

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
Киевский технологический институт пищевой промышленности

На правах рукописи

СОЛОГУБ НИКОЛАЙ АВРАМОВИЧ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
САХАРНЫХ ЗАВОДОВ

Специальность 05.02.14 -
Машины и агрегаты пищевой промышленности

Диссертация
в форме научного доклада
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев - 1993 г.

Работа выполнена в Киевском технологическом институте
пищевой промышленности

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

И. М. Федоткин

доктор технических наук, профессор

Г. П. Тищенко

доктор технических наук, профессор

И. Г. Носовский

Ведущая организация – НПО "Спектр"

Защита диссертации состоится "24. 02 1993 г.
в 14 часов на заседании Специализированного совета
Д.068.17.04 Киевского технологического института пищевой
промышленности по адресу: 252017, г. Киев, ул. Владимирская, 68,
аудитория А-311.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского
технологического института пищевой промышленности

Диссертация разослана "21. 07 1993 г.

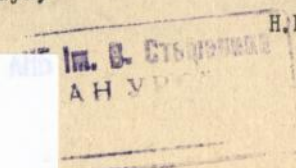
Ученый секретарь
Специализированного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Н. И. Сороколит

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00825726 (U)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В решении продовольственной проблемы важное значение имеет увеличение мощности и повышение производительности пищевых предприятий. Одним из путей решения этой задачи является создание новых высокоэффективных машин и аппаратов, автоматизированных систем, обеспечивающих бесперебойную и ритмичную их работу. Последнее в значительной степени может быть достигнуто повышением надежности и долговечности деталей этого оборудования.

Сахарная промышленность является одной из самых индустриальных отраслей, оснащенных весьма разнообразным и довольно сложным оборудованием. В общей проблеме повышения его надежности и долговечности определяющая роль принадлежит повышению износостойкости трущихся деталей технологического оборудования и деталей, подверженных воздействию потока жидкости.

Об актуальности и сложности этой проблемы свидетельствует то, что на ремонт и замену изношенных деталей оборудования в системе Минпищепрома Украины за 10 лет расходовались средств, равных полной стоимости производственных фондов, а ежегодные затраты на эти цели составляли около 300 млн. рублей. Потери от суточного простоя одного сахарного завода средней мощности достигали в прошлые годы 20 тыс. рублей.

Надежность работы оборудования в пищевой промышленности имеет особое значение, т.к. его отказ или выход из строя ведет не только к снижению производительности предприятия, но часто и к его полной остановке, а также к большим потерям из-за порчи сырья и полупродуктов.

Поэтому сахарная промышленность нуждается в научно обоснованных методиках определения износостойкости конструкционных материалов и защитных покрытий, расчета и прогнозирования их долговечности, обоснованных рекомендаций по их выбору для изготовления деталей технологического оборудования, работающих в средах со специфическими физико-механическими свойствами. Эти задачи должны решаться на основе теоретических и экспериментальных исследований трения и изнашивания материалов применительно к условиям работы этих деталей.

Наиболее характерными для трущихся деталей технологического оборудования сахарных заводов является коррозивно-механическое изнашивание (КМИ) и для деталей, находящихся под микро-

ударным воздействием потока жидкости - гидроэрозионное (ГЭИ).

Разработке мероприятий по повышению долговечности упомянутых деталей и посвящена эта работа. Выполнилась она в соответствии с Планом научно-исследовательских разработок КТИП по направлению "Повышение надежности и долговечности оборудования пищевой промышленности" и связана с решением задач, определенных Постановлениями ГКНТ СССР № 417 от 21.08.75 г. "О развитии научных исследований и технических разработок в области трения и износа, обеспечивающих повышение износостойкости машин и оборудования" и № 321 от 15.07.80 г. "О проведении дополнительных научно-исследовательских работ в области разработки и внедрения новых материалов и покрытий, увеличивающих срок службы оборудования для пищевой, мясной и легкой промышленности".

Целью работы является развитие системных механико-физико-химических представлений об изнашивании материалов в коррозионно-активных жидких средах, теоретическое и экспериментальное обобщение результатов исследований и на этой основе комплексное решение проблемы прогнозирования и оптимизации процессов трения и изнашивания, повышения долговечности деталей технологического оборудования сахарного производства.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

- разработка методики комплексного исследования износостойкости материалов и деталей в коррозионно-активных жидких средах с учетом особенностей технологических сред сахарного производства;
- теоретическое и экспериментальное исследование механизма изнашивания и разрушения поверхностных слоев материалов и оценка их износостойкости при трении и микрсударном воздействии технологических сред сахарного производства;
- исследование роли коррозионного и механического воздействия технологических сред сахарного производства, а также их химического и агрегатного состава в процессах КМ- и ГЭ-изнашивания материалов;
- получение теоретических и экспериментальных данных, необходимых для разработки методики прогнозирования износостойкости и долговечности деталей технологического оборудования;
- разработка рекомендаций по повышению долговечности деталей технологического оборудования сахарных заводов путем обоснованного выбора конструкционных материалов, защитных пок-

рытий, видов и оптимальных режимов упрочняющей обработки.

Методы исследований. Для решения поставленных задач применялись теоретические и экспериментальные методики и средства исследования, позволяющие дифференцировать комплекс явлений, протекающих при КМИ и ГЭИ конструкционных материалов в жидких рабочих средах.

Аналитическое исследование процессов разрушения при КМИ проводилось на основе положений, разработанных П.А.Ребиндером, И.В.Крагельским, Б.И.Костецким, А.А.Ахматовым, Г.А.Прейсом и др., при ГЭИ - на основе структурно-энергетических теорий изнашивания и усталости, развиваемых В.С.Ивановой, А.И.Некозом, Л.И.Погодаевым, положений кинетической теории прочности С.Н.Муркова, а также на экспериментальном материале, раскрывающем закономерности и механизм разрушения, полученном И.Н.Богачевым, С.П.Козыревым, И.Р.Кряниным и др.

Экспериментальные исследования основывались на принципах комплексного, системного метода и включали:

- изучение условий работы деталей технологического оборудования и видов их изнашивания;
- экспериментальное изучение процессов изнашивания материалов на специально сконструированных лабораторных установках и стендах в модельных растворах и технологических средах сахарного производства;
- исследование характера деформирования и разрушения поверхностных слоев образцов и деталей с использованием металлографического, рентгеноструктурного, ферромагнитного (ФМР), электрохимического и других методов анализа;
- изучение возможности управления характером деформирования и разрушения рабочих поверхностей образцов материалов и деталей различными видами упрочняющей обработки с целью повышения их износостойкости;
- проверку результатов исследований в производственных условиях.

При выполнении работы широко применялось планирование экспериментов, аналитическое исследование изучаемых процессов, а также обработка статистических данных на ЭВМ.

Научная новизна работы:

- на основе положений физико-химической механики материалов исследовано влияние коррозионно-активных растворов, технологических сред сахарного производства и их компонентов (сахарозы, несхаров, ПАВ, абразива и др.) на процессы изнашивания и разрушения рабочих поверхностей испытываемых объектов;
- установлена взаимосвязь между фазовым составом, структурой упрочненного слоя и долговечностью деталей оборудования в технологических средах сахарного производства;
- установлен и рассмотрен с позиций дислокационной теории прочности циклический характер упрочнения-разупрочнения при гидроэрозионном разрушении в КАС;
- предложена модель коррозионно-механического разрушения при ГЭИ, установлено соотношение интенсивностей коррозионного и механического факторов ГЭИ, обуславливающие разработку аналитических методов исследования и расчета долговечности деталей;
- получены уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать долговечность ряда материалов и покрытий при работе в технологических средах сахарного производства;
- установлено явление наводороживания металлов в технологических средах сахарного производства (в частности, в диффузионном соке), предложено использование этого явления для интенсификации процессов химико-термической обработки стальных и чугунных деталей.

Новизна ряда выполненных разработок подтверждена авторскими свидетельствами на изобретения.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

- разработана комплексная методика исследования процессов трения и изнашивания материалов в КАС и технологических средах сахарного производства;
- разработаны основные принципы ускоренных методов определения износостойкости материалов при ГЭИ;
- разработан новый способ получения термодиффузионных покрытий; определены оптимальные режимы термодиффузионного хромирования по этому способу;
- предложен способ азстирвания стальных и чугунных деталей, значительно повышающий их долговечность в средах сахарного производства;
- разработаны рекомендации по выбору материалов и упроч-

нящей обработки деталей технологического оборудования с целью повышения их долговечности;

- предложена новая конструкция сальникового уплотнения.

Основные результаты работы апробированы и использованы на Григоровском, Мироновском, Гниванском, Хмельницком и других сахарных заводах, а также на заводе "Лапы" в Польской Республике. На Кировоградском заводе "Сахгидромаш" внедрены взамен чугунных рабочие колеса центробежных насосов из алюминиевых сплавов для перекачивания кислых технологических сред сахарного производства; соответствующее изменение Постановлением Госстандарта СССР № 5117 от 22.10.80 г. внесено в ГОСТ 10272-77 "Насосы центробежные двухстороннего входа. Технические условия". Разработанные методики оценки ГЭ-стойкости металлов и защитных покрытий использованы Киевским НПО "Пищемаш". На ряде предприятий внедрены рабочие колеса насосов из сплава I30X16M, а также детали с термодиффузионными защитными покрытиями и упрочненные ионным азотированием.

Экономический эффект от внедрения результатов работы составил около 600 тыс. рублей в ценах до 1985 г.

Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке мероприятий по повышению долговечности оборудования в других отраслях пищевой промышленности, технологические среды которых близки по свойствам к средам сахарного производства (кондитерская, хлебопекарная, молочная промышленность).

Полученные результаты составили также основу учебной дисциплины "Надежность и долговечность оборудования пищевой промышленности", изучаемой в КТИИП и других вузах.

Основные положения, защищаемые автором :

- результаты аналитических и экспериментальных исследований КМ- и ГЭ-изнашивания материалов и деталей оборудования в технологических средах сахарного производства;

- положение о специфическом влиянии технологических сред сахарного производства на процессы КМ- и ГЭ-изнашивания деталей: об определяющем значении их коррозионной активности, о двойственном характере влияния сахарозы и существенном влиянии несахаров и добавок (в частности, формалина, углекислого газа), абразивных примесей;

- установление соотношения интенсивностей коррозионного и

механического факторов при ГЭ-изнашивании и разработка на его основе способа ускоренных испытаний металлов;

- разработанные на основе потенциостатического метода исследования схемы определения стойкости металлов и защитных покрытий при трении и гидрозрозии и расчета их долговечности в технологических средах сахарного производства;

- научно-обоснованные рекомендации по выбору износостойких материалов для изготовления трущихся деталей технологического оборудования и центробежных насосов сахарных заводов и технологию их упрочняющей обработки с помощью усовершенствованных способов термодиффузионных покрытий и ионного азотирования.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных, всесоюзных, республиканских конференциях, научных семинарах: IV Киевской научно-технической конференции по вопросам повышения износостойкости и срока службы машин.-Машин.-Киев, 1966; Всесоюзной конференции "Повышение износостойкости и срока службы оборудования пищевой промышленности".-Киев, 1968; Республиканском семинаре "Абразивный износ и повышение износостойкости деталей путем наплавки и напыления".-Киев, 1970; Республиканской конференции "Повышение износостойкости и срока службы машин".-Киев, 1970; Научно-технической конференции "Современные методы наплавки и износостойкие наплавочные материалы".- Харьков, 1970; V Всесоюзной конференции по физико-химической механике.- Уфа, 1971; Всесоюзном научно-координационном совещании по абразивному изнашиванию.- Москва, 1971; Всесоюзной конференции "Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия".- Киев, 1973; VI Всесоюзной конференции "Разработка и применение технологических смазок".- Киев, 1973; VII Всесоюзной конференции по физико-химической механике конструкционных материалов.- Львов, 1974; Всесоюзной конференции "Износ материалов при ударном воздействии твердых частиц".- Москва, 1976; VIII Республиканской конференции "Повышение износостойкости и срока службы машин".- Киев, 1977; Всесоюзной конференции "Повышение эффективности использования автотранспорта".- Ташкент, 1982; Уральской конференции "Пути повышения надежности машин".- Свердловск, 1983; III Республиканской конференции "Новые коррозионностойкие металлические сплавы".- Киев, 1983; Международном симпозиуме "Прочность материалов при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения".- Киев, 1984 ;

II Краевой конференции по коррозии.- ПНР, Краков, 1987; УШ Краевой конференции.- ПНР, Белосток, 1988; Республиканских научно-технических конференциях "Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК".- Киев, 1989, 1991; а также ежегодных научных конференциях и научных семинарах КТИП с 1960 по 1992 гг.

Публикации. По теме работы опубликовано 3 монографии, 115 статей и докладов, получено 7 авторских свидетельств на изобретения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Повышение эффективности и надежности машин и технологического оборудования различных отраслей промышленности возможно на базе фундаментальных и прикладных исследований комплексных проблем машиностроения. Одной из таких проблем является повышение надежности и износостойкости деталей и узлов технических устройств, так как изнашивание является главной причиной нарушения их функциональных свойств.

Особенностью работы деталей оборудования сахарных заводов является то, что большинство из них контактирует с технологическими рабочими средами: сырьем, полуфабрикатами, отходами производства со специфическими физико-химическими свойствами.

В работах П.А.Ребиндера, М.М.Хрущева, И.В.Васильева, Е.В.Лялина и других исследователей было показано, что развитие процессов трения и изнашивания конструкционных материалов в жидких коррозионно-активных средах во многом определяется не только химической реакцией среды, но и ее природой, содержанием растворимых примесей, наличием ПАВ и абразива, коррозионной стойкостью и механическими свойствами самих металлов. При этом наибольшее значение имеет определяющее звено в поведении пар трения - взаимодействие активных элементов рабочей среды с материалом зоны контактного взаимодействия в условиях деформации.

Технологические среды сахарного производства представляют собой водные растворы, отличающиеся в широких пределах реакцией (рН 2...14), температурой, вязкостью, плотностью, со-

держанием различных растворимых компонентов, прежде всего - сахарозы (15...65 %) и несахаров (органических кислот, ПАВ и др.), абразивных примесей.

Поэтому исследование процессов трения и изнашивания материалов в технологических средах сахарного производства представляет не только практический, но и большой научный интерес.

Такие исследования были начаты в 60-х годах автором этой работы в Киевском технологическом институте пищевой промышленности. За это время в институте сформировалось научное направление - износостойкость и долговечность деталей оборудования пищевой промышленности, получившее известность далеко за пределами Украины.

Как отмечалось выше, детали технологического оборудования сахарных заводов подвержены в основном коррозионно-механическому и гидроэрозионному изнашиванию. Разновидностями последнего могут быть: кавитационно-эрозионное (КЭИ) и гидроабразивное (ГАИ). При наличии абразива в рабочей среде ведущим у трущихся деталей в ряде случаев становится также абразивное изнашивание, а сопутствующим - коррозионно-механическое [9, 10, 13].

