

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТАЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ЗАЦЕПЛЕНИЙ В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

А.В. Назаров, А.В. Безносков

Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород



Приводятся результаты экспериментальных исследований ресурсных испытаний цилиндрических зубчатых зацеплений с эвольвентным профилем, и гидродинамических подшипников (ГДП), изготовленных из конструкционных сталей в свинце. Цель работы – изучение влияния характеристик свинцового теплоносителя (температуры, содержания примеси кислорода), условий работы зацепления (скорости вращения, нагрузки) материала и конструктивного выполнения зацепления на его работоспособность. Исследования проводились при температуре свинца 400–550°C, контролируемом содержании термодинамически активного кислорода в свинце, окружной скорости шестерни и колеса на делительной окружности 4,7–0,6 м/с, величине контактного напряжения в зацеплении 591–758 МПа. Подтверждена возможность работы зубчатых зацеплений в среде свинца.

ВВЕДЕНИЕ

Возросший интерес к использованию свинцового и свинец-висмутового теплоносителей в ядерных энергетических установках инициирует работы по созданию механизмов, работающих в этих теплоносителях. В главных циркуляционных насосах энергетических контуров, во вспомогательных насосах обслуживающих систем (осевых, центробежных, шестеренчатых, лабиринтно-винтовых), в механизмах систем управления и защиты реакторов, механизмах перегрузки ядерного топлива имеются рабочие узлы со взаимно перемещающимися поверхностями в среде жидкого металла. Работоспособность и надежность гидростатических подшипников (ГСП) и ГДП, зубчатых зацеплений и т.п. наряду с другими факторами, определяется физико-химическими характеристиками теплоносителей, в среде которых они работают.

Свинец и эвтектика свинец-висмут позволяют в рабочих условиях создать и поддерживать на поверхностях конструкционных материалов оксидные защитные покрытия. Они защищают материалы от коррозионного износа и, одновременно, существенно снижают коэффициенты трения, по сравнению с незащищенными поверхностями, уменьшая адгезионное взаимодействие поверхностей. При движении контактирующих поверхностей относительно друг друга в рассматриваемых теплоносителях возможно наличие между ними слоя жидкого металла, толщина которого больше суммарного размера микронеровностей. При кратковременном касании оксидированных поверхностей выделяющееся при этом тепло интенсивно отводится теплоносителем, под уровнем которого находятся поверхности.

© А.В. Назаров, А.В. Безносков, 2006

Сочетание условий взаимодействия оксидированных контактирующих поверхностей, постоянно или периодически разделяемых слоем жидкого металла с интенсивным отводом тепла последним из этой зоны, является благоприятным для работы трущихся пар.

НАПРАВЛЕНИЕ РАБОТЫ

В Нижегородском государственном техническом университете проводятся исследования влияния характеристик свинцового и свинец-висмутового теплоносителей (температуры, содержания примеси кислорода), состава защитного газа, условий работы зацепления (числа оборотов, условий нагрузки) материала и конструктивного выполнения зацепления на его работоспособность. Одновременно исследуются условия обеспечивающие работу ГДП.

Фотография и схема экспериментального участка представлены на рис. 1.

