах, не учитывают ударные нагрузки свободно взвешенных частиц, действующие на поверхности лопаток при вращении перемешивающего устройства.

Механизм абразивного износа заключается в сухом скольжении частиц по материалу (рис. 1). Эти частицы могут разрушать как более мягкое (истираемое) тело, так и шаржироваться, т. е. насыщать поверхности материала абразивными, в основном пастообразными, материалами. В этом случае происходит интенсификация разрушения более твердого тела (контртела), входящего в пару трения.

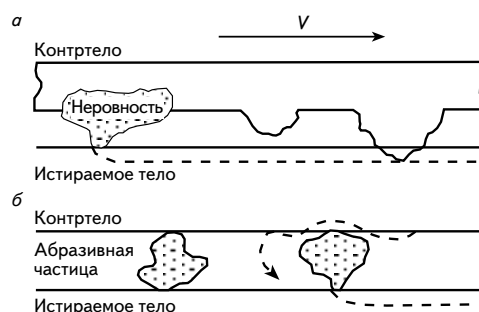


Рис. 1. Механизм изнашивания с закрепленным (а) и свободным (б) абразивом

Масса материала, удаленного с поверхности трения, рассчитывается по формуле:

$$\Delta M = \rho \times \Delta h \times A,$$

\* Григорьева Анастасия Николаевна — генеральный директор, канд. техн. наук, an@td-elma.ru.

где  $\Delta h$  — толщина изношенного слоя, м;  $A$  — номинальная площадь поверхности трения,  $m^2$ ;  $\rho$  — плотность изнашиваемого материала,  $kg/m^3$ .

Гидроабразивное же изнашивание определяется как постепенная потеря исходного материала с поверхности твердого тела за счет механического взаимодействия этой поверхности с жидкостью, в том числе при ударном действии каплями жидкости или частицами твердого тела [6].

Гидроабразивное износ твердыми частицами является самой общей формой эрозийного изнашивания, происходящей в результате циклических ударов малых твердых частиц, увлекаемых потоком газа или жидкости и ударяющих по поверхности твердого тела. Механическое действие этих частиц подобно абразивному действию и включает пластическую деформацию и хрупкое разрушение. Однако между гидроабразивным изнашиванием и изнашиванием свободным абразивом существует ряд различий. В первую очередь, это природа сил, действующих на частицу, и природа изнашивания поверхности. При абразивном изнашивании частицы скользят по поверхности под действием внешней приблизительно постоянной силы. При гидроабразивном изнашивании на частицу, взаимодействующую с поверхностью тела, могут действовать несколько сил различной природы (рис. 2). Сущность гидроабразивного износа заключается в многократном соударении и трении свободно взвешенных абразивных частиц горной породы на поверхности рабочих частей перемешивающего устройства [7, 8].

Основная сила, с которой частица действует на поверхность, связана с ее ускорением. Кроме того, интенсивность абразивного изнашивания зависит от нормальной нагрузки и пути трения, а гидроабразивного определяется количеством и массой отдельных частиц, сталкивающихся с поверхностью, и скоростью их удара.

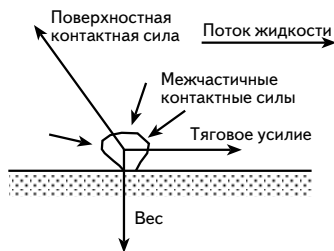


Рис. 2. Действие сил на частицу, движущуюся в потоке жидкости и контактирующую с твердой поверхностью

Угол атаки  $\theta$ , определяемый относительно плоскости поверхности, как показано на рис. 3, различным образом влияет на интенсивность гидроабразивного изнашивания пластичных и хрупких материалов [9]. Основное различие заключается в его значении, при котором интенсивность гидроабразивного изнашивания максимальна. Для пластичных материалов оно приближается к 20–30°, а для хрупких, типа стек-

ла и керамики, составляет 90°. Для некоторых твердых и ударновязких легированных сталей значительная степень гидроабразивного изнашивания (от 1/3 до 1/2 от максимальной) происходит также при нормальном падении частиц.