Настоящая работа является результатом многолетних исследований процессов трения и изнашивания материалов и деталей оборудования в технологических средах сахарного производства, разработки методики прогнозирования и способов повышения их долговечности, выполненных лично автором, а также при непосредственном его участии и руководстве работой аспирантов (А.И.Некоз, Ю.Л.Смертяк, А.И.Портер, А.И.Слынько, М.С.Стечишин, А.Е.Рудык, Э.Кондрат (Польша), за активное сотрудничество с которыми он выражает свою искреннюю признательность.

I. КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИЗНАШИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ И ДЕТАЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ САХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

I.1. Методика исследований

Исходя из представлений о механизме КМ-изнашивания, была поставлена задача дифференцировать комплекс явлений, возникающих при трении металлов в КАС и изучить их зависимость от структуры и состояния как самих металлов, так и состава и свойств рабочей среды, а также условия работы сопряженных пар, а именно:

- количественные механические и электрохимические параметры процессов;
- свойства поверхностных пленок вторичных структур;
- характер деформирования и разрушения поверхностного слоя при трении;
- влияние сахарозы, несахаров и других примесей в технологических средах сахарного производства на процессы трения и изнашивания металлов;
- возможности управления характером деформирования и разрушения рабочих поверхностей при трении с целью повышения их износостойкости.

С этой целью было разработано ряд оригинальных установок торцового трения [19, 69, 110], одна из которых приведена на рис. 1, установка [70] и стенд [22] для испытания металлов в паре трения с мягкой сальниковой набивкой, установка для определения момента схватывания металлов [40], микротрибометр для исследования характера деформирования поверхностного слоя металлов и электрохимических явлений при трении [78], прибор для определения износа методом отпечатков [34].

1.2. КМ-изнашивание металлов в коррозионно-активных средах

1.2.1. Количественно процессы трения и изнашивания оценивали по потере массы испытуемых объектов, объемному или линейному износу, по величине силы (коэффициента) трения.

О состоянии фрикционного контакта судили по величине и изменению контактного электросопротивления (R_K), о кинетике электрохимических процессов судили по изменению электрохимического потенциала образцов, по характеру изменения анодных и катодных поляризационных кривых, получаемых потенциостатическим методом. Для изучения контактных, термоэлектрических и других эффектов измеряли э.д.с., токи трения, контактную разность потенциалов (КЭП).

Анализ полученных данных об относительной износостойкости наиболее применяемых в сахарной промышленности металлов в модельных КАС и технологических средах в зависимости от режимов трения и свойств контртела показал сложную зависимость между интенсивностью изнашивания, силой трения, электрохимическими и физическими параметрами [65, 72].

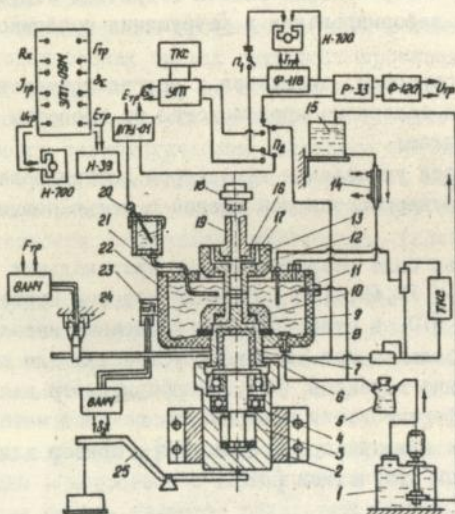


Рис. 1. Схема испытательной установки:

1 - накопитель; 2 - направляющая; 3 - корпус; 4 - ось; 5 - отстойник; 6 - промежуточная втулка; 7 - изолирующая втулка; 8 - штуцер; 9 - текстолитовая гайка; 10 - неподвижный образец; 11 - вспомогательный платиновый электрод; 12 - вращающийся образец; 13 - текстолитовая гайка; 14 - теплообменник; 15 - напорный бак; 16 - изолирующая втулка; 17 - переходная втулка; 18 - ртутный токосъемник; 19 - вал шпинделя; 20 - электрокюч и электрод сравнения; ЭВЛ-1М1; 21 - крышка; 22 - камера; 23 - индуктивный датчик; 24 - тензобалка; 25 - рычаг; 8АНЧ-4М - тензоусилитель; ЭПМ-09М - электронный погенциометр; Н-700 - шлейфовый осциллограф; ЛПУ-01 - высокоомный милливольтметр; УПТ - усилитель постоянного тока; ТНС - стабилизатор напряжения; ФП16 - фотокомпенсационный милливольт-наноамперметр; Ф120 - фотоэлектрический усилитель

О характере протекающих при трении процессов может также служить величина КРП. Например, в паре трения сталь-бронза при нагрузке до 1МПа в кислой среде с рН 6 она оказалась в 2 раза больше, чем в щелочной с рН 8. В этих условиях преобладающая роль принадлежит электрохимическим процессам, поэтому ведущим является КМ-изнашивание. При повышении нагрузки до 1,5 МПа разность потенциалов в обоих средах становится практически одинаковой и характеризуется большой неустойчивостью, т.к. ведущим в этих условиях становится износ охватываемым и основная роль принадлежит механическим процессам [42].

Обнаружена удовлетворительная корреляция данных, полученных методами поверхностного электросопротивления и магнитной проницаемости с величиной микротвердости деформированных образцов [60].

В зависимости от свойств трущихся поверхностей граничные условия проявления различных факторов меняются [42,88].

Результаты изучения рабочих поверхностей и поверхностных слоев с помощью оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и ФМР использовали для качественной характеристики исследуемых явлений.

1.2.2. Свойства поверхностных пленок, кинетику их образования, разрушения и восстановления изучали потенциостатическим методом по изменению потенциала образцов при зачистке E_3 абразивом в рабочей среде, а также по характеру его изменения при трении E_T , полагая, что при стремлении E_T к E_3 металл освобождается от пленок и, наоборот, при $E_T = E_3$ возможно схватывание.

Анализ результатов измерения E_3 образца в активной рабочей среде, характера и величины его изменения после зачистки и в паре трения в КАС при различных режимах и температурах подтверждает коррозионно-механический процесс изнашивания.

Для характеристики коррозионных процессов снимали анодные и катодные поляризационные кривые, определяли величину тока коррозии.

Оксидные пленки на трущихся в КАС поверхностях металлов отличаются от пленок, образующихся при коррозии в статике. Однако, свойства последних (толщина, структура, твердость) во многом объясняют характер пленок при трении.

При коррозии в кислой и щелочной средах на стали 45 образуются пленки с пористым поверхностным и более плотным нижним

слоем. Когезионные и адгезионные их свойства в кислой среде значительно слабее, чем в щелочной [60]. Поэтому в кислой среде пленки вторичных структур не экранируют рабочую поверхность. Являясь катодами по отношению к материалу образца, они увеличивают электрохимическую гетерогенность поверхности и ускоряют коррозионные процессы [57, 61]. Это подтверждается, в частности, значительным изменением E_T и R_K пары трения в этой среде и более интенсивным, чем в щелочной, изнашиванием [72].

В щелочной среде образуются сплошные пленки, экранирующие рабочую поверхность образца, уменьшающие ее электрохимическую гетерогенность и скорость коррозии [61]. Величина R_K в этой среде на порядок выше, чем в кислой. Выше и микротвердость рабочей поверхности образца при трении в щелочной среде [71].

Характеристикой механических свойств пленок, скорости их воспроизводства и состояния поверхностных слоев металла может служить сила трения (резания) при зачистке F_3 . Например, при увеличении твердости стали 45 термообработкой и изменении pH среды от 6,5 до 11 сила трения уменьшается [60].

При трении в КАС небольшие нагрузки являются активаторами электро-химических процессов. При повышении нагрузки возрастает роль механического фактора [83].

Повышение температуры среды также вносит изменения в характер электрохимических процессов и образование вторичных структур на поверхностях трения металлов, при этом интенсивность их изнашивания увеличивается [57].

1.2.3. Характер деформирования и разрушения поверхностных слоев при трении исследовали по дислокационной структуре и величине пластической деформации слоя кристаллов фтористого лития и кремния в плане и по глубине на микротрибометре [78].

Установлено (рис.2), что при сухом трении деформированная зона кристалла LiF характеризуется максимальной глубиной и наибольшей относительной плотностью дислокаций.

При трении в дистиллированной воде глубина деформированной зоны уменьшается на 15 %, а плотность дислокаций становится примерно в 14 раз меньше, чем при сухом трении [53, 60].

В растворе с pH 6,5 ширина и глубина деформированной зоны не на много меньше, чем при трении в воде, однако плотность дислокаций повышается примерно в 3 раза, что затрудняет выход полос скольжения на поверхность трения и тормозится развитие объемной

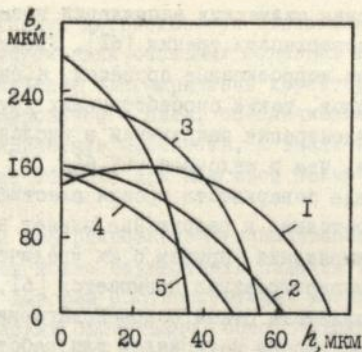


Рис. 2. Влияние свойств рабочей среды на глубину h и ширину b деформированной зоны при трении скольжения: I - сухое; 2 - в воде; 3 - в водном растворе 45 % СХ; 4 - в растворе с pH 6,5 + 15 % СХ; 5 - в растворе с pH II + 15 % СХ

деформации [74]. Из-за повышенной жесткости фрикционного контакта на напряженных поверхностях при трении образуются локальные скопления дислокаций предельной плотности, ускоряющие коррозионное разрушение и являющиеся зародышами трещин. Все это ведет к хрупкому и интенсивному изнашиванию поверхности трения [72].

С увеличением pH раствора до II ширина деформированной зоны увеличивается почти в 2 раза, а глубина становится наименьшей. Плотность дислокаций уменьшается примерно в 8 раз по сравнению с трением в растворе с pH 6,5 [53, 60].

Можно полагать, что в щелочной среде адсорбция OH-ионов снижает поверхностную энергию поверхности трения, создает благоприятные условия для выхода дислокаций. Пластифицирование поверхности способствует локализации деформации в тонких поверхностных слоях и их изнашиванию путем диспергирования [74]. Этому способствуют также образующиеся на поверхности трения в щелочной среде пленки, обеспечивающие положительный градиент механических свойств по глубине слоя [75]. Поэтому деформация в щелочной среде способствует упрочнению поверхностного слоя в большей степени, чем в кислой [72].

Переход от плоского к объемнонапряженному состоянию, а

также увеличение уровня сжимающих напряжений вызывает в кислой среде охрупчивание поверхности трения [61]. Увеличение напряжений интенсифицирует коррозионные процессы, а они - образование микроконцентраторов, также способствующих хрупкому разрушению. Локальная концентрация напряжений в кислой среде на несколько порядков выше, чем в щелочной [57, 61].

В щелочной среде поверхность трения пластифицируется настолько, что на ее состояние и разрушение влияет не характер, а величина объемных напряжений, причем с их увеличением сопротивление поверхности диспергированию повышается [61, 75].

Полученные результаты стали основополагающими при разработке рекомендаций по выбору материалов для работы в КАС, а также методов упрочняющей их обработки.

1.2.4. Возможности управления характером деформирования и разрушения поверхностных слоев металлов при трении основаны на их зависимости от рассмотренных выше факторов. Варьируя ими можно изменять в необходимом направлении и сам процесс изнашивания.

Процесс КМИ в большой степени определяется характером и величиной объемных напряжений в поверхностном слое металла. Ими достаточно эффективно можно управлять различными видами упрочняющей обработки (термической, химико-термической). Поэтому в дальнейших исследованиях основное внимание было уделено определению оптимальных видов и режимов такой обработки.

Исходя из наличия аналогии между пластифицированием, вызванным ПАВ, и пластифицированием в результате электрохимического заряжения поверхности трения, для регулирования поверхностной энергии и получения пленок вторичных структур с оптимальными свойствами предложено использовать поляризацию.

Влияние поляризации на интенсивность изнашивания различных металлов, величину силы трения, микротвердость поверхности зависит от природы и структуры сопряженных пар, свойств КАС, величины и знака потенциала поляризации.

Более эффективной является катодная поляризация, способствующая уменьшению неравновесной концентрации дислокаций и глубины деформированной зоны, причем в щелочной среде это влияние значительнее, чем в кислой. Анодная поляризация, наоборот, способствует растворению в КАС поверхностных пленок, увеличению концентрации деформаций, охрупчиванию поверхности трения

и в итоге - повышению интенсивности изнашивания [55, 58, 60, 66].

Опыты по упрочнению стальных образцов обкаткой роликами показали, что наиболее благоприятный характер изменения микротвердости деформированного слоя, обеспечивающий максимальную контактную и циклическую прочность, а также износостойкость, наблюдается после обкатки при катодной поляризации в кислой среде [71].

Управление деформированием и изнашиванием поверхностного слоя поляризацией можно осуществить подачей извне поляризующей э.д.с., а также выбором соответствующих материалов с различными электрохимическими свойствами, обеспечивающими определенные контактные гальванические э.д.с. [61].

1.3. КМ-изнашивание металлов и деталей в технологических средах сахарного производства

1.3.1. Роль сахарозы и несахаров в процессах трения и изнашивания. Испытания металлов в воде и 15 % -ном растворе сахарозы (СХ) показали, что она подавляет склонность металлов к схватыванию, уменьшает коэффициент трения и износ трущихся пар. Так, например, износостойкость пары Ст 5 - Бр05Ц5С5 в растворе сахарозы почти в 20 раз больше, а коэффициент трения в 5 раз меньше, чем в воде [17, 20].

С увеличением концентрации сахарозы до 60 % этот эффект непрерывно повышается (рис.3). В таких растворах износостойкость металлов в основном определяется их коррозионной стойкостью и склонностью к схватыванию. При увеличении концентрации до 80 % СХ характер изнашивания металлов меняется. В связи с появлением кристаллов сахарозы ведущим для сравнительно мягких металлов становится абразивный износ, поэтому интенсивность их изнашивания и коэффициент трения несколько повышаются [20, 23].

Особенно большое влияние оказывает сахароза на подавление склонности металлов к схватыванию (рис.4). Так, схватывание в паре сталь 45 - СЧ28 в 60 %-ном растворе сахарозы наступает при нагрузке почти на порядок большей, чем в 15 %-ном [23, 40].