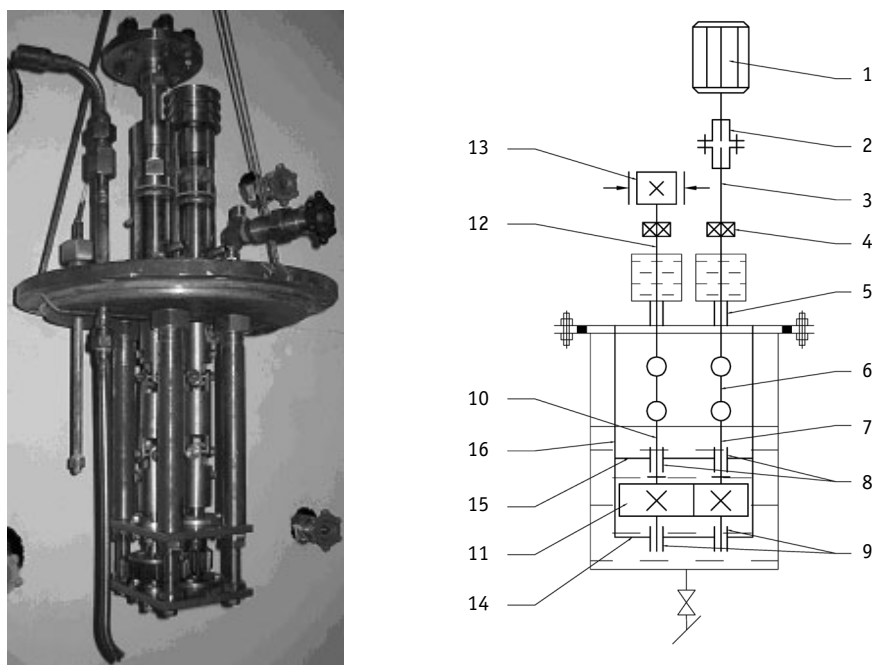


Рис. 1. Экспериментальный участок: а) – фотография; б) – схема: 1 – электродвигатель; 2 – муфта пальчиковая; 3 – вал привода шестерни; 4 – радиально-осевой шарикоподшипник; 5 – радиальный подшипник скольжения; 6 – карданный вал; 7 – шестерня; 8 – радиально-упорный ГДП; 9 – радиальный ГДП; 10 – вал колеса; 11 – колесо; 12 – вал тормоза; 13 – ленточный тормоз; 14 – нижняя опорная плита; 15 – верхняя опорная плита; 16 – штанга крепления

Рабочие условия испытаний: свинец при температуре 400–550°C, с контролируемым содержанием термодинамически активного кислорода. Защитный газ – аргон, водород, аргоно-водородная смесь, аргоно-кислородная смесь. Передача – прямозубая, цилиндрическая, наружного зацепления. Диапазон скорости вращения шестерни $n = (100\text{--}3500)$ об/мин, при контактных напряжениях в зацеплении $\sigma_H = (295\text{--}920)$ МПа. Межосевое расстояние зубчатых зацеплений 50 мм. Материал шестерни, колеса – конструкционные стали.

ПЕРВЫЙ ЭТАП ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Из-за отсутствия информации об аналогичных исследованиях, на первом этапе ставилась задача получения начальных данных, на основании которых корректиро-

вались условия проведения последующих этапов. На первом этапе были выбраны следующие параметры зацепления и характеристики испытаний: модуль зубьев $m = 3$; скорость вращения шестерни $n_1 = 3000$ об/мин, колеса $n_2 = 1500$ об/мин (окружная скорость шестерни и колеса на делительной окружности $v = 4.71$ м/с); передаточное число $u = 2$; материал шестерни и колеса сталь 40Х; материал втулок ГДП шестерни и колеса – сталь 12Х18Н10Т, материал вала шестерни – 40Х, колеса 12Х18Н10Т. Контактное напряжение в зацеплении $\sigma_H = 591$ МПа. Рабочая среда – свинец с температурой 450°C ; с содержанием кислорода $a = 10^0$ (на линии насыщения).


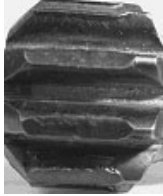




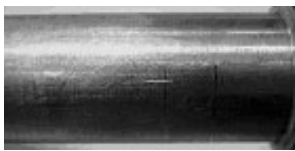

Через 7 ч испытаний, что соответствовало числу контактов зубьев шестерни $N_{ш} = 1.260.000$ и колеса $N_k = 630.000$, произошло заклинивание зацепления. Последующая ревизия зацепления (табл. 1) показала, что заклинивание вызвано увеличением межосевого расстояния зацепления вследствие износа подшипников.

Зафиксирован износ цапфы вала ГДП колеса с парой трения из стали 12Х18Н10Т–12Х18Н10Т от исходного диаметра 15 мм до 10 мм, что составило 33% исходного значения. Поверхность цапфы вала ГДП колеса равномерно покрыта дефектами шириной 0.3–0.5 мм длиной до 1 мм и глубиной около 0.04 мм, по форме напоминающими вырывы чешуек материала с поверхности вала, что, вероятно, свидетельствует о изнашивании при заедании.

Зафиксирован износ цапфы вала ГДП шестерни с парой трения из стали 40Х–12Х18Н10Т от исходного диаметра 20 мм до 19 мм, что составило 5% исходного значения. Большая часть поверхности цапфы вала ГДП шестерни покрыта дефектами в виде кольцевых борозд (канавок) шириной 0.2–0.4 мм и глубиной до 0.2 мм.