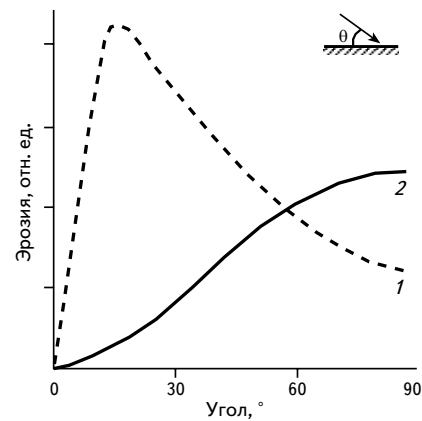


Рис. 3. Характерная зависимость интенсивности эрозии пластичного (1) и хрупкого (2) материалов от угла  $\theta$

На интенсивность гидроабразивного изнашивания влияет целый ряд характеристик частиц, например, их форма, размеры, твердость. В этом отношении у гидроабразивного изнашивания много общего с абразивным действием, включая размерный эффект. Существует определенный размер гидроабразивных частиц, больше которого они оказывают малый эффект на интенсивность гидроабразивного изнашивания пластичных материалов или не оказывают вообще.

Кроме того, при работе в агрессивной среде материал оборудования подвержен коррозии. Стойкость к ней металлов определяется многими факторами, связанными с самим металлом (его природой, составом сплавов, их структурой, состоянием поверхности), а также с раствором (его составом, концентрацией твердых включений, температурой). Самый распространенный вид коррозии — питтинг, наиболее опасными активаторами которого являются твердые включения в жидкости. Облегчение зародышеобразования питтингов включениями вызвано ухудшением защитных свойств пассивирующей пленки, образующейся в местах их выхода на поверхность металла, и появлением микротрещин на границе металл / твердое включение.



Рис. 4. Образцы, испытываемые на гидроабразивной коррозионно-активной среде: а — сталь конструкционная углеродистая, б — нержавеющая сталь, в — композитный материал



Цель данной работы – исследование стойкости материалов, применяемых при изготовлении перемешивающих устройств, к гидроабразивному и коррозионному износу при работе в агрессивной среде.

*Материалы и методы исследования*

Лабораторные испытания при исследовании абразивной стойкости материалов являются неотъемлемой частью общего комплекса мероприятий по подбору их наиболее эффективных составов с учетом условий эксплуатации [10]. В качестве объектов исследования были выбраны образцы следующих материалов, выполненные в виде прямоугольных пластин толщиной 3–4 мм: сталь марки СтЗсп; нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т; композитный материал на основе стеклоткани и полиэфирной смолы (рис. 4, табл. 1).

Таблица 1

**Основные свойства испытываемых материалов**

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Твердость	Средняя масса образца до испытаний, г	Размеры образца, мм
СтЗсп	7850	101–156 НВ	97,19906	49×49×4
12Х18Н10Т	7920	131–197 НВ	79,70936	59×59×3
Композит	2000	88,4 НSD	19,58014	58×58×4

Композит – анизотропный материал, физико-химические свойства которого создаются в процессе его производства, твердость композитной пластины измерялась с применением твердомера NOVOTEST ТШ-А согласно ГОСТ 24621-2015, твердость металлов принята в соответствии с [11].

Испытания проводились на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 5, со следующими параметрами: гидроабразивная среда – суспензия ортофосфорной кислоты с песком (массовая доля твердых включений – 60 %); размеры частиц – 0–0,63 мм; частота вращения мешалки – 300 мин<sup>-1</sup>; угол поворота пластины по отношению к набегающему потоку жидкости – 90° (для всех материалов); время воздействия агрессивной среды – 24 ч.

В исследованиях [12] установлено, что рост интенсивности износа в зависимости от содержания твердых включений по линейному закону наблюдается до их массовой доли 4–6 %, а при значениях более 10–12 % содержание включений не оказывает влияния на износ. Таким образом, была выбрана максимальная массовая доля твердого – 60 %.