Сахароза в водных растворах уменьшает КРП трущихся металлов и тем самым замедляет электрохимические процессы, уменьшает долю коррозионного процесса в изнашивании [42]. Она способствует образованию пленок вторичных структур мягче основного металла, обеспечивая положительный градиент механических свойств, в результате чего деформация локализуется в тонком поверхностном

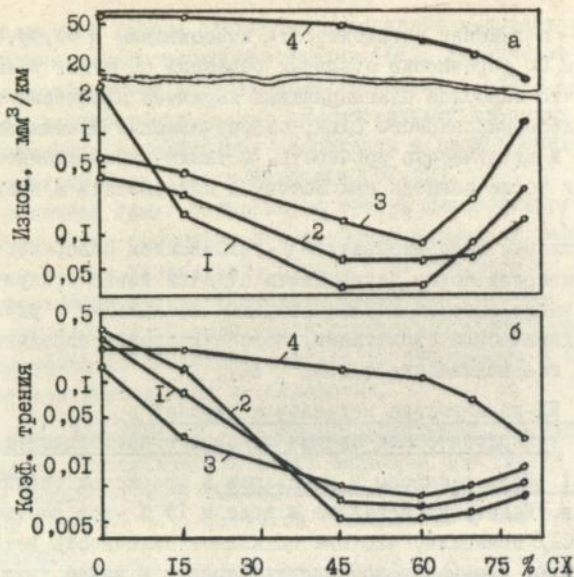


Рис. 3. Зависимость суммарного износа пар трения (а) и коэффициента трения (б) от концентрации сахара в растворе: Ст5 - Бр05Ц5С5 (1); Ст5 - СЧ15 (2); Ст5 - БН (3); Ст5 - БрАЖ 9-4 (4)

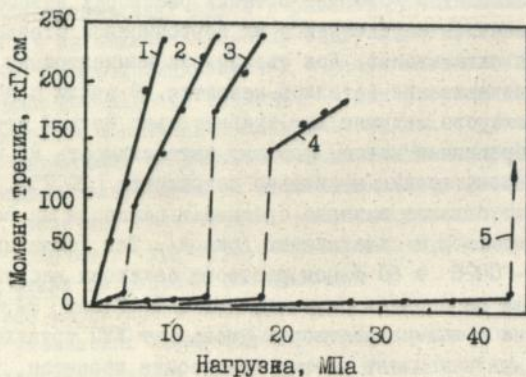


Рис. 4. Зависимость момента трения пары Ст5 - СЧ28 от нагрузки при концентрации сахара в растворе: 0 (1); 15 (2); 30 (3); 45 (4) и 60 (5) %

слое [60, 61].

Увеличение концентрации сахарозы интенсифицирует пластифицирование поверхностного слоя. Плотность дислокаций при испытании кристалла LiF в растворе с 45 % СХ почти в 2 раза меньше, чем в 15 %-ном растворе и в 4,5 раза меньше, чем при испытании в воде [53].

Влияние несахаров (НСХ) на изнашивание металлов исследовали в 15 %-ном растворе желтого сахара, содержащем ряд несахаров, неудаляемых при очистке полупродуктов производства. Одни из них в десятки раз повышают электролитные свойства растворов, другие - обладают ингибирующими и пластифицирующими свойствами. Поэтому они оказывают неодинаковое влияние на износостойкость различных пар трения. Износ стали и чугуна в растворе желтого сахара, по сравнению с износом в растворе белого, повышается, а износ цветных металлов (бронза, баббит), наоборот, уменьшается [1]. Это свидетельствует о существенной роли несахаров в интенсификации электрохимических процессов в изнашивании металлов.

Полученные данные о роли сахарозы и несахаров в процессе изнашивания металлов позволяют в значительной мере объяснить процессы трения и изнашивания деталей оборудования в конкретных технологических средах сахарного производства.

1.3.2. Изнашивание металлов и деталей в технологических средах сахарного производства. Эти среды условно можно разделить на две группы: растворы сахарозы различной концентрации с разнообразными растворимыми и нерастворимыми примесями (соки, утфели, патоки) и среды без сахарозы (известковое молоко, транспортно-мочечные и кислые воды), основными примесями в которых являются абразивные примеси.

Одной из характерных для сахарного производства сред является диффузионный сок - раствор 12...17 % СХ с комплексом несахаров, ПАВ, а также значительным количеством органических кислот, обуславливающих кислую реакцию (рН 6,5).

Кислая реакция диффузионного сока способствует интенсивному развитию электрохимических коррозионных процессов. В этой среде металлы не склонные к схватыванию подвержены КМИ и большей износостойкостью обладают более коррозионностойкие пары трения. Например, износостойкость пары Ст5- Бр05Ц50С5 выше износостойкости пары Ст5-СЧ15 при заданных режимах испытания в 1,7...1,9 раза.

О том, что превалирующим в КМИ металлов в диффузионном соке является коррозионный процесс свидетельствует также значительное увеличение износа при повышении температуры сока до 45°C при той же нагрузке.

ПАВ диффузионного сока локализуют деформацию металла в тонком поверхностном слое и тем самым уменьшают его склонность к схватыванию [19].

Формалин, иногда добавляемый в диффузионный сок для подавления микробиологических процессов, значительно снижает износостойкость пар трения, главным образом, за счет резкого увеличения износа стали [37].

Эффективным способом повышения износостойкости стали в диффузионном соке является упрочняющая термообработка - закалка и высокий отпуск. Износостойкость стали 45 при скорости скольжения 0,5 м/с и нагрузке до 8 МПа после такой обработки (НВ 317) повышается в 2...3 раза; повышается при этом и износостойкость сопряженного металла - чугуна СЧ28 (рис. 5, а) [50]. При нагрузках более 12 МПа температуру отпуска стали следует несколько понизить для сохранения большей твердости, т.к. в процессе изнашивания в этих условиях ведущая роль переходит к механическому фактору.

Зависимость суммарного износа термобработанных по различным режимам других сталей в паре трения с чугуном и бронзой имеет более сложный характер (рис. 6). В связи со склонностью к схватыванию применение стали 40Х13 и бронзы Бр05Ц5С5 для работы в диффузионном соке малоэффективно, а стали ферритного (10Х17) и аустенитного (10Х18Н10Т) классов, бронза БрА19-4, латуни и баббит для работы в этой среде непригодны [45].

При больших нагрузках и сравнительно небольших скоростях скольжения эффективным методом повышения износостойкости стали является ионное азотирование [106].

В сатурированных соках наряду с сахарозой и теми же сахарами имеются кристаллы извести $CaCO_3$ и другие абразивные примеси (SiO_2 , Al_2O_3), вносимые вместе с известью; реакция этих соков щелочная.

Исследования показали, что в нефилтрованном соке I сатурации металлы изнашиваются в 1,5...2,5 раза меньше, чем в диффузионном соке, что объясняется менее интенсивным протеканием коррозионных процессов в щелочной среде.

Наиболее износостойкими в этой среде являются пары Ст5-Бр05Ц5С5 и Ст5-СЧ15, при этом износостойкость первой выше вто-

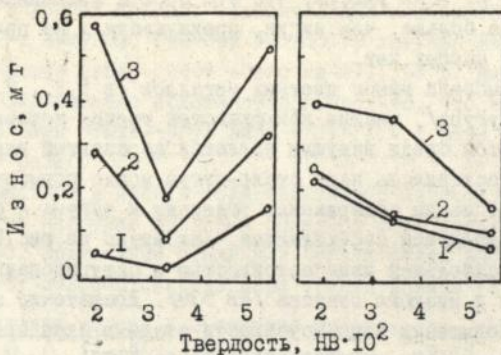


Рис. 5. Зависимость износа стали 45 от твердости при трении в диффузионном (а) и насыщенном (б) соках при нагрузках: 1 - 2; 2 - 4; 3 - 8 МПа

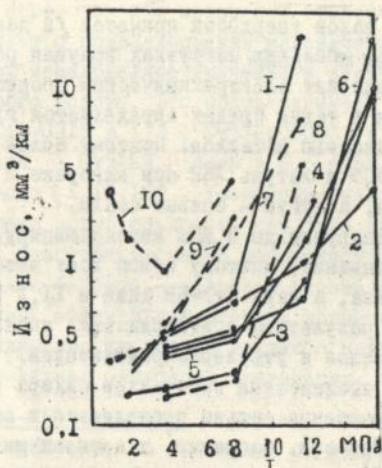


Рис. 6. Зависимость суммарного износа пар трения сталь-чугун СЧ28 в диффузионном соке при скорости скольжения 0,5 м/с от нагрузки: 1 - 45_п; 2 - 45_{зн}; 3 - 45_{зв}; 4 - У8_п; 5 - У8_{зн}; 6 - У8_{зв}; 7 - 40Х13_п; 8 - 40Х13_{зн}; 9 - 10Х17_п; 10 - 10Х18Н10Т (п - состояние поставки, зн - закалка и низкий отпуск, зв - закалка и высокий отпуск)

рой на 6...18 %. Если учесть, что эта бронза изнашивается в 1,2...1,4 раза больше, чем чугун, преимуществ в ее применении перед чугуном особых нет.

Более высокий износ цветных металлов (в 1,2...7,3 раза больше, чем чугуна), анализ поверхностей трения позволил заключить, что в этой среде ведущим является абразивный износ [1,18]. Поэтому износостойкость пары сталь-чугун можно повысить применением стали с большим содержанием углерода и чугуна - с большим количеством перлитной составляющей. Как видно из рис.5,б сталь 45 обладает наибольшей износостойкостью в сатурированном соке после закалки и низкого отпуска (HВ 538). Достаточно эффективным методом повышения износостойкости стали в этой среде является также цементация и ионное азотирование [104].

Утфель отличается от других сред наличием большого количества кристаллов сахарозы и несахаров. Для испытаний был взят утфель II (до 55 % СХ в кристаллах, до 33 % СХ в растворе, до 20 % НСХ).

При весьма малой твердости примесей (в данном случае - кристаллов сахара) и больших нагрузках ведущая роль в процессах изнашивания принадлежит электрохимическим процессам. Интенсивность изнашивания в таких средах определяется главным образом коррозионной стойкостью металлов. Поэтому более коррозионностойкие бронза Бр05Ц5С5 и латунь Л62 при нагрузке 2 МПа изнашиваются меньше, чем чугун, а чугун - больше стали.

Повышение нагрузки до 4 МПа интенсифицирует абразивное изнашивание и схватывание, поэтому износ всех металлов увеличивается в 1,1...3,7 раза, а пары Ст5-БН даже в II,1 раза [2,14].

Полученные результаты подтверждаются анализом изношенных деталей утфелемешалок и утфелераспределителей.

Абразивное воздействие кристаллов сахара на поверхности трения металлов особенно сильно проявляется в случае отсутствия межкристалльной жидкости, например, у деталей шнеков и транспортеров сахара [1,2].

Из паток для испытаний была взята меласса, содержащая наибольшее (до 32 %) количество несахаров, с рН 7,5. Благодаря высокой вязкости и большому количеству сухих веществ меласса обладает хорошими смазывающими свойствами. Поэтому трение металлов в ней при скорости скольжения 0,5...1 м/с проходит с малым коэффициентом трения (0,012...0,025), а износ примерно на порядок

меньше, чем в других средах; относительная износостойкость пар трения стали с чугуном, бронзой Бр05Ц5С5, латуны Л62 и баббитом БН отличаются между собой всего на 19...58 %. Даже в паре Ст5-БрАИ9-4 схватывание подавляется настолько, что ее износ превышает износ пары сталь-чугун лишь в 3,7...9,2 раза (в воде - в 56,5...272,3 раза).

Максимальной и практически одинаковой износостойкостью в этой среде при нагрузке до 4 МПа обладают пары трения Ст5-СЧ15 и Ст-Бр05Ц5С5. Применение стали или чугуна более высокой твердости повышает износостойкость пары трения в целом [15].

Известковое молоко - суспензия гидроксида $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с примесями SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 и др.; ее реакция - pH 12-14.

Ведущим видом изнашивания в этой среде является абразивный. Трение характеризуется повышенным коэффициентом трения (0,04...0,17), а износ в основном определяется механическими свойствами металлов (рис.7). С повышением нагрузки износ всех металлов возрастает в большей мере, чем при повышении температуры среды, что также свидетельствует о превалировании механического фактора.

Вместе с тем, немаловажное значение имеют и электрохимические свойства известкового молока. Это подтверждается тем, что износ в нем пар трения Ст5-СЧ15 в 1,3, Ст5-Бр05Ц5С5 в 1,8, Ст5-БрАИ-4 в 10,3 раза меньше, а Ст5-БН - лишь в 6,6 раза больше, чем в дистиллированной воде [1,10,16]. Уменьшение износа большинства металлов в этой среде можно объяснить тем, что высокая щелочность способствует пластифицированию поверхностного слоя [60], а более высокий износ баббита - наличием весьма мягкой основы.

В этих условиях эффективным методом повышения износостойкости является увеличение твердости трущихся металлов, для стали - это закалка с низким отпускком, цементация, азотирование [10].

Транспортерно-мочечные воды содержат значительное количество абразивных примесей, но в отличие от известкового молока, имеют практически нейтральную реакцию.

Исследование изнашивания металлов в этих средах, а также анализ изношенных и опытных деталей свекломойки, свеклоэлеватора и других устройств показали, что в их изнашивании ведущим является абразивный процесс, а сопутствующим - коррозионно-механический [4,31]. Вода, как было показано выше, уменьшает глубину деформации и степень наклепа, уменьшает склонность металлов к схватыванию [60]. Поэтому для повышения долговечности деталей,

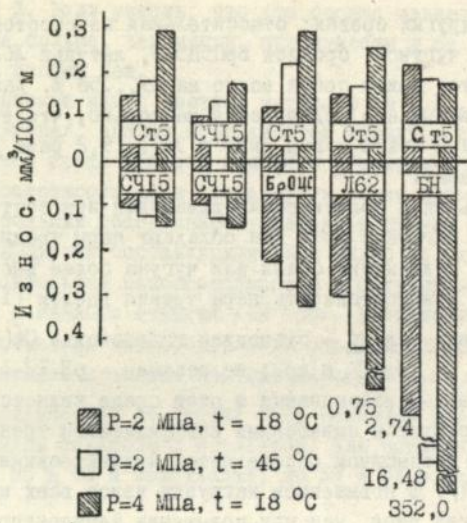


Рис. 7. Износ металлов в известковом молоке ($V \neq 0,5 \text{ м/с}$)

работающих в этих средах, как и в известковом молоке, следует применять те же виды упрочняющей обработки. Установлено, например, что ионное азотирование повышает долговечность пальцев из стали 45X цепи свеклоэлеватора в 3 раза [100, 114].

1.3.3. Износостойкость валов центрбежных насосов в салниковом уплотнении. С помощью полупроводниковых кремниевых тензодатчиков и разработанной месдозы на стенде [22] определены: величина и характер распределения радиального давления набивки σ_x в зависимости от давления нажимной втулки, соотношения σ_x и давления уплотняемой жидкости P для набивок с различным содержанием пропитки, температура поверхности вала и момент трения при работе в паре с различными набивками и содержанием пропитки; величина утечки в зависимости от материала набивки и величины σ_x (рис.8) [26-28].