Таблица 1

Фотографии зубчатых колес и ГДП до и после проведения экспериментов

Узел	До эксперимента	После эксперимента
Шестерня		
Колесо		
Цапфа вала ГДП шестерни		
Цапфа вала ГДП колеса		

Износ зубьев шестерни и колеса, в основном, обусловлен изменением (увеличением) межосевого расстояния в зацеплении.

Полученные результаты явились основанием для уменьшения скорости вращения элементов зацепления и изменению материала пар трения ГДП в процессе последующих испытаний.

ВТОРОЙ ЭТАП ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На втором этапе были выбраны следующие параметры зацепления и характеристики испытаний: модуль зубьев $m = 2$; скорость вращения шестерни $n_1 = 1000$ об/мин, колеса $n_2 = 667$ об/мин (окружная скорость шестерни и колеса на делительной окружности $v = 2.1$ м/с); передаточное число $u = 1.5$; материал шестерни и колеса сталь 40X13; втулок ГДП шестерни и колеса – сталь 40, материал вала шестерни и колеса сталь 40. Контактное напряжение в зацеплении $\sigma_H = 758$ МПа. Рабочая среда – свинец с температурой 450°C , с содержанием кислорода $a = 10^0$ (на линии насыщения). Через 140 ч испытаний, что соответствовало числу контактов зубьев шестерни $N_{\text{ш}} = 8.400.000$ и колеса $N_{\text{к}} = 5.602.800$, произошло заклинивание зацепления. Последующая ревизия зацепления (табл. 2, 3) показала, что заклинивание произошло вследствие износа и пластической деформации вершин зубьев шестерни. Характер изменения геометрии зубьев шестерни через 1.680.000, 3.120.000, 6.000.000 циклов их нагружения во время проведения второго этапа эксперимента показан в табл. 2.

Таблица 2

Характер износа зубьев шестерни на втором этапе эксперимента

Время работы зацепления	1.680.000 циклов нагружения	3.120.000 циклов нагружения	6.000.000. циклов нагружения
Характер износа зуба шестерни			

Произошел износ цапфы вала ГДП шестерни с парой трения из стали Сталь 40–Сталь 40 от исходного диаметра 39.7 мм до 39.4 мм, что составило 1% исходного значения.

Обнаружен износ цапфы вала ГДП колеса с парой трения из стали Сталь 40–Сталь 40 от исходного диаметра 39.6 мм до 38.6 мм, что составило 3% исходного значения.

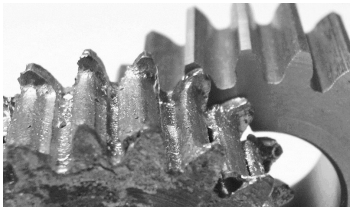



Характер повреждения рабочей поверхности: вала шестерни – кольцевые борозды шириной в основном 0.08–0.12 мм и глубиной 0.06–0.1 мм (фиксировались единичные кольцевые канавки шириной до 1 мм и глубиной до 0.2 мм), вырывы (углубления) максимальными размерами 0.2×0.2 мм, глубиной до 0.02 мм; вала колеса – кольцевые борозды шириной до 1.5 мм и глубиной до 0.5 мм.

Фотографии зубчатых колес и цапф валов ГДП до и после проведения второго этапа эксперимента представлены в табл. 3.

Сформированные до проведения эксперимента оксидные защитные покрытия на поверхностях зубьев разрушились, вероятно, в первые часы испытаний. Возможной причиной износа шестерни и колеса явилось истирание оксидных пленок на поверхностях зубьев, что привело к коррозионному воздействию жидкого металла на твердый, росту адгезивного взаимодействия поверхностей зубьев.