Для оценки степени износа проводилось измерение потери массы пластин. Каждый эксперимент включал тестирование 5 образцов, перед взвешиванием пластины подвергались высушиванию в печи и кондиционированию, как опи-

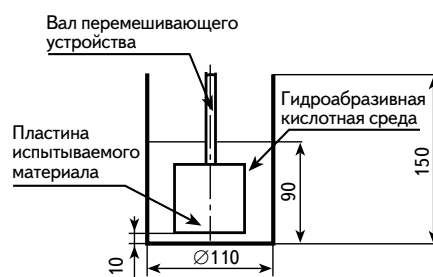


Рис. 5. Схема лабораторного испытательного стенда

сано в требованиях ГОСТ 11012-2017. Очевидно, что композитный материал является устойчивым к воздействию абразивной среды, поэтому был произведен дополнительный эксперимент с поворотом пластины под 45°, чтобы оценить влияние этого фактора на воздействие гидроабразивного истирания.

Степень абразивного износа образцов оценивалась по изменению их массы после испытаний. Изменение массы до и после экспериментов производилось на аналитических весах.

После каждого испытания перед повторным взвешиванием образец высушивался при 80 °С в течении 1 ч, затем термостатировался при комнатной температуре в течении 30 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 11012-2017.

*Результаты и их обсуждение*

Результаты экспериментов по определению стойкости исследуемых материалов к гидроабразивному износу приведены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2

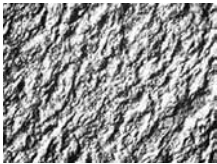
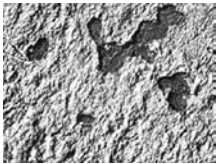
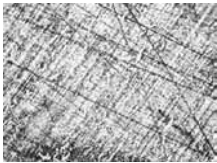
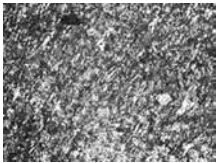


**Результаты испытаний образцов на стойкость к гидроабразивному износу**

Материал	Масса до испытаний, г		Масса после испытаний, г		Потеря массы в	
	Каждого образца	Средняя	Каждого образца	Средняя	г/ч	%
СтЗсп	97,1992	97,19906	96,8868	96,88678	0,31228	0,32
	97,1990		96,8869			
	97,1991		96,8866			
	97,1991		96,8867			
	97,1989		96,8869			
12Х18Н10Т	79,7094	79,70936	79,5447	79,54472	0,16464	0,21
	79,7092		79,5448			
	79,7093		79,5448			
	79,7094		79,5446			
	79,7095		79,5447			
Композит (θ = 90°)	19,5802	19,58014	19,5613	19,56132	0,01882	0,096
	19,5801		19,5614			
	19,5801		19,5612			
	19,5800		19,5613			
	19,5803		19,5614			
Композит (θ = 45°)	19,2	19,208	19,19	19,194	0,014	0,073
	19,21		19,19			
	19,21		19,2			
	19,21		19,2			
	19,21		19,19			

При визуальном сравнении поверхностей с помощью микроскопа до и после испытаний (табл. 3) хорошо видна питтинговая коррозия поверхности пластины из стали Ст3сп. Поверхность образца из стали 12Х18Н10Т стала более темной и покрылась большим числом царапин. Внешние изменения композитной пластины видны только на глянцевой стороне, где просто возросло число мелких царапин. Следовательно, при работе перемешивающих устройств в процессах перемешивания пульпы главенствующую роль при износе мешалок играет именно коррозионный износ.