С помощью специально разработанного прибора [34] определен износ вала по длине уплотнения. Установлено, что интенсивность изнашивания вала и параметры трения зависят, при прочих равных условиях, от величины утечки и соотношения $\frac{\sigma_x}{P}$, последнее обус-

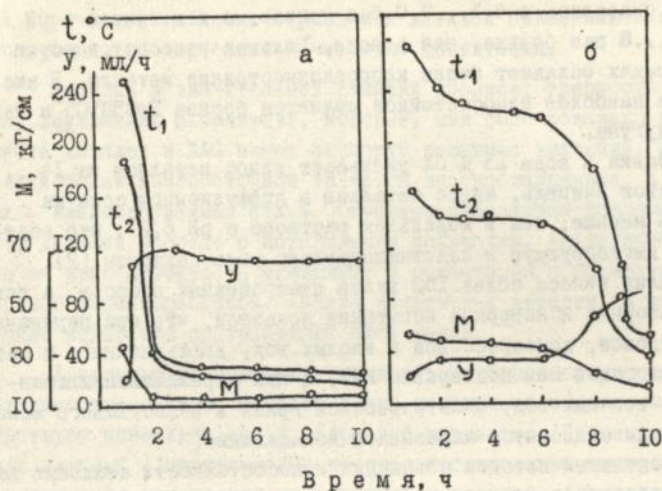


Рис. 8. Зависимость температуры t , момента трения M и утечки Y от времени испытания уплотнения с набивками ХБП (а) и III (б) при давлении уплотняемой жидкости $P = 0,6$ МПа:

$$\sigma_{\infty 1} = 0,6 \text{ и } \sigma_{\infty 2} = 0,4 \text{ МПа}$$

(1 - в начале и 2 - в конце уплотнения)

ловливает характер распределения износа этих деталей. Он может быть максимальным в начале, конце или одновременно в начале и конце сальниковой камеры [79]. Характер изнашивания вала позволяет судить об условиях эксплуатации насоса (уплотнения). Оптимальными являются условия, обеспечивающие более равномерное распределение износа по длине вала и могут быть достигнуты размещением в начале и конце сальниковой камеры колец набивки с меньшим, а между ними - с большим коэффициентом бокового давления [28].

Эксперименты показали, что в процессе изнашивания металлов в паре трения с мягкой набивкой в КАС без абразивных примесей ведущими являются электрохимические явления. Установлено, также аналогичное влияние на эти процессы различных факторов (химическая активность среды, наличие сахарозы и несахаров, абразивных примесей, напряженное состояние поверхностного слоя).

Износостойкость испытанных в модельном растворе с pH 6,2

металлов оказалась в 4,5...7,0 раз меньше, а в щелочном с рН II - в 5...8 раз больше, чем в воде. Большой износостойкостью в этих средах обладают более коррозионностойкие металлы. В кислой среде наиболее износостойкой является бронза Бр05Ц5С5 и наименее - чугуны.

Добавка к воде 15 % СХ уменьшает износ металлов на 14...40 %. В свою очередь, износ металлов в диффузионном соке на 35...60 % меньше, чем в модельном растворе с рН 6,2, что подтверждает ингибирующую и пластифицирующую роль сахарозы [2].

Анализ износа более 150 валов центробежных насосов, а также лабораторные и натурные испытания показали, что при перекачивании прудовой, жомпрессовой и кислых вод, диффузионного и сатурированных соков они подвержены КМИ, а при перекачивании транспортно-мочных вод, фильтрпрессной грязи и известкового молока - ведущим становится абразивное изнашивание.

Эффективным методом повышения износостойкости стальных валов центробежных насосов, перекачивающих кислые среды, является закалка с высоким отпускком, а при перекачивании щелочных - закалка с низким отпускком, цементация, азотирование. Так, ионное азотирование повышает износостойкость таких валов в нейтральных средах в 3...4 и в щелочных - в 7...13 раз [99,106,113].

Опыты показали, что увеличение биения вала насоса до 7 мкм влечет за собой резкое увеличение утечки уплотняемой жидкости и повышение момента трения. Предложенная конструкция уплотнения с упругим элементом, защищенная авторским свидетельством [118], успешно работает при биении вала до 250 мкм.

Сделана также попытка заменить традиционную пеньковую набивку капроновой пряжей. Такая набивка была испытана на Гниванском сахарном заводе в насосах рециркуляции сока, вентилях на коммуникации конденсата ретурного пара и дала положительные результаты [6].

1.4. Повышение износостойкости деталей технологического оборудования сахарного производства

Результаты исследования характера деформирования и разрушения поверхностей трения металлов в зависимости от свойств КАС и напряженного состояния поверхностного слоя послужили основой в выборе методов и разработки режимов упрочняющей обработки деталей с целью достижения наибольшей их износостойкости.

Основные опыты проведены с металлами в состоянии поставки.

Для упрочнения стальных образцов и деталей применялись закалка с отпуском, азотирование и частично цементация.

Закалка в значительной степени повышает твердость и величину внутренних напряжений, которые, как было показано выше, при работе деталей в КАС имеют зачастую решающее значение. В кислых средах более износостойкой является высокоотпущенная, а в щелочных - низкоотпущенная сталь. Особенно эффективна закалка при работе деталей в среде с абразивными примесями. Аналогичное влияние на износостойкость оказывает и цементация с последующей стандартной термообработкой. Анализ изношенных деталей, а также натурные испытания подтверждают этот вывод.

Азотирование повышает твердость и коррозионную стойкость поверхностного слоя, создает в нем напряжения сжатия, что способствует повышению его усталостной прочности. Поэтому представляло научный и практический интерес исследование этого вида упрочнения для увеличения долговечности деталей оборудования сахарных заводов. С этой целью исследовали один из наиболее прогрессивных, но менее изученных, способов азотирования - ионный.

Коррозионная стойкость азотирования стали в кислой и щелочной средах повышается и определяется ее способностью пассивироваться (рис.9) с образованием оксидной пленки, а также увеличе-

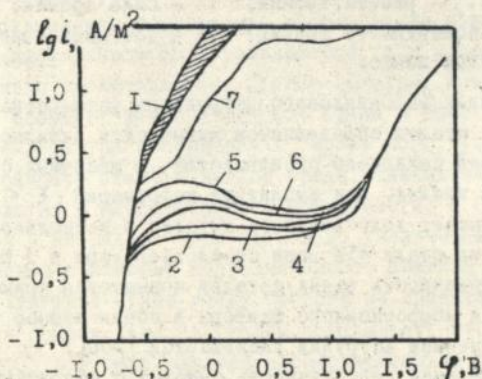


Рис. 9. Анодные поляризационные кривые неупрочненных (I) и азотированных сталей: 38Х2МКА (2), 45Х (3), У8А (4), 45 (5), 20 (6) и чугуна СЧ18 (7) в диффузионном соке

нием дисперсности образующихся нитридов [91, 101]. Вместе с тем, анализ поляризационных кривых и структуры улучшенной и азотированной стали 45X показал, что в процессе изнашивания азотированной стали решающее влияние оказывает не только коррозионный фактор. Азотирование повышает износостойкость пар трения, изменяя и сам механизм изнашивания, главным образом вследствие особенностей структуры и свойств диффузионного слоя, определяемых соотношением пластичных Fe_3N и Fe_4N и малопластичных Fe_2N нитридов [91]. Увеличения количества пластичных нитридов и повышения пластичности поверхностного слоя удалось достичь предложенным и разработанным комбинированным режимом азотирования последовательно в смесях $N_2 + Ar$ и $N_2 + C_2H_8$ [112].

Определена зависимость остаточных напряжений от параметров азотирования [96]. Показано, что их величина, как и пропорциональная им твердость, не является объективным критерием износостойкости азотированных слоев при трении в жидких средах без абразивных примесей. В этих условиях более достоверной характеристикой износостойкости металла является удельная работа разрушения [95]:

$$A_p = \frac{A_{тр}}{U_o} = \frac{FL}{S I_{\lambda}}$$

где $A_{тр}$ - работа трения; F - сила трения; L - путь трения; S - поверхность трения; U_o - объемный износ; I_{λ} - линейный износ.

В условиях малоциклового нагружения усталостная прочность азотированных сталей определяется химической активностью технологических сред сахарного производства, в щелочных средах она больше, чем в кислых. При амплитуде деформации $\epsilon < 0,25\%$ азотирование повышает долговечность деталей в несколько раз (например, пальцев из стали 45X цепи свеклосаеи гора в 3 раза). Многоцикловая долговечность таких деталей повышается примерно на 40%. При этом, доля коррозионного фактора в общем износе азотированной стали с увеличением нагрузки уменьшается [100].

Относительная долговечность деталей с увеличением концентрации азота в поверхностном слое повышается и достигает максимального значения, например, при работе в известковом молоке при 10 и в диффузионном слое - при 8%. Это позволяет прогнозировать эксплуатационные характеристики азотированных деталей по содержа-

ний азота в диффузионном слое. Для этого разработан метод экспресс-анализа, защищенный авторским свидетельством [123].

Для оптимизации процесса азотирования использовали метод математического планирования эксперимента. В качестве переменных были выбраны основные технологические факторы, определяющие состав, структуру и свойства азотированного слоя: температуру $\langle X_1 \rangle$, содержание азота $\langle X_2 \rangle$ или пропана $\langle X_3 \rangle$ в насыщающей смеси и ее давление $\langle X_4 \rangle$. Параметрами оптимизации служили: линейный износ И, общая глубина азотированного слоя h , глубина нитридного слоя h_n , микротвердость поверхности HV¹, остаточные напряжения сжатия $-\sigma$, электродный потенциал поверхности $-\psi$, скорость коррозии К, число циклов до появления трещины при многоциклового N и до разрушения - при малоциклового n усталости.

После реализации полного факторного эксперимента получены, наряду с другими, уравнения регрессии, определяющие износ стали 45X в диффузионном соке $\langle \text{мкм} \rangle$:

$$(И) = 35,363 + 2,64IX_1 - 1,613X_2 - 1,038X_4$$

и в известковом молоке :

$$(И) = 29,65 - 2,30X_1 - 1,125X_3 - 0,875X_4 .$$

Анализ влияния технологических факторов на параметры оптимизации показывает, что наиболее значимым из них является температура. С повышением температуры азотирования износостойкость стали 45X в диффузионном соке уменьшается, а в известковом молоке - несколько увеличивается. Другие факторы, хотя и в меньшей степени, повышают износостойкость стали в обеих средах. С повышением температуры азотирования, кроме того, ухудшается коррозионная стойкость стали в кислой среде, снижаются остаточные напряжения сжатия и микротвердость поверхности, а глубина диффузионного слоя и нитридной зоны несколько увеличивается [97, 104].

Выявленные с помощью корреляционного анализа статистически значимые линейные связи между свойствами представлены на рис. 10 в виде графов. Анализ графов показывает, что на уровне значимости 0,05 все определяемые экспериментально свойства корреляционно связаны между собой, хотя некоторые и непрямыми связями. С повышением доверительной вероятности число линейных связей между различными свойствами уменьшается.

Для оценки свойств материалов по экспериментальным характеристикам получены линейные корреляционные уравнения [98].

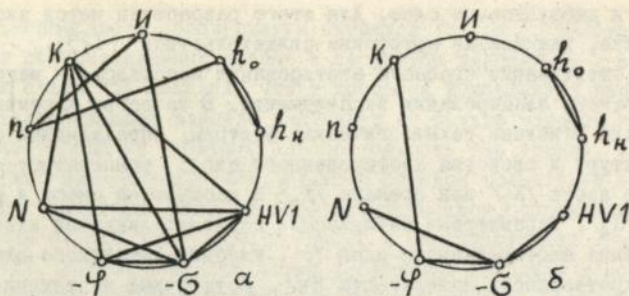


Рис. 10. Графы корреляционных связей между свойствами азотированной стали при доверительных вероятностях 95 (а) и 99 (б) %

Если, например, у азотированной стали 45 определены остаточные напряжения $-G$, то при работе в диффузионном соке другие характеристики можно рассчитать по уравнениям:

$$\begin{aligned} (И) &= 78,010 - 0,102 (-G), \text{ мкм}; \\ (К) &= 37,467 - 0,036 (-G), \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}; \\ (HVI) &= 3,341 + 0,025 (-G), \text{ ГПа}; \\ (-\varphi) &= 904,620 - 0,526 (-G), \text{ мВ}; \\ (N) &= 3,054 + 0,011 (-G), \times 10^7 \text{ цикл.}; \\ (h) &= 6,661 - 0,050 (И), \times 10^3 \text{ цикл.}; \end{aligned}$$

Особый интерес представляет определение свойств по наиболее легко определяемой характеристике - микротвердости HVI:

$$\begin{aligned} (К) &= 30,343 - 1,099 (HVI), \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}; \\ (-G) &= 142,760 + 37,764 (HVI), \text{ ГПа}; \\ (-\varphi) &= 723,940 - 5,409 (HVI), \text{ мВ}; \\ (N) &= -1,175 + 0,378 (HVI), \times 10^7 \text{ цикл.} \end{aligned}$$

Активное планирование эксперимента позволило найти оптимальные режимы ионного азотирования, обеспечивающие повышение износостойкости стальных деталей в диффузионном соке в 2...3, в известковом молске - в 7...9, конденсате выпарных аппаратов - в 8...13, транспортно-мочечных водах - в 2...6 раз [106].

Азотированные детали во всех технологических средах сахарного производства обладают большей износостойкостью, чем улучшен-

ные и цементованные. По степени возрастания износостойкости после азотирования стали расположились в ряд: 20, 45, 45X, 38XМ2БА [100].

Повышение износостойкости узлов трения может быть достигнуто также применением газопламенных покрытий [105], конструктивными изменениями [4, 7, 8, 10, 118], подводом чистой воды к узлам трения [4].

2. ГИДРОЭРОЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ И ДЕТАЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ САХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

2.1. Методика исследований

ГЭИ - процесс разрушения поверхностных слоев деталей под воздействием потока жидкости. В чистых жидкостях (растворах) разрушение поверхностей деталей может быть вызвано также ударным и кавитирующим воздействием жидкости. Такое разрушение относят к кавитационно-эрозионному изнашиванию (КЭИ). При наличии абразивных примесей в потоке жидкости механизм разрушения деталей несколько отличается поэтому его рассматривают как гидроабразивное изнашивание (ГАИ).

Выполненные к началу этих исследований работы в основном относились к изучению ГЭИ металлов в воде (гидротурбины, гребные винты и т.п.). Поэтому для выяснения механизма ГЭИ металлов в технологических средах сахарного производства возникло много вопросов, требующих предварительного решения. Это, прежде всего, роль и значение в процессе ГЭИ электрохимической активности среды, ее температуры, плотности, состава, содержания растворимых и нерастворимых примесей, в первую очередь - сахарозы и несахаров, ПАВ и твердых абразивных примесей.

С учетом этого была разработана методика исследования ГЭИ в технологических средах сахарного производства, сконструированы оригинальные установки: струеударная [30], с магнитоэрозионным вибратором [3], гидродинамическая труба [117]; последняя вмонтировалась непосредственно в систему трубопроводов сахарного завода. Экспериментальные установки были оснащены необходимыми приборами для изучения электрохимических явлений при ГЭИ потенциостатическим методом.

В исследованиях широко использовались различные виды физико-химического и металлографического анализов.

2.2. ГЭ-изнашивание металлов в коррозионно-активных средах

Уже первые опыты по исследованию ГЭИ металлов в КАС показали, что их эрозионная стойкость в большой степени определяется как свойствами самих металлов, так и коррозионной активностью сред.