Таблица 3

**Фотографии зубчатых колес и цапф валов
ГДП до и после проведения второго этапа
эксперимента**

Узел	Фотографии
Шестерня	
Колесо	
Цапфа вала ГДП шестерни	
Цапфа вала ГДП колеса	

Следует отметить, что очистка свинца в проведенных экспериментах производилась посредством механического удаления с зеркала теплоносителя оксидов свинца и оксидов конструкционных материалов, оксидов: Fe, Gr, Ni, Ti. Предположительно в результате первого этапа эксперимента концентрация растворенных компонентов конструкционных материалов в свинце достигла состояния насыщения (продукты износа зацепления и подшипников), концентрация свободного кислорода в свинце снижалась за счет их окисления. Это должно было бы фиксироваться датчиками активности кислорода, выполненных в виде гальванических концентрационных элементов. Показания двух независимых датчиков свидетельствовали о насыщении теплоносителя кислородом. На втором и третьем этапах эксперимента после прекращения работы зацепления и вскрытия емкости поверхность свинца была полностью закрыта пленкой зеленоватого цвета, вероятно, оксидом хрома, местами покрытой бурым мелкодисперсным магнитным порошком – оксидом железа. В этих условиях фиксировалась активность кислорода в свинце на уровне его насыщения или близком к нему. Перед проведением исследований на втором и третьем этапах эксперимента

оксидирование производилось при помощи барботажа пара с температурой 120°C вводимого под зубчатое зацепление, в объем свинца.

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЬЕВ

В процессе этого и последующих этапов испытаний с целью промежуточного контроля состояния зубьев производились периодические (через 24–100 ч работы зацепления) остановки работы стенда, его расхолаживание и операции неразрушающего контроля геометрии зубьев зацепления. Контроль производился путем замеров ширины зубьев на делительной окружности и замеров площади зубьев, при помощи снятия с них отпечатков, вдавливанием в расплавленную сургучную массу, после застывания и механической обработки которой получался слепок. Далее проводилась цифровая фотосъемка торца слепка, обработка полученного изображения, измерение характерных размеров зуба по масштабированной фотографии слепка.

Фотография общего вида слепков зубьев шестерни и колеса представлена на рис. 2.

После проведения этих замеров происходила сборка установки и ввод ее в работу.

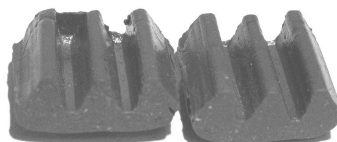


Рис. 2. Фотография общего вида слепков зубьев шестерни и колеса

ТРЕТИЙ ЭТАП ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью последующих исследований являлось определение условий работы зацепления, при которых на рабочих поверхностях шестерни и колеса сохраняются (либо не разрушаются, либо доформируются) оксидные защитные покрытия.

Последующие испытания на третьем этапе проводились с условиями аналогичными второму этапу эксперимента. Основное отличие этого эксперимента заключалось в ступенчатом изменении скорости вращения шестерни в интервале 750–300 об/мин ($n_1 = 750$ об/мин, $v = 1.57$ м/с; $n_1 = 700$ об/мин, $v = 1.47$ м/с; $n_1 = 600$ об/мин, $v = 1.26$ м/с; $n_1 = 500$ об/мин, $v = 1.05$ м/с; $n_1 = 300$ об/мин, $v = 0.63$ м/с). Было определено, что при числах оборотов шестерни менее или равной 500 об/мин фиксируется не смачивание поверхностей зацепления свинцовым теплоносителем. При числах оборотов шестерни 600 об/мин наблюдается частичное смачивание трущихся поверхностей зубьев. Увеличение числа оборотов до 700–750 об/мин приводило к полному разрушению оксидных покрытий, смачиванию рабочих поверхностей жидким металлом.

Суммарное время работы зацепления в процессе третьего этапа испытаний составило 514 ч, число циклов контакта зубьев шестерни $N_{ш} = 16.473.000$, число циклов контакта зубьев колеса $N_{к} = 10.982.000$. На момент прекращения испытаний заклинивание зацепления не произошло, несмотря на то, что часть времени зацепление проработало со смоченными поверхностями зубьев.

На рис. 3 представлены зависимости изменения относительной площади поперечного сечения зуба шестерни в течение второго этапа испытаний – при числе оборотов шестерни 1000 об/мин, и во время третьего этапа испытаний с указанием скорости вращения шестерни, времени работы на этой скорости (в процентах от времени эксплуатации), состояния рабочих поверхностей.