Таблица 3

Микроструктура поверхности пластин до и после испытаний

Материал	До испытаний	После экспериментов
Ст3сп		
12Х18Н10Т		
Композит		

Уменьшение угла атаки набегающей суспензии для пластины из композитного материала позволило снизить степень его износа на 34 %. Это объясняется уменьшением номинальной площади износа поверхности  $A$ : согласно приведенной выше формуле, при  $\theta = 45^\circ$  площадь износа будет составлять лишь  $\cos \theta = 71 \%$  от площади износа при  $\theta = 90^\circ$ . Т. е. согласно расчету потеря массы должна снизиться на

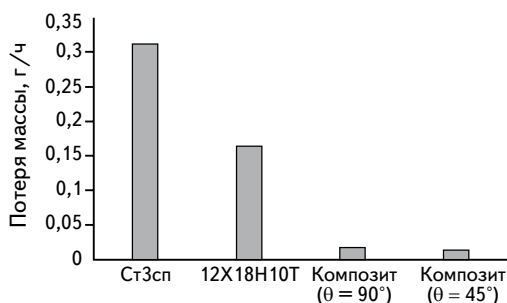


Рис. 6. Гистограмма потери массы в ходе испытаний для каждого материала

29 %, что хорошо согласуется с результатами экспериментов.

Проведенные лабораторные исследования подтверждаются практическим применением перемешивающих устройств. На рис. 7 показан износ лопасти, изготовленной из нержавеющей стали, на которой отчетливо видна питтинговая коррозия, а также потеря металла вследствие его растворения в агрессивной среде. Причем износ наблюдается на задней кромке лопасти, где существуют крупномасштабные срывы вихрей (так называемые вихревые дорожки Кармана).



Рис. 7. Износ перемешивающего устройства при работе в суспензии

Выводы

Применение композитных материалов при производстве перемешивающих устройств является перспективным направлением, способствующим снижению износа лопастей и увеличению срока службы. Распространенная на сегодняшний момент технология футеровки металлических мешалок полимерными материалами показала возникновение проблем с адгезией слоя полимера. Дело в том, что коэффициент температурного расширения у металла и полимера различный и при изменении температуры футеровка отслаивается от поверхности. Использование цельномонолитной конструкции из композитного материала, позволяющего создавать достаточно прочные конструкции, выгодно отличается от послойной защиты металла полимерами.

На основании проведенных исследований можно заключить, что изготовление перемешивающего устройства из композитного материала может увеличить срок службы мешалки в 2,2 раза по сравнению с нержавеющей сталью и в 3,3 раза по сравнению с материалом Ст3.

Создание обтекаемых форм перемешивающих устройств является не только залогом энергоэффективности, но и влечет за собой снижение абразивного воздействия твердых включений суспензий. Снижение угла атаки пластины позволило снизить гидроабразивный износ на 34 %.

## Список литературы

1. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Sarzhanov B. Assessment of hydroabrasive wear resistance of construction materials with functional coatings, which are formed by resource-saving and environmentally friendly technologies // *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. P. 265–277.

2. Orlik A. G., Orlik G. V., Kobernik N. V., Mikheev R. S. Arc deposition of abrasion wear-resisting coatings on the working surfaces of conveyor screws // *Welding International*. 2017. Vol. 31, No. 13. P. 945–950.

3. Красный В. А., Максаров В. В., Ольт Ю. Применение полимерных композитных материалов в узлах трения скважинных нефтяных насосов // *Записки Горного института*. 2015. Т. 211. С. 71–79.

4. Морозов В. И., Гончаров А. Б., Тулинов А. Б. Прогрессивные технологии восстановления деталей горного и обогащательного оборудования // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006. № 6. С. 340–342.

5. Antoev K. P., Zarovnyaev B. N., Kristoforova A. A. An apparatus that analyzes the hydroabrasive wear of fiberglass pipes // *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 38, Iss. 3. P. 208–210.

6. Shtertser A. A., Grinberg B. E. Impact of a hydroabrasive jet on material: Hydroabrasive wear // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2013. Vol. 54, Iss. 3. P. 508–516.


7. Антоев К. П., Попов С. Н. Исследование стойкости к гидроабразивному износу стеклопластиковых труб с полиуретановым покрытием // *Наука и образование*. 2017. № 1. С. 87–90.

8. Сейтханов А. М., Газтуганова Г. А., Поветкин В. В. Методы совершенствования конструкции деталей грунтового насоса // *Научные труды Южно-Казахстанского государственного университета им. М. Ауэзова*. 2019. № 4. С. 24–32.