Из приведенных на рис. II графиков видно, что разрушение углеродистой стали и высокопрочного чугуна в кислой среде протекает без инкубационного периода и намного интенсивнее, чем в воде (интенсивность разрушения серого чугуна СЧ15 в 2...3 раза выше, чем ВЧ50). Гидроэрозия коррозионностойкой стали 10Х18Н10Т в кислой среде протекает так же, как и в воде, но с меньшим инкубационным периодом и с большей интенсивностью хрупкого разрушения.

Отсутствие значительных эрозионных повреждений поверхности сталей и чугунов в начальный период испытания в кислой среде при большой потере массы свидетельствует об интенсивном развитии взаимоусиливающих друг друга коррозионных процессов и пластической деформации, в результате чего при соударениях со струей разрушаются пленки продуктов коррозии и обеспечивается свободный доступ кислорода к ивентильным участкам поверхности металла. В этих условиях критерием износостойкости металлов является их коррозионная стойкость.

В щелочной среде инкубационный период в разрушении углеродистой стали и чугуна больше, чем при испытании в воде. Уменьшение интенсивности их изнашивания в этот период можно объяснить некоторым замедлением коррозионных процессов, т.к. в щелочной среде на поверхности металлов образуются пленки из адсорбированных ОН-ионов и продуктов коррозии, препятствующих свободному доступу кислорода. Увеличение скорости хрупкого разрушения сталей и медных сплавов в щелочной среде обуславливается адсорбционным снижением прочности и расклинивающим действием продуктов коррозии [25].

Характер изменения электродных потенциалов и поляризационных кривых, снятых в статических условиях и при ГЭИ в режиме ультразвуковой кавитации, определяется свойствами самих металлов и рабочей среды.

Металлы, на поляризационных кривых которых, в обоих случаях отсутствует участок пассивности, обладают невысокой коррозионной и ГЭ-стойкостью.

Если у металлов имеется участок пассивности только в стати-

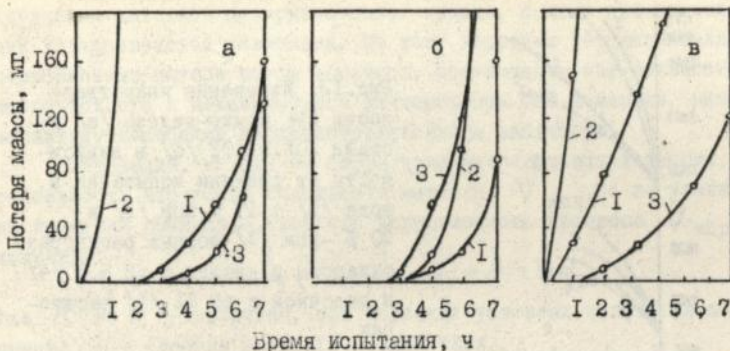


Рис. 11. Влияние среды на ГЭИ сталей 45 (а) и 10X18H10T (б) и чугуна ВЧ50 (в): 1 - вода; 2 - кислая (рН 6,5) и 3 - щелочная (рН 11) среды

ческих условиях, они не стойки в условиях ГЭИ.

И, наконец, если участки пассивности имеются в обоих случаях, такие металлы обладают сравнительно высокой как коррозионной, так и ГЭ-стойкостью [77].

Таким образом, результаты анализа поляризационных кривых позволяют в определенной степени прогнозировать эффективность использования различных металлов для работы в конкретных технологических средах сахарного производства.

ГЭИ - процесс разрушения поверхностного слоя металлов. Поэтому в исследованиях ГЭИ представляет интерес изучение изменений в состоянии и свойствах этого слоя.

Изменение микротвердости поверхности образцов из армо-железа и стали 12X18H10T показали, что при испытании в кислой и щелочной средах степень их наклепа меньше, чем в воде (рис. 12). Уменьшение степени наклепа можно объяснить облегчением стока дислокаций к участкам анодного растворения металла и в образующиеся при коррозионном растрескивании микротрещины.

Повышение наклепа железа в начале испытания в кислой среде связано с наводороживанием и охрупчиванием поверхностного слоя, чего у коррозионностойкой стали аустенитного класса 12X18H10T при небольших концентрациях водорода не наблюдается [25].

Для выяснения влияния водорода на КЭ-стойкость металлов были

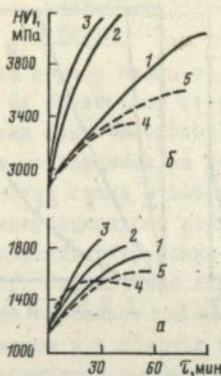


Рис.12. Изменение микротвердости HV1 армко-железа (а) и стали 10X18H10T (б) в зависимости от времени испытания в воде (1) ; 15 %-ном (2) и 30 %-ном (3) водных растворах сахарозы в кислом с pH 6,5 (4) и щелочном с pH 11 (5) растворах

проведены испытания стали 45X, предварительно наводороженной в растворе серной кислоты путем катодной поляризации. Оказалось, что с увеличением степени наводороживания интенсивность разрушения стали повышается. После длительной выдержки (старения) наводороженных образцов их КЗ-стойкость восстанавливается [54].

Методом ФМР и рентгенографическим анализом установлен циклический характер изменения прочностных свойств (упрочнение - разупрочнение) поверхностного слоя металла при ГЭИ.

В начальный период испытания под воздействием пластической деформации и ростом плотности дислокаций происходит интенсивное упрочнение поверхностного слоя. С появлением микротрещин и их развитием усиливается сток дислокаций - наступает разупрочнение. После изнашивания разупрочненного слоя процесс повторяется.

Как и степень наклепа, интенсивность упрочнения металлов, выявленная методом ФМР, определяется коррозионными свойствами среды и качественно совпадают.

Таким образом, ГЭИ в коррозионноактивных средах обуславливается не только интенсификацией коррозионных процессов, но и степенью пластической деформации и дислокационной структурой, характером деформации и разрушения металлов. Поэтому при изучении ГЭИ металлов в КАС одной из важнейших задач является определение соотношения интенсивности коррозионного и механического факторов в процессе этого вида изнашивания.

Коррозионные процессы в КАС имеют электрохимическую природу, поэтому для изучения их кинетики использовали потенциостатический метод. Ток коррозии определяли экстраполяцией тафелевских участков

анодной и катодной поляризационных кривых, снятых при воздействии ультразвуковой кавитации. По току коррозии устанавливали коррозионные потери массы образцов. Соотношение интенсивностей коррозионного и механического факторов при ГЭИ изменяли, меняя амплитуду колебаний магнитострикционного вибратора.

Определив, исходя из структурно-энергетической теории, интенсивность нарушения сплошности металла $V_{\text{мех}}$, а по уравнениям кинетики реакций - скорость коррозионного процесса $V_{\text{кор}}$, получили:

$$\lg(V_{\text{мех}}/V_{\text{кор}}) = A + B\mathcal{E},$$

где A и B - величины, при заданных условиях испытания постоянные; \mathcal{E} - энергия внешнего воздействия.

Полагая \mathcal{E} пропорциональной квадрату амплитуды колебаний вибратора A^2 , зависимость соотношения интенсивностей механического и коррозионного факторов КЭИ в координатах $\lg(V_{\text{мех}}/V_{\text{кор}})$ - A^2 должна быть прямолинейной [80,86].

На основании полученных результатов исследований составлена схема определения показателя ГЭИ, основанная на усилении коррозионного фактора анодной поляризацией, а механического - изменением амплитуды колебаний вибратора, и разработаны способы ускоренных испытаний некоррозионноактивных металлов, защищенные авторскими свидетельствами [119, 124]. Эти способы позволяют определять при ускоренных испытаниях характеристики ГЭ-стойкости металлов, близкие к полученным в условиях работы оборудования и тем самым выполнять расчет и прогнозировать долговечность конкретных деталей.

Для оценки долговечности термодиффузионных защитных покрытий метод определения износостойкости по потере массы оказался малоэффективным. В качестве характеристики износостойкости таких покрытий предложен параметр - долговечность покрытия, определяемый временем от начала испытания до момента резкого изменения потенциала образца с покрытием.

Получены уравнения регрессии, позволяющие по сравнительно просто определяемым параметрам (толщине карбидной зоны или коррозионному току) прогнозировать долговечность термодиффузионных хромированных покрытий на углеродистых сталях и чугунах [90].

2.3. Влияние сахарозы и несахаров на ГЭ-изнашивание металлов

Испытания в воде и растворах с 15 и 30 % СХ на струеударной установке показали (рис.13), что инкубационный период в раз-

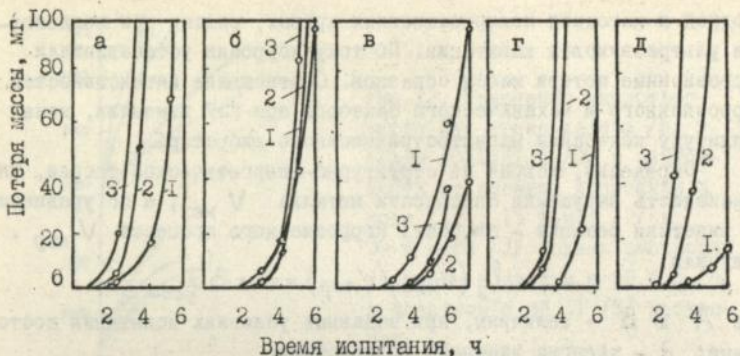


Рис. 13. Кинетика гидроэрозии сталей: IO (а); 45 (б); У8 (в); IOXIBHIOТ (г); 20X13 (д);
 I - вода; 2 - раствор с 15 и 3 - с 30 % СК

рушении испытанных в этих средах металлов характеризуется небольшой потерей массы, а его длительность определяется физико-химическими свойствами среды. В воде этот период оказался наибольшим у термообработанной стали 45 [HRC₃50], а наименьшим - у стали IO. С увеличением концентрации сахарозы в растворе инкубационный период у сталей IO, IOXIBHIOТ, 20X13 и термообработанной 45 уменьшается, а у сталей 45 и У8 - увеличивается.

Испытания показали, что в процессе гидроэрозии коррозионно-стойких металлов в кислом (рН 6,5) и щелочном (рН II) растворах сахарозы проявляет себя в основном как компонент, повышающий плотность раствора, и тем самым усиливает механический фактор.

Добавление сахарозы к воде и щелочному раствору интенсифицирует разрушение среднеуглеродистой стали. В кислой среде, когда роль коррозионного фактора превалирует, сахароза, будучи ингибитором, повышает стойкость этой стали.

В разрушении серого чугуна коррозионный фактор может быть соизмерим с механическим, поэтому, благодаря ингибирующему действию сахарозы, потери его массы в сахарных растворах различной активности значительно уменьшается [24].

Уменьшение инкубационного периода у названных сталей по мере возрастания концентрации сахарозы в растворе, можно объяснить усилением механического воздействия жидкости большей плотности (сахара-

роза в количестве 30 % повышает плотность водного раствора на 13 %), более интенсивным накоплением пластической деформации. Это подтверждается результатами измерения микротвердости поверхности образцов (см. рис. 12), свидетельствующими об увеличении степени их наклепа.

Анализ приведенных на рис. 13 графиков показывает, что усиление гидроэрозии с повышением концентрации сахарозы, особенно в период хрупкого разрушения, характерно для коррозионностойких металлов (стали 20Х13, 10Х18Н10Т, углеродистые стали с большей однородностью структуры - 10 и термообработанная 45, бронза БрАЮЕ4Н4).

У сталей 45 и У8 в инкубационном периоде больше, чем у коррозионностойких металлов, превалирует коррозионный фактор и проявляются ингибирующие свойства сахарозы. После окончания этого периода характер кинетических кривых несколько меняется. С развитием хрупкого разрушения определяющим становится механическое воздействие.

2.4. Влияние абразивных примесей на ГЭ-изнашивание металлов

В ряде технологических сред сахарного производства наряду с растворимыми имеются и нерастворимые примеси, в том числе абразивные (SiO_2 , Al_2O_3 , $CaCO_3$ и др.). Их влияние на ГЭИ исследовали на струеударной установке в средах с различным рН и добавкой от 0 до 10 % кварцевого песка зернистостью 0,1...0,2 мм.

Установлено, что интенсивность разрушения углеродистых сталей в растворе с рН 4,9 и концентрации абразивных примесей 3 % выше, чем в воде, в 10...15 раз, а серых и высокопрочных чугунов - в 4...5 раз. Незначительная разница в относительной стойкости этих сплавов в кислой среде (0,84...1,07) свидетельствует о том, что ведущая роль в их разрушении принадлежит коррозионным процессам. Наибольшей стойкостью в кислой среде с абразивом обладают коррозионностойкие сплавы (стали 40Х13, 10Х18Н10Т, чугун 130Х17М, бронза БрАЕ 9-4, титан ВТ1); их относительная стойкость оказалась в 11...19 раз выше, чем у стали 45.

Известно, что рост рН среды от 4 до 12 не вызывает значительных изменений в скорости коррозии углеродистых сталей. Поэтому наблюдаемое увеличение потерь массы этих металлов в кислой среде с абразивом может быть объяснено взаимным усилением коррозионного и механического факторов [38, 43].

В щелочной среде с рН 12,6 и 3 % абразива ведущим в про-

цессе эрозии металлов является механический, поэтому стойкость их определяется в основном прочностными характеристиками, прежде всего - твердостью, а для углеродистых сплавов - еще и структурой (количеством перлитной составляющей, формой графитных включений). Больше износостойкостью в этой среде обладают высокоуглеродистые и термообработанные стали, хромистый чугун 130Х17М, сталь 110Г13. В то же время сталь 10Х18Н10Т, титан ВТ1, бронза БрАШ 9-4 имеют сравнительно низкую относительную стойкость [49,64].

Интенсивность ГАИ металлов зависит от уровня механического воздействия потока жидкости, определяемого в значительной степени скоростью его движения и температурой среды. С повышением температуры от 16 до 70 °С стойкость металлов с низкими антикоррозионными свойствами (углеродистая сталь, чугун) при скорости 38 м/с уменьшается в 1,5...1,8 раза [38,43], что подтверждает роль коррозионного фактора в этих условиях. При скорости 66 м/с стойкость этих металлов от температуры среды практически не зависит, т.к. ведущая роль переходит к механическому фактору.

Наличие абразива в потоке принципиально меняет характер эрозии металлов, зависимость потерь массы от времени становится линейной. Потеря массы металла ΔG в зависимости от длительности испытания τ и концентрации абразивных примесей n при гидробразивной эрозии может быть выражена уравнением: $\Delta G = b n^c \tau$, где b - коэффициент, определяемый свойствами металла и жидкости, а также режимами испытания [43,49].

2.5. ГЭ-изнашивание металлов и деталей в технологических средах сахарного производства

2.5.1. Гидроэрозия металлов в кислых технологических средах.

Как и при КМИ, гидроэрозионную стойкость металлов в кислых средах можно характеризовать результатами испытаний в диффузионном соке. Проведенные непосредственно на Яготинском сахарном заводе опыты показали, что в этой среде она определяется в основном антикоррозионными свойствами металлов (рис.14), т.е. ведущим в гидроэрозионном разрушении являются коррозионные процессы.

Слабое механическое воздействие диффузионного сока на металлы при гидроэрозии объясняется наличием в нем значительного количества ПАВ-пенообразователей (сапонина, пектина), молекулы которых, адсорбируясь на стенках пузырьков пены, повышают их прочность и дисперсность, а тем самым и демпфирующую роль. Это подтверждается тем, что добавка к соку ПАВ-пеногасителей сопровождается резким изменением характера разрушения металла, интенсивность кото-

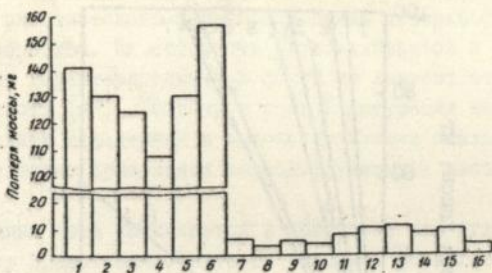


Рис. 14. Потеря массы образцов за 6 ч испытания
в диффузионном соке:

1 - сталь 10; 2 - сталь 45 нормализованная; 3 - сталь 45 закаленная; 4 - сталь У8; 5 - чугун ВЧ50; 6 - чугун СЧ28; 7 - сталь 10Х17; 8 - сталь 10Х18Н10Т; 9 - сталь 20Х13; 10 - Вр05Ц5С5; 11 - БрАЖ9-4; 12 - БрАЖН10-4-4; 13 - БрКМц 3-1; 14 - латунь ЛК 80-3; 15 - дуралюмин Д1; 16 - сталь 45 термомодифицированнохромованная

рого почти совпадает с интенсивностью разрушения в кислом модельном растворе с 15 % СХ. Как видно из рис. 14 дуралюмин Д1 в диффузионном соке обладает довольно высокой эрозионной стойкостью. При добавке к соку пеногасителей он начинает разрушаться хрупко, почти без инкубационного периода [32, 44].

Охрупчивание металла при работе в диффузионном соке может быть вызвано также наводороживанием. Опыты показали, что в образцах из стали Ст 3 после 90 суток выдержки в этой среде в условиях сахарного завода количество водорода увеличивается на $0,05 \text{ см}^3$ на каждые 100 г металла.

При добавке к диффузионному соку 0,2 % формалина интенсивность ГЭИ стали и чугуна уменьшается. При этом микротвердость их поверхностей увеличивается в 1,5...1,6 раза, что, вероятно, связано с образованием в присутствии формалина пленок продуктов коррозии с более высокими механическими свойствами [63].

На основании результатов проводимых исследований был сделан вывод о целесообразности применения литейных алюминиевых сплавов для работы в кислых средах сахарного производства. Рабочие колеса из силумина АЛ2 при перекачивании сокоотражечной смеси на Миронов-

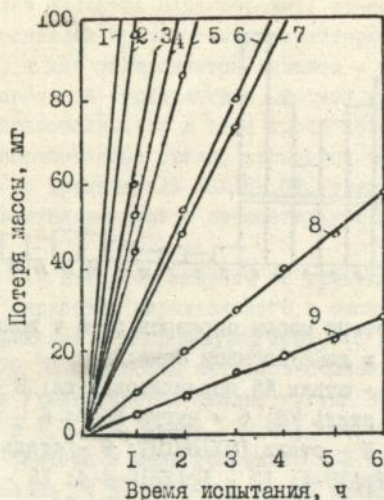


Рис. 15. Гидроэрозия металлов в известковом молоке:
 1 - чугун СЧ15; 2 - БрАЖН 10-4-4; 3 - сталь 10; 4 - сталь ЮХВН10Т; 5 - чугун ВЧ50; 6 - сталь 45; 7 - сталь У8;
 8 - сталь 45 закаленная; 9 - чугун отбеленный

ском сахарном заводе проработали 2 сезона без значительного износа, в то время как чугунные приходилось заменять из-за чрезмерного износа примерно через 150 суток работы. Высокая эрозионная стойкость колес из силумина выявлена при перекачивании кислых жомовых вод на Барском сахарном заводе [63]. Это позволило Кировоградскому заводу "Сахгидромаш" по нашей рекомендации перейти на производство насосов с рабочими колесами из алюминиевых сплавов взамен чугунных и внести также изменения в соответствующий ГОСТ.

2.5.2. Гидроэрозия металлов в щелочных технологических средах. К этим средам относятся: дефекованный, сатурированный и сульфитированный соки, содержащие в среднем около 15 % СХ и различное количество несахаров, и специфическая среда - известковое молоко. От других сред они отличаются не только коррозионной активностью, но и наличием абразивных примесей: SiO_2 , Al_2O_3 , $CaCO_3$ и др.

Эрозия металлов в этих средах происходит в результате многократного пластического переформирования поверхностных слоев частицами абразива. Их стойкость обуславливается в основном прочностными характеристиками и почти не зависит от антикоррозионных свойств [44]. Поэтому в соке I сатурации наибольшей стойкостью обладают закаленная и высокоотпущенная сталь и отбеленный чугуун. Эффективно применение термодиффузионных плазменных покрытий.

Сатурация сока заключается в обработке его углекислым газом CO_2 . Поэтому представляло интерес выяснить роль газа в эрозии металлов. Углекислый газ понижает водородный показатель газовой смеси до pH 6...6,5. Поэтому интенсивность изнашивания серого чугуна в среде "вода + CO_2 " с повышением содержания газа увеличивается. Вместе с тем, при невысокой степени кавитации, присутствующие в жидкости пузырьки газа выполняют демпфирующую роль и обеспечивают некоторую защиту металлов от кавитационной эрозии [102].

В сульфитированном соке, содержащем диоксид серы SO_2 , эрозия металлов несколько повышается из-за усиления коррозионного фактора [44, 51].

Разрушение в известковом молоке носит выраженный гидроабразивный характер с линейной зависимостью потери массы металла от его твердости и времени испытания (рис.15).

Для характеристики стойкости металлов при гидроабразивной эрозии в технологических средах с абразивом предложен коэффициент стойкости K:

$$K = \frac{1}{dG/d\tau}$$

где $dG/d\tau$ - скорость разрушения, пропорциональная тангенсу угла наклона кинетических кривых.

При соотношении твердости металла H_M к твердости абразива H_a меньше 0,6 зависимость в координатах K - H_M имеет линейный характер. При большем соотношении наблюдается отклонение от линейной зависимости [33].

2.6. Повышение гидроэрозионной стойкости деталей оборудования сахарных заводов

Анализ результатов исследования механизма ГЭИ металлов в КАС и технологических средах сахарного производства, большого числа изношенных деталей и натуральных испытаний позволяет наметить основные пути повышения их долговечности.

При решении этой задачи нужно исходить из того, что в ГЭИ участвует два фактора — механический и коррозионный. Их соотношение определяется в основном электрохимическими свойствами среды.

В кислых средах ведущими являются коррозионные процессы. Поэтому при работе в кислых технологических средах (диффузионный сок, кислые воды) следует повышать коррозионную стойкость деталей. Долговечность деталей в этих средах достигается выбором достаточнокоррозионностойких материалов, либо, в случае недостаточной коррозионной стойкости материала, применением защитных покрытий с высокой эрозионной стойкостью.

В щелочных средах, особенно с абразивными примесями, ведущим в ГЭИ является механический фактор. Поэтому повышения долговечности работающих в них деталей можно добиться применением для их изготовления материалов с более высокими механическими свойствами, главным образом, твердостью (высокоуглеродистые стали, отбеленный чугун), либо повышением их твердости упрочняющей обработкой.

Повышения долговечности деталей, подвергаемых ГЭИ, можно достичь также уменьшением энергии механического воздействия потока жидкости, например, конструктивными изменениями деталей; введением в рабочую среду ПАВ или ингибиторов коррозии; электрохимической защитой.

В условиях предприятий сахарной промышленности наиболее эффективными в повышении долговечности деталей является выбор материалов с необходимыми свойствами и их упрочняющая обработка или применение защитных покрытий.

При выборе материалов необходимо учитывать не только их механические и антикоррозионные свойства, но и структуру, а также возможность ее улучшения легированием, модифицированием, термообработкой. Например, эрозионная стойкость серых чугунов определяется не только механическими свойствами, но и формой, величиной и распределением графитных включений; то же можно отнести и к силумину.

Немаловажное значение имеют и экономические характеристики. В ряде случаев применение дорогостоящих и дефицитных коррозионностойких сталей, титановых сплавов, бронз не оправдано.

Как было сказано выше, например, в кислых средах весьма эффективным явилось применение литых алюминиевых и сплава АЗОХ16М. Изготовление из них рабочих колес многократно повысило долговечность центробежных насосов и дало значительный экономи-

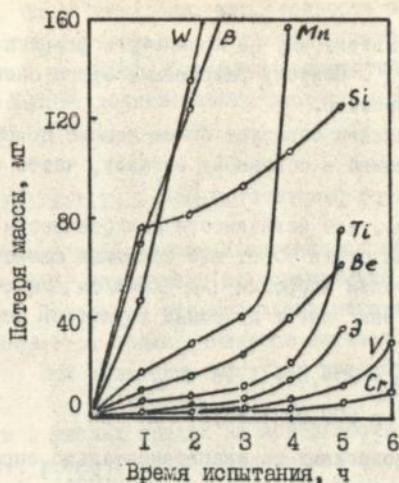


Рис. 16. Кинетика ГЭИ образцов из стали 45, подвергнутых термодиффузионному насыщению различными элементами (Э — эталонный образец без покрытия)

ческий эффект не только на сахарных заводах, но и других предприятиях пищевой промышленности.

В связи с тем, что разрушение при ГЭИ развивается в тонком поверхностном слое, объемная термообработка деталей (закалка и отпуск) во многих случаях малоэффективна, а для таких деталей, как рабочие колеса центробежных насосов, и трудно выполнима. А термодиффузионная обработка, как показали опыты даже снижает стойкость углеродистых сталей [82].

Более перспективным для повышения эрозионной стойкости деталей из углеродистых сталей и чугунов является поверхностное упрочнение химико-термической обработкой.

Испытания термодиффузионных покрытия показали (рис. 16), что при работе в воде наиболее эффективным методом повышения долговечности стали и чугуна является хромирование.

При хромировании в поверхностном слое деталей образуется зона карбидов за счет диффузии углерода из сердцевины детали. Поэтому к слое карбидов примыкает промежуточная зона, близкая

по строению к автектоиду из хромистого феррита и сложного карбида (Cr, Fe, C_3). Поэтому разрушение этого слоя происходит с минимальной скоростью.

Другие элементы образуют более тонкие покрытия, примыкающие непосредственно к основному металлу, часто обезуглероженому, поэтому быстро разрушаются [21].

Установлено, что зависимости долговечности $\bar{\tau}_g$ хромированного покрытия на стали 45 от его защитных свойств, характеризующих суммарным током коррозии i_k ($\mu A/cm^2$) и от глубины карбидной зоны h_k (μm) имеют линейный характер. Получены уравнения регрессии:

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_g &= 204,5 + 1,16 h_k \\ &= 999,09 + 33,87 i_k\end{aligned}$$

Эти уравнения позволяют по экспериментально определенным h_k и i_k рассчитать долговечность покрытия [90].

Установлено, что термодиффузионное хромирование повышает эрозионную стойкость и чугунных деталей. Их долговечность также определяется толщиной карбидного слоя и величиной тока коррозии и может быть определена по аналогичным приведенным уравнениям, несколько отличающимся коэффициентами [94].

В условиях ремонтного производства рекомендовано применение термодиффузионного хромирования в порошках. Этим способом получены карбидные слои на сталях 20 и 45 толщиной 30...35 μm и на чугуне СЧ18 - до 40 μm . При работе в нейтральном растворе стойкость стали 45 с таким покрытием повысилась в 6, а стали 20 и чугуна СЧ18 - в 2 раза [87].

Предложен новый способ интенсификации термодиффузионной обработки, в том числе и хромирования, защищенный авторским свидетельством [120]. Способ заключается в предварительном наводороживании поверхностного слоя деталей по установленным режимам. Как показали опыты, он позволяет увеличить толщину карбидной зоны в 1,4...3,8 раза и, кроме того, создать повышенные остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое. Благодаря этому, долговечность покрытий, полученных по предложенному способу, выше, чем у полученных традиционным способом. Предварительное наводороживание предложено применять также для повышения прочностных характеристик паяных соединений, что также подтверждено авторским свидетельством [122].

Перспективным в повышении долговечности деталей при работе в условиях ГЭИ могут стать также ионное азотирование и газотер-

мические покрытия. Опыт показал, что стойкость азотированных углеродистых сталей в нейтральных растворах повышается: стали 45 в 3 и стали 20 - в 6 раз [89]. Плазменные покрытия оксидом хрома, электрокорундом повышают долговечность рабочих колес центробежных насосов в 3...5 раз [105].

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Изучена роль коррозионного и механического факторов в процессах КМИ и ГЗИ в КАС, определено их соотношение в зависимости от рабочих режимов. Показано, что небольшие нагрузки на трущиеся детали (как и температура среды) являются активаторами электрохимических процессов; при повышении нагрузки возрастает роль механического фактора.

2. При трении в кислых средах на поверхности металлов образуются прерывистые, рыхлые, плохо соединенные с основой пленки вторичных структур. Являясь катодами по отношению к основному металлу, они увеличивают электрохимическую гетерогенность поверхности и ускоряют коррозионные процессы.

В щелочной среде эти пленки сплошные, прочные, хорошо экранируют поверхность трения и замедляют ее коррозию. Возникает положительный градиент механических свойств по глубине слоя, поэтому деформация в щелочной среде способствует упрочнению его в большей степени, чем в кислой.

3. Установлено, что при трении в кислой среде в поверхностном слое тормозится развитие объемной пластической деформации, повышается плотность дислокаций по сравнению с трением в воде, что активизирует коррозионные процессы и хрупкое его разрушение. В щелочной среде глубина зоны деформирования и плотность дислокаций достигает минимального значения, деформация локализуется в тонком поверхностном слое, упрочняет его, в результате разрушение этого слоя происходит путем диспергирования.

Увеличение сжимающих напряжений в поверхностном слое металла при трении в кислой среде интенсифицирует коррозионные процессы и вызывает его охрупчивание. В щелочной среде, в связи с большим пластифицированием, интенсивность разрушения определяется не характером, а величиной объемных напряжений; с их увеличением сопротивление поверхностного слоя повышается. Эти зависимости положены в основу разработки упрочняющих видов обработки деталей, работающих в КАС.

5. Сахароза в растворах замедляет коррозионные процессы, пластифицирует поверхности трения, уменьшает склонность металлов к схватыванию и тем самым - коэффициент и момент трения. В процессах ГЭИ, повышая плотность раствора, она усиливает механический фактор в разрушении металлов.

6. В кислых технологических средах (диффузионный сок) ведущим в изнашивании является коррозионный фактор, а в щелочных (дефекованные и сатурированные соки) - механический. Сахароза в этих средах, будучи ингибитором и пластификатором, уменьшает интенсивность изнашивания металлов, препятствует их схватыванию.