9. Wesling V., Reiter R., Müller T. Hydroabrasive wear on high carbide infiltration materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 480, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/480/1/012030.

10. Михальченков А. М., Лялякин В. П., Михальченкова М. А. Методология проведения ускоренных сравнительных испытаний на абразивное изнашивание материалов с различным составом, строением и свойствами // *Труды ГОСНИТИ*. 2014. Т. 116. С. 91–96.

11. Драгунов Ю. Г., Зубченко А. С., Каширский Ю. В., Дегтярев А. Ф., Жаров В. В., Колосков М. М., Орлов А. С., Скоробогатых В. Н. *Марочник сталей и сплавов*. 7-е изд. М.: Машиностроение, 2021. 1216 с.

12. Скребнев В. И., Сержан С. Л., Калугина Е. В. Исследование стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб. Оценка основных параметров, влияющих на интенсивность износа гидротранспортных систем // *Пластические массы*. 2020. № 9–10. С. 40–44. 

OBOGASHCHENIE RUD, 2022, No.5, pp. 51–56.  
DOI: 10.17580/or.2022.05.09

## Study on agitator resistance to hydroabrasive wear

## Information about author

**Grigoryeva A. N.**<sup>1</sup>, General Director, Candidate of Engineering Sciences, an@td-elma.ru.

<sup>1</sup> LLC «Trade House «Elma-Asterion» (Saint Petersburg, Russia).

## Abstract

Resistance of structural materials used in the mining industry to hydroabrasive wear is one of the key factors for the durability of many mechanisms, especially agitators. When mixing concentrated slurries, rotating agitator elements interact with suspended abrasive particles of the rock. Inadequate selection of structural materials for these elements causes frequent replacements due to hydroabrasive wear and related process shutdowns. Hydroabrasive wear by solid particles occurs as a result of cyclic impacts of fine solid particles entrained in a gas or liquid flow and striking the surface of a solid body. The mechanical action of these particles is similar to abrasion and includes plastic deformation and brittle fracture. In addition to hydroabrasive wear, exposure to chemicals leads to corrosive wear. Material resistance to corrosion depends on many factors related to both the material and the corrosive solution. This paper presents the results of a study of resistance of various materials to hydroabrasive wear in a corrosive and abrasive environment. Samples made in the form of 3–4 mm thick rectangular plates were selected for the study. St3sp and 12Kh18N10T grade steels were used, as well as a composite material consisting of glass fiber and polymer binders. The test results show that resistance of the composite material is much superior to that of metal samples. This is mainly due to the inertness of polymeric materials to corrosion.

**Key words:** rotating agitator elements, composite material, hydroabrasive wear, agitator, corrosive environment.

## References

1. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Sarzhanov B. Assessment of hydroabrasive wear resistance of construction materials with functional coatings, which are

formed by resource-saving and environmentally friendly technologies. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. pp. 265–277.

2. Orlik A. G., Orlik G. V., Kobernik N. V., Mikheev R. S. Arc deposition of abrasion wear-resisting coatings on the working surfaces of conveyor screws. *Welding International*. 2017. Vol. 31, No. 13. pp. 945–950.

3. Krasnyi V. A., Maksarov V. V., Olt Yu. The use of polymer composite materials in the friction nodes downhole oil pumps. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2015. Vol. 211. pp. 71–79.

4. Morozov V. I., Goncharov A. B., Tulinov A. B. Progressive technologies for the restoration of mining and processing equipment parts. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten'*. 2006. No. 6. pp. 340–342.

5. Antoev K. P., Zarovnyaev B. N., Kristoforova A. A. An apparatus that analyzes the hydroabrasive wear of fiberglass pipes. *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 38, Iss. 3. pp. 208–210.

6. Shtertser A. A., Grinberg B. E. Impact of a hydroabrasive jet on material: Hydroabrasive wear. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2013. Vol. 54, Iss. 3. pp. 508–516.