Концентрированные растворы сахарозы и несахаров (патоки) по своим смазочным свойствам не уступают минеральным маслам. Наличие кристаллов сахарозы (уфели) способствует развитию абразивных процессов.

7. В технологических средах с абразивными примесями (известковое молоко, фильтпрессная грязь, транспортно-мочные воды) ведущим при трении являются абразивные процессы, интенсифицируемые коррозионными.

8. Износ металлов в паре трения с мягкой сальниковой набивкой в технологических средах подчиняется тем же закономерностям, что и в паре металл-металл, и, кроме того, определяется в значительной степени напряженным состоянием сальникового уплотнения, количеством пропитки, величиной утечки уплотняемой жидкости.

9. Установлены зависимости ГЭИ от интенсивности микроударного воздействия жидкости, ее коррозионной активности, температуры, плотности, наличия сахарозы, несахаров, ПАВ-пенообразователей и пеногасителей, углекислого и сернистого газов, абразивных и других примесей.

10. Методами гентнографического анализа, ФМР и измерения микротвердости установлен циклический характер упрочнения, разупрочнения и разрушения поверхностного слоя при ГЭИ; показана кинетика этих процессов на основе дислокационной теории при воздействии сред различной коррозионной активности.

11. На основе потенциостатических исследований разработан метод количественной оценки интенсивности коррозионного процесса при ГЭИ в технологических средах сахарного производства по коррозионному току. Предложены схемы определения показателей эрозийной стойкости и расчета долговечности деталей оборудования с учетом соотношения интенсивностей коррозионного и механического факторов.

12. Сахароза в кислом растворе уменьшает интенсивность ГЭИ углеродистых сталей и чугунов, а коррозионностойких сталей и цветных сплавов - повышает. В щелочном растворе этот эффект противоположен.

13. В диффузионном соке износостойкость металлов при ГЭИ определяется коррозионными свойствами и не зависит от их механических свойств. В насыщенном соке, известковом молоке, фильтр-прессной грязи, в связи с наличием абразивных примесей, ведущим в изнашивании становится абразивный износ. Поэтому износостойкость металлов в этих средах определяется механическими свойствами, главным образом - твердостью.

14. Для повышения долговечности трущихся стальных деталей, работающих в кислых технологических средах сахарного производства, следует применять закалку с высоким отпуском, а в щелочных - закалку с низким отпуском, цементацию. В обоих случаях эффективными являются термодиффузионное хромирование и ионное азотирование.

Эффективными способами повышения ГЭ-стойкости деталей при работе в этих средах является поверхностное упрочнение термодиффузионными покрытиями.

15. Определены оптимальные режимы ионного азотирования, обеспечивающие максимальную долговечность упрочненного слоя стальных и чугунных деталей; получены уравнения регрессии, позволяющие по экспериментально определяемым характеристикам упрочненного слоя прогнозировать его долговечность.

16. Предложен способ интенсификации термодиффузионной обработки предварительным наводороживанием, позволяющий значительно повысить эффективность термодиффузионного хромирования и ионного азотирования в увеличении долговечности деталей.

Основные результаты работы реализованы на предприятиях сахарной промышленности с экономическим эффектом около 600 тыс.рублей в ценах до 1985 г.

Разработанные методики исследований и полученные результаты могут быть использованы и в других отраслях пищевой промышленности (хлебопекарной, кондитерской, крохмало-паточной и др.).

Материалы диссертации используются в учебном процессе.

4. ПУБЛИКАЦИИ

Монографии

1. Преис Г.А., Сологуб Н.А. Повышение долговечности деталей технологического оборудования сахарных заводов.-К.:Техника, 1966.- 139 с.

2. Преис Г.А., Сологуб Н.А., Некоз А.И. Повышение износоустойчивости оборудования пищевой промышленности.-М.:Машиностроение, 1979.-208 с.

3. Повышение долговечности оборудования пищевой промышленности./Н.П.Роменский, Н.А.Сологуб, Г.А.Преис и др.-К.:Урожай, 1989.-160 с.

Статьи, доклады

4. Преис Г.А., Сологуб Н.А. Анализ износа некоторых деталей оборудования свеклосахарных заводов // Труды КТИПП.-1960.-Вып.22.-С.56-68.

5. Преис Г.А., Сологуб Н.А. Продления срока службы клапанов плунжерных насосов для известкового молока //Сахарная промышленность.-1960.-# II.-С.48-49.

6. Преис Г.А., Сологуб Н.А. Перспективы применения капрона в оборудовании сахарных заводов //Сахарная пром-сть.-1960.-# 8.-С.12-16.

7. Сологуб Н.А. О сменных элементах быстроизнашивающихся деталей оборудования сахарных заводов //Сахарная пром-сть.-1960.-# 12.-С.46-49.

8. Преис Г.А., Сологуб Н.А. Применение капроновых шаров в клапанах плунжерных насосов //Машиностроение.Научн.-техн.сб. Укр.НИИТИ.-1960.-# 4.-С.97-99.

9. Сологуб Н.А. Анализ материалов трущихся деталей технологического оборудования сахарных заводов и условий их работы //Труды КТИПП.-1961.-Вып.24.-С.115-119.

10. Сологуб Н.А. Анализ износа деталей плунжерных насосов на сахарных заводах //Труды КТИПП.-1962.-Вып.25.-С.77-83.

11. Преис Г.А., Сологуб Н.А. Износ валов центробежных насосов прудовой воды //Изв.вузов. Пищевая технология.-1962.-# 6.-С.96-100.

12. Сологуб Н.А. Рационально расходовать цветные металлы на сахарных заводах //Сахарная пром-сть.-1962.-С.32-35.

13. Преис Г.А., Сологуб Н.А. Об износе деталей технологического оборудования сахарных заводов //Изв.вузов.Пищевая техно-

логия.-1963.- № 2.- С.119-122.

14. Сологуб Н.А. Исследование износа металлов в utfеле //Сахарная пром-сть.-1963.-№ II.-С.29-30.

15. Сологуб Н.А. Исследование износостойкости металлов в патоке //Труды КТИП. -1963.-Вып.27.-С.113-119.

16. Сологуб Н.А. Исследование износа металлов в известковом молоке //Сахарная пром-сть.-1964.-№ II.-С.35-37.

17. Сологуб Н.А. О влиянии сахарозы на изнашивание металлов //Сахарная пром-сть.-1965.-№ 3.-С.20-22.

18. Сологуб Н.А. Об износе металлов в сатурационном оске //Сахарная пром-сть.-1965.-№ 5.-С.27-27.

19. Сологуб Н.А., Преис Г.А. Исследование износостойкости металлов в некоторых средах свеклосахарного производства //IУ Киевская научн.-техн. конф. по вопросам повышения износостойкости и срока службы машин. К.:УкрНИИНТИ.-1966.-Вып. II.-С.89-97.

20. Сологуб Н.А. Износ металлов в растворах сахарозы //ФХМ .-1967.-№ 2.-С.193-196.

21. Некоз А.И., Сологуб Н.А. Влияние термодиффузионной обработки на гидроэрозийную стойкость стали //Сб."Технология и организация производства".УкрНИИНТИ.-1967.-№ 6.-С.108-104.

22. Смертяк Ю.Л., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Стенд для испытания сальниковых уплотнений //Там же.-С.108-109.

23. Сологуб Н.А., Штефан Б.П. О роли сахарозы в процессах трения и изнашивания //тез.докл.Всесоюз.конф."Повышение износостойкости и срока службы оборудования пищевой пром-сти".-К.-1968. Ч. I.-С.16-22.

24. Некоз А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Гидроэрозия металлов в растворах сахарозы //Там же.-С.102-108.

25. Некоз А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. О влиянии химической активности среды на гидроэрозия металлов //Там же.-С.109-118.

26. Смертяк Ю.Л., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Исследование напряженного состояния сальниковых уплотнений центробежных насосов //там же.-С.47-55.

27. Смертяк Ю.Л., Преис Г.А., Сологуб Н.А. О влиянии утечки жидкости на износ вала в сальниковом уплотнении //Там же.-С.69-74.

28. Смертяк Ю.Л., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Исследование сальниковых уплотнений при различных режимах работы //Там же.-С.62-68.

29. Некоз А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Влияние сахарозы на гидроэрозия стали // ФХМ.- 1968.-№ 5.- С.573-577.

30. Некоз А.И., Сологуб Н.А. Струеударная установка для

исследования гидроэрозионной стойкости металлов //Заводск.лаборатория.-1968.-№ 6.- С.762-763.

31. Сологуб Н.А. О расчете долговечности технологического оборудования //Сахарная пром-сть.-1968.-№ 7.-С.13-16.

32. Некоз А.И., Сологуб Н.А. Гидроэрозия металлов в диффузионном соке //Сахарная пром-сть.-1968.-№ 7.-С.17-18.

33. Некоз А.И., Сологуб Н.А. Гидроэрозионная стойкость металлов в известковом молоке //Сахарная пром-сть.-1968.-№ 8.-С.16-18.

34. Смертяк Ю.Л., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Прибор для определения износа образцов методом отпечатков //Заводская лаборатория.-1968.-№ II.-С.1402-1403.

35. Некоз А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. О гидроэрозии сталей в щелочной среде //ФХММ.-1969.-№ 5.-С.584-587.

36. Некоз А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. О гидроэрозии металлов в кислой среде //ФХММ.-1970.-№ 2.-С.109-111.

37. Сологуб Н.А., Штефан Б.П. О влиянии формалина на износостойкость металлов //Сахарная пром-сть.-1970.-№ II.-С.14-15.

38. Преис Г.А., Слынько А.И., Сологуб Н.А. О режимах исследования гидроабразивной эрозии наплавочных материалов в химически активных средах //Научн.-техн.конф."Современные методы наплавки и износостойкие наплавочные материалы".Харьков.-1970.-С.12-16.

39. Некоз А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. О роли среды в процессе гидроэрозии металлов //Повышение износостойкости и срока службы машин.К.:УкрНИИТИ.-1970.-Вып.Ш.-С.113-119.

40. Сологуб Н.А., Штефан Б.П. О склонности металлов к схватыванию в химически активных средах //Там же.-С.149-153.

41. Преис Г.А., Сологуб Н.А., Слынько А.И. Исследование гидроабразивной эрозии металлов //Тез.докл.семинара"Абразивный износ и повышение износостойкости деталей путем наплавки и напыления".-К.:1970.-С.52-53.

42. Преис Г.А., Сологуб Н.А., Штефан Б.П. Исследование некоторых электрических явления при трении металлов в химически активных средах //Пробл.трения и изнашивания.Респ.межвед.научн.-техн.сб.-1971.-Вып.1.-С.110-113.

43. Слынько А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. О гидроэрозии металлов в кислых средах //ФХММ.-1971.-№ 6.-С.109-110.

44. Некоз А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Исследование гидроэрозионной стойкости материалов в технологических средах свекло-сахарного производства //Рефер.информ. о законченных научн.-исслед. работах в вузах УССР. Пищевая пром-сть.-1971.-Вып.5.-С.26.

45. Сологуб Н.А., Штефан Б.П. Износостойкость металлов в диффузионном соке // Там же. - С. 27-28.

46. Некоз А.И., Сологуб Н.А., Преис Г.А. О влиянии среды на гидроэрозию металлов // Материалы У Всесоюзной конф. по физ.-хим. механике. Уфа. :-1971. - С. 103-104.

47. Преис Г.А., Слынько А.И., Сологуб Н.А. Методика исследования гидроабразивного изнашивания металлов в агрессивных средах // Тез. докл. Всесоюз. научн. совещания по абразивному изнашиванию. М. :-1971. - С. 45-46.

48. Преис Г.А., Слынько А.И., Сологуб Н.А. Влияние химической активности сред на процесс гидроабразивного изнашивания металлов // Там же. - С. 73-74.

49. Слынько А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Гидроабразивное изнашивание металлов в щелочных средах // ФХММ. -1972. - № 2. - С. 9-14.

50. Преис Г.А., Сологуб Н.А., Штефан Б.П. О влиянии режимов термообработки на износостойкость стали в агрессивных средах // Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. научн.-техн. сб. -1972. - Вып. 2. - С. 102-104.

51. Слынько А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Гидроабразивная эрозия центробежных насосов свеклосахарных заводов // Рефер. информ. о законченных научн.-исслед. работах в вузах' УССР. Пищевая пром-сть. -1972. - Вып. 6. - С. 30.

52. Слынько А.И., Сологуб Н.А. О влиянии угла атаки на интенсивность гидроабразивной эрозии в агрессивных средах // Известия вузов. Машиностроение. -1973. - № 1. - С. 186-188.

53. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. О влиянии коррозионноактивных сред на дислокационную структуру при трении скольжения твердых тел // Пробл. трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб. -1973. - Вып. 4. - С. 40-46.

54. Некоз А.И., Слынько А.И., Сологуб Н.А. О роли водорода в эрозионном изнашивании металлов // Там же. - С. 149-151.

55. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Электрохимический метод регулирования деформации поверхностных слоев металла // Тез. докл. респ. семинара "Разработка и применение технологических смазок" -Е. :-1973. - С. 23-24.

56. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Влияние активных жидких сред на процессы деформирования металлов // Там же. - С. 24-25.

57. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Исследование износостойкости металлов в коррозионно-активных средах // Тез. докл.

Всесоюз. конф. физ.-хим. механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия". К. : -1973. -С. 63-64.

58. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Электрохимический метод повышения износостойкости металлов в коррозионно-активных средах // Там же. -С. II7.

59. Преис Г.А., Слынько А.И., Сологуб Н.А. О механизме гидро-абразивного изнашивания железоуглеродистых сплавов в щелочных средах // Там же. - С. 59.

60. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. О комплексном исследовании коррозионно-механического изнашивания // Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. научн.-техн. сб. -1974. -Вып. 5. -С. 51-59.

61. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Роль напряженного состояния и коррозионно-активных сред в формировании дислокационной структуры твердых тел при трении скольжения // Там же. -С. 14-22.

62. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Поляризация как метод регулирования коррозионно-механического изнашивания // Сб. "Электрохимические процессы при трении и использование их для борьбы с износом". Одесса. : -1973. -С. II8-122.

63. Преис Г.А., Слынько А.И., Сологуб Н.А. Об изнашивании центробежных насосов пищевых производств // Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. научн.-техн. сб. -1974. -Вып. 6. -С. 102-105.

64. Некоз А.И., Слынько А.И., Сологуб Н.А. Перспективы применения титановых сплавов для деталей насосов свеклосахарных заводов // Рефер. информ. о законченных научн.-исследов. работах в вузах СССР. Пищевая пром-сть. -1974. -Вып. 8. -С. 54-55.

65. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. К вопросу о механизме коррозионного износа // Там же. -С. 63.

66. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Влияние поляризации на характер деформирования поверхностей трения в коррозионно-активных средах // Там же. -С. 63-64.

67. Основные пути повышения долговечности оборудования, работающего в технологических средах пищевой промышленности / Г.А. Преис, Н.А. Сологуб, А.И. Некоз и др. // Тез. докл. VI всесоюз. конф. по физ.-хим. механике конструкционных материалов. -Львов. -1974. -С. 101-102.

68. Портер А.И., Преис Г.А., Сологуб Н.А. Влияние электрохимических процессов на субмикроструктуру поверхности трения // Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. научн.-техн. сб. -1975. -Вып. 7. -С. 59-65.

69. Портер А.И., Преяс Г.А., Сологуб Н.А. Установка для исследования коррозионно-механического изнашивания металлов // Там же. - 1975. - Вып. 8. - С. 31-35.

70. Смертьяк Ю.Л., Сологуб Н.А. Установка для исследования износостойкости металлов в паре трения с сальниковой набивкой // Там же. - 1976. - Вып. 9. - С. 44-45.

71. Портер А.И., Преяс Г.А., Сологуб Н.А. Влияние заряда поверхности металлов на процессы упрочнения // Там же. - С. 50-53.

72. Физико-химические процессы коррозионно-механического изнашивания металлов в паре со сталью / А.И. Портер, Г.А. Преяс, Н.А. Сологуб и др. // ФХММ. - 1976. - № 2. - С. 72-77.

73. Слынько А.И., Преяс Г.А., Сологуб Н.А. Гидроабразивное изнашивание металлов в химически активных средах // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещания "Износ металлов при ударном воздействии твердых частиц. М. - 1976. - С. 48-49.

74. Портер А.И., Преяс Г.А., Сологуб Н.А. О коррозионно-механическом изнашивании металлов // Пробл. трения и изнашивания. Респ. научн.-техн. сб. - 1977. - Вып. 12. - С. 3-7.

75. Сологуб Н.А., Портер А.И. Особенности влияния коррозионно-активных сред на субмикроструктуру поверхности трения // Тез. докл. VI Респ. конференции "Повышение износостойкости и срока службы машин". К.: УкрНИИТИ. - 1977. - Вып. 1. - С. 18.

76. Смертьяк Ю.Л., Сологуб Н.А. Износостойкость металлов в паре трения с мягкой сальниковой набивкой // Там же. - Вып. 2. - С. 30-31.

77. Некоз А.И., Преяс Г.А., Сологуб Н.А. Кавитационно-эрозивное изнашивание металлов в коррозионно-активных средах // Трение и износ. - 1981. - № 4. - С. 596-604.

78. Новицкий А.Е., Сологуб Н.А. Микротрибометр для исследования электрохимических процессов при деформации поверхностного слоя металлов // Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. научн.-техн. сб. - 1981. - Вып. 19. - С. 58-60.

79. Смертьяк Ю.Л., Сологуб Н.А. Об износе валов центробежных насосов // Там же. - С. 97-98.

80. О роли коррозионного фактора при кавитационно-эрозивном изнашивании / В.И. Белий, А.И. Некоз, Н.А. Сологуб и др. // Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. научн.-техн. сб. - 1982. - Вып. 21, С. 73-76.

81. Сологуб Н.А., Некоз А.И., Стечишин М.С. Метод определения износостойкости материалов при кавитационно-эрозивном изна-

шивании //Тез.докл. Всесоюзн. конф. "Повышение эффективности использования автотранспорта. Ташкент.-1982.-С.67-68.

82. Некоз А.И., Стечишин М.С., Сологуб Н.А. Влияние термодиффузионной обработки на кавитационно-эрозионную стойкость стали 45 //Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. научн.-техн. сб.-1983.-Вып. 23.-С.87-90.

83. Определение износостойкости материалов при кавитационно-эрозионном изнашивании /Некоз А.И., Стечишин М.С., Сологуб Н.А. и др.//Там же.-Вып. 24.-С.97-103.

84. Некоз А.И., Сологуб Н.А., Стечишин М.С. Оценка коррозионного фактора при ускоренных испытаниях на кавитационно-эрозионное изнашивание //Тез.докл. Уральской конф. "Пути повышения надежности и ресурса систем машин. Свердловск.-1983.-С.99.

85. Некоз А.И., Стечишин М.С., Сологуб Н.А., Безыкорнов А.И. Взаимосвязь коррозионной и кавитационной стойкости термодиффузионнохромированных сталей в солевых растворах //Тез.докл. III Респ. научн.-техн. конф. "Новые коррозионностойкие металлические сплавы". К. :-1983.-С.9-10.

86. Анализ соотношения коррозионного и механического факторов при кавитационно-эрозионном изнашивании /А.И.Некоз, Н.А.Сологуб, М.С.Стечишин и др.//ФХММ.-1984.-В 2.-С.110-111.

87. Некоз А.И., Сологуб Н.А., Стечишин М.С. Методы повышения долговечности деталей, подверженных кавитационно-эрозионному изнашиванию //Пищевая пром-сть.-1984.- В 2.-С.33-34.

88. Сологуб Н.А., Каплун В.Г., Рудык А.Е. Износостойкость стали 45 в кислой среде //Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. научн.-техн. сб.-1984.-Вып. 25.-С.32-35.

89. Некоз А.И., Каплун В.Г., Стечишин М.С., Сологуб Н.А. Влияние ионного азотирования на кавитационно-эрозионную стойкость конструкционных сталей в солевых растворах //Там же.-С.36-38.

90. Некоз А.И., Стечишин М.С., Сологуб Н.А. Влияние термодиффузионнохромированных покрытий на кавитационно-эрозионную стойкость стали 45 в растворе NaCl //Там же.-Вып. 26.-С.22-26.

91. Сологуб Н.А., Каплун В.Г., Рудык А.Е. Износостойкость азотированной стали 45Х в кислой среде//Там же.-Вып. 26.-С.29-32.

92. Некоз А.И., Слынько А.И., Сологуб Н.А. Оценка долговечности гидрооборудования методом ускоренных испытаний //Тез.докл. Уральской конф. "Расчет и управление надежностью больших механических систем". Свердловск.-1984.-С.120-121.

93. Изменение свойств поверхностного слоя металла при ультразвуковом микроударном воздействии жидкости /А.И.Некоз, Н.А.Сологуб, В.И.Белый и др.//Тез.докл. Международного симпозиума "Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения.К.:Наукова думка.-1984.-С.128-129.

94. Некоз А.И., Стечишин М.С., Сологуб Н.А. Влияние термодиффузионно-хромированных покрытий на кавитационно-эрозионную стойкость чугуна СЧ 18 в растворе NaCl //Пробл.трения и изнашивания. Республ.межвед. научн.-техн.сб.-1985.-Вып.27.-С.43-48.

95. Сологуб Н.А., Рудык А.Е., Безыкорнов А.И. Повышение износостойкости стали 45X азотированием //Там же.-1985.-Вып.28.-С.59-63.

96. Каплун В.Г., Рудык А.Е., Сологуб Н.А. Исследование остаточных напряжений в азотированной стали 38ХМФА //Электронная обработка материалов.-1986.-№ 5.-С.35-37.

97. Сологуб Н.А., Каплун В.Г., Рудык А.Е. Планирование эксперимента при изучении ионного азотирования стали 45X //Пробл. трения и изнашивания. Респ.межвед.научн.-техн.сб.-1986.- Вып.29. - С.33-36.

98. Сологуб Н.А., Каплун В.Г., Рудык А.Е. Корреляционные связи между свойствами азотирования стали // Там же.- Вып.30.- С. 38-41.

99. Сологуб Н.А., Каплун В.Г., Рудык А.Е. и др. Исследования долговечности азотированных в тлеющем разряде защитных втулок насосов С0Т //Сахарная пром-сть.-1987.-№ 2.- С.40-42.

100. Рудык А.Е., Сологуб Н.А., Стечишин М.С. Применение ионного азотирования для повышения долговечности прицепных пальцев цепи свеклоэлеватора //Сахарная пром-сть.-1987.-№11.-С.55-57.

101. Сологуб Н.А., Каплун В.Г., Рудык А.Е. Зависимость износостойкости и коррозионной стойкости стали 45X в щелочной воде от параметров ионного азотирования //Пробл. трения и изнашивания. Респ.межвед. научн.-техн.сб.-Вып. 31.-С.62-66.

102. Кондрат Э., Некоз А.И., Сологуб Н.А. Кавитационно-эрозионное изнашивание металлов в среде вода-углекислый газ // Там же.- Вып.32.- С.52-54.

103. Кондрат Э., Некоз А.И., Сологуб Н.А. Определение кавитационно-эрозионной стойкости металлов в коррозионных средах пищевых производств //Пробл.трения и изнашивания. Респ.межвед. научн.-техн.сб.-1988.-Вып. 34.-С.28-30.

104. Рудык А.Е., Сологуб Н.А., Стечишин М.С. Оптимизация из-

носостойкости стали в щелочной воде // Там же. - 1989. - Вып. 36. - С. 18-19.

105. Повышение износостойкости некоторых деталей оборудования сахарных заводов / Сологуб Н.А., Сухенко Ю.Г., Малыгин А.И. и др. // Тез. докл. Респ. конф. "Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК". Киев. - 1989. - С. 251.

106. Сологуб Н.А., Рудык А.Е., Стечишин М.С. Повышение ресурса центробежных насосов, работающих в условиях коррозионно-механического изнашивания // Там же. - С. 245.

107. Н.А. Сологуб, А.Д. Клык. Износостойкость термобработанных и борированных сталей в гидролизате производства пектина // Там же. - С. 252-253.

108. Кавитационно-эрозийная стойкость дуралюминия после лазерной обработки / М.С. Стечишин, А.И. Некоз, А.Е. Рудык, Н.А. Сологуб // Пробл. трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб. - 1990. - Вып. 37. - С. 43-44.

109. Износостойкость термобработанных и борированных сталей в кислой среде / Н.А. Сологуб, А.Д. Клык, А.И. Безыкорнов и др. // Там же. - С. 45-49.

110. Сологуб Н.А., Некоз А.И., Рудык А.Е., Стечишин М.С. Методика исследования износостойкости материалов в коррозионно-активных средах // Пробл. трения и изнашивания. Респ. межвед. сб. - 1990. - Вып. 38. - С. 24-28.

111. Сологуб Н.А., Карпович И.С., Клык А.Д. Коррозионно-механическое изнашивание стали 12Х18Н10Т в кислых средах пектинового производства // Там же. - С. 52-55.

112. Сологуб Н.А., Некоз А.И., Рудык А.Е., Стечишин М.С. Износостойкость металлов в кислой среде // Там же. - 1991. - Вып. 39. - С. 12-17.

113. Рудык А.Е., Сологуб Н.А. Долговечность азотированных деталей при работе в конденсате выпарных аппаратов // Там же. - 1991. - Вып. 40. - С. 19-22.

114. Выбор газотермических покрытия для упрочнения дисков диффузионных аппаратов типа ЦДС-20 / А.И. Безыкорнов, Ю.Г. Сухенко, Н.А. Сологуб и др. // Тез. докл. Респ. научн.-техн. конф. "Разработка и внедрение высокоэффективной технологии, оборудования в пищевую промышленность и перерабатывающие отрасли АПК". К.: 1991. - С. 539-540.

115. Сологуб Н.А., Некоз А.И., Рудык А.Е., Стечишин М.С. Износостойкость азотированных деталей в транспортно-мощной

воде свеклосахарного производства //Пробл. трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб. -1992.-Вып. 41.-С. 12-15.

116. Некоз А.И., Сологуб Н.А., Кондрат З., Погодаев А.И.

Применение положений механики кавитационного изнашивания для изучения гомогенизации и эмульгирования жидкостей //VIII конференция крајова. Механика ртynow. PAN. - Białostok - 1988.-s. 23-28.

117. Kondrat Z., Sologub N.A., Niekoz A.I. Badania erozyjno-kawitacyjnej odpornosci wibranych materialow konstrukcyjnych na stanowisku prętywowym //Materiały II Krajowej konfer. korosyjnej. T.1.- A1 N. Krakow. - 1986.-s. 293 - 297.

III. Изобретения

118. Преяс Г.А., Смертяк Ю.Л., Сологуб Н.А. Уплотнение вращающегося вала /А.С. № 327353, СССР. Б.И. - 1972. № 5

119. Преяс Г.А., Некоз А.И., Сологуб Н.А. Способ исследования гидроэрозийной стойкости металлов /А.с. № 342103, СССР. Б.И.- 1972. № 19.

120. Некоз А.И., Стечишин М.С., Сологуб Н.А. Способ хромирования изделия из стали и чугуна /А.с. № 1277633, СССР - 1986.

121. Некоз А.И., Сологуб Н.А., Стечишин М.С. и др. Способ комбинированной обработки стальных и чугунных изделий /А.с. № 1324334, СССР- 1987.

122. Некоз А.И., Косенко В.А., Сологуб Н.А. и др. Способ паяки металлов /А.с. № 1328100, СССР. Б.И.- 1987. № 29.

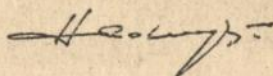
123. Каплун В.Г., Рудык А.Е., Некоз А.И., Сологуб Н.А. и др. Экспресс-контроль определения содержания азота в азотированном слое деталей /А.с. № 1378416, СССР.- 1987.

124. Некоз А.И., Сологуб Н.А., Кондрат З и др. Способ исследования гидроэрозийной стойкости металлов /А.с. № 1569668, СССР. Б.И.- 1990.- № 21.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
Общая характеристика работы	I
Содержание работы	7
Введение	7
I. Коррозионно-механическое изнашивание металлов и деталей в технологических средах сахарного производства ...	8
I.1. Методика исследований	8
I.2. КМ-изнашивание металлов в коррозионно-актив- ных средах	9
I.2.1. Количественные и качественные параметры про- цессов трения и изнашивания металлов	9
I.2.2. Свойства поверхностных пленок вторичных структур	II
I.2.3. Характер деформирования и разрушения поверхностных слоев при трении	12
I.2.4. Возможности управления характером деформи- рования и разрушения поверхностных слоев при трении	14
I.3. КМ-изнашивание металлов и деталей в техноло- гических средах сахарного производства	15
I.3.1. Роль сахарозы и несахаров в процессе трения и изнашивания металлов	15
I.3.2. Изнашивание металлов и деталей в технологи- ческих средах сахарного производства	17
I.3.3. Износостойкость валов центробежных насо- сов в сальниковом уплотнении	22
I.4. Повышение износостойкости деталей технологи- ческого оборудования сахарного производства	24
2. Гидроэрозионное изнашивание металлов и деталей в технологических средах сахарного производства	29
2.1. Методика исследований	29
2.2. ГЭ-изнашивание металлов в коррозионно-активных средах	30
2.3. Влияние сахарозы и несахаров на ГЭ-изнаши- вание металлов	33
2.4. Влияние абразивных примесей на ГЭ-изнашива- ние металлов	35
2.5. ГЭ-изнашивание металлов и деталей в техноло- гических средах сахарного производства	36

2.6. Повышение гидроэрозионной стойкости деталей оборудования сахарных заводов	39
3. Основные результаты и выводы	43
4. Публикации	46



100031

AB 26.497