7. Antoev K. P., Popov S. N. Study of resistance to hydroabrasive wear of GRP pipes with a polyurethane coating. *Nauka i Obrazovanie*. 2017. No. 1. pp. 87–90.

8. Seitkhanov A. M., Kaztuganova G. A., Povetkin V. V. Methods of improving the design of ground pump parts. *Nauchnye Trudy Yuzhno-Kazakhstanskogo Gosudarstvennogo Universiteta im. M. Auezova*. 2019. No. 4. pp. 24–32.

9. Wesling V., Reiter R., Müller T. Hydroabrasive wear on high carbide infiltration materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 480, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/480/1/012030.

10. Mikhailchenkov A. M., Lyalyakin V. P., Mikhailchenkova M. A. Methodology of accelerated comparative tests for abrasive wear of materials with different composition,



structure and properties. *Trudy GOSNITI*. 2014. Vol. 116. pp. 91–96.

11. Dragunov Yu. G., Zubchenko A. S., Kashirsky Yu. V., Degtyarev A. F., et al. Steel and alloy grade guide. 7th ed. Moscow: Mashinostroyeniye, 2021. 1216 p.

12. Skrebnev V. I., Serzhan S. L., Kalugina E. V. Research of resistance to water-jet wear of plastic and steel pipes. Assessment of the main parameters that affect the wear rate of hydraulic transport systems. *Plasticheskie Massy*. 2020. No. 9–10. pp. 40–44.



## 85 ЛЕТ ИСААКУ ИСОРОВИЧУ МАКСИМОВУ

*21 октября 2022 г. исполнилось 85 лет известному специалисту в области флотационного обогащения, доктору технических наук, профессору, директору по научной работе АО «Механобр инжиниринг» Исааку Исоровичу Максимову.*

Исаак Исорович учился в Ленинградском горном институте (сейчас — Санкт-Петербургский горный университет), специализировался на кафедре обогащения полезных ископаемых. В 1960 г. он поступил на работу в институт «Механобр», в отдел исследований флотационного процесса, где прошел путь от младшего научного сотрудника до директора по научной работе.

Уже на этапе написания кандидатской диссертации И. И. Максимов занимался развитием фундаментальных основ кинетики флотационного процесса, что позволило усовершенствовать методики расчета технологических схем промышленной флотации и одновременно разработать уникальные приборы, нашедшие применение во многих лабораториях, занимающихся технологиями обогащения полезных ископаемых. В дальнейшем эти исследования были представлены в монографии «Теория и технология флотации руд» и во втором томе обстоятельного «Справочника по обогащению руд», соавтором которых он является.

За годы работы в «Механобре» Исаак Исорович принимал участие и возглавлял проведение множества научно-исследовательских работ, испытаний и внедрений на промышленных площадках десятков обогатительных фабрик, перерабатывающих руды цветных и редких металлов. Только за последние годы на базе исследовательских работ, выполненных под его руководством, спроектированы, построены и успешно пущены в эксплуатацию крупнейшие в мире передовые фабрики для обогащения медных и медно-молибденовых руд.

Уникальные исследования и разработки И. И. Максимова в области новых технологий флотации руд редких и редкоземельных металлов послужили основой его докторской диссертации и были отмечены Государственной премией СССР в области науки и техники. Он разработал и внедрил эффективные конструкции колонных флотационных машин. Исаак Исорович является автором нескольких сотен статей, авторских свидетельств и патентов, активным участником престижных международных конгрессов и конференций по обогащению полезных ископаемых.

И. И. Максимов ведет большую научно-просветительскую работу, является энергичным и взыскательным председателем редакционного совета научно-технического журнала «Обогащение руд», который непредвзято, в высшей степени профессионально и объективно рассматривает и оценивает публикуемые материалы, следуя высоким научным принципам.

*Многочисленные коллеги и соратники Исаака Исоровича Максимова, члены возглавляемого им редакционного совета журнала «Обогащение руд» поздравляют юбиляра со столь знаменательной датой и искренне желают ему творческого долголетия.*