На рис. 4 представлены зависимости изменения относительной ширины зуба шестерни на делительной окружности в течение второго этапа испытаний – при числе

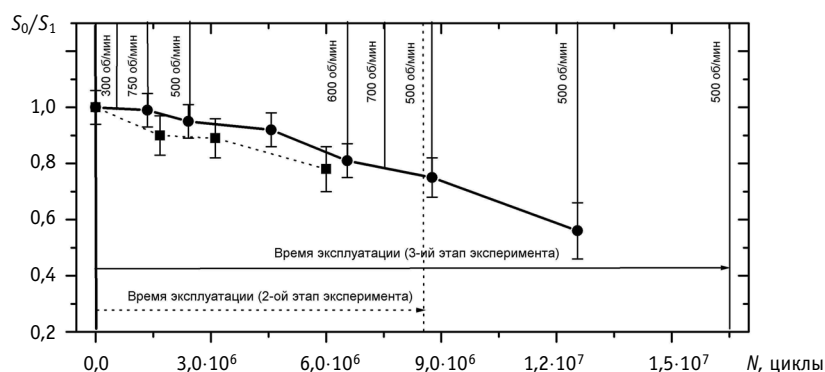


Рис.3. Изменение относительной площади поперечного сечения зуба шестерни в зависимости от количества циклов нагружения: второй этап эксперимента – скорость вращения шестерни 1000 об/мин, время работы 100% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности смочены);

—●— третий этап эксперимента:

- скорость вращения шестерни 300 об/мин, время работы 2% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности не смочены);
- скорость вращения шестерни 500 об/мин, время работы 61% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности не смочены);
- скорость вращения шестерни 600 об/мин, время работы 25% от полного времени эксплуатации (частичное смачивание);
- скорость вращения шестерни 700 об/мин, время работы 6% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности смочены);
- скорость вращения шестерни 750 об/мин, время работы 6% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности смочены)

оборотов шестерни 1000 об/мин, и во время третьего этапа испытаний с указанием скорости вращения шестерни, времени работы на этой скорости (в процентах от времени эксплуатации), состояния рабочих поверхностей.

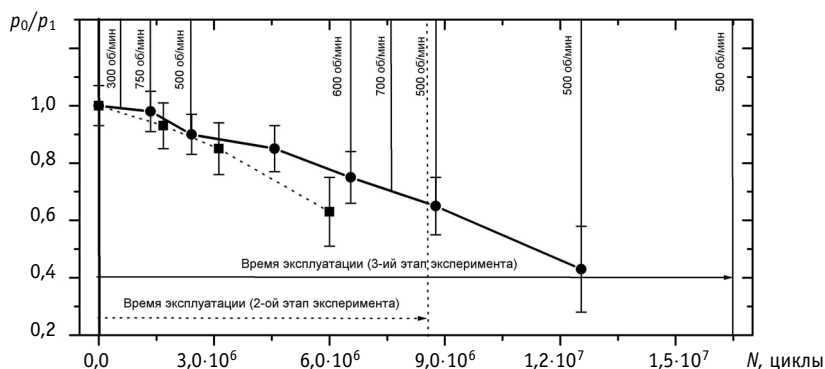


Рис.4. Изменение относительной ширины зуба шестерни на делительной окружности в зависимости от количества циклов нагружения: второй этап эксперимента – скорость вращения шестерни 1000 об/мин, время работы 100% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности смочены);

—●— третий этап эксперимента:

- скорость вращения шестерни 300 об/мин, время работы 2% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности не смочены);
- скорость вращения шестерни 500 об/мин, время работы 61% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности не смочены);
- скорость вращения шестерни 600 об/мин, время работы 25% от полного времени эксплуатации (частичное смачивание);
- скорость вращения шестерни 700 об/мин, время работы 6% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности смочены);
- скорость вращения шестерни 750 об/мин, время работы 6% от полного времени эксплуатации (рабочие поверхности смочены)

Ход кривых на рис. 3, 4 показывает, что интенсивность изнашивания зуба шестерни при 1000 об/мин выше, чем при меньших скоростях вращения, относительная ширина зуба уменьшается быстрее, чем его площадь поперечного сечения. Исследования на третьем этапе эксперимента, с учетом погрешности, не позволяют однозначно говорить об интенсивности изнашивания при различных скоростях вращения шестерни: 750, 700, 600, 500, 300 об/мин.

Износ цапфы вала ГДП шестерни и колеса от исходного диаметра 39.8 мм до 39.7 мм составил 0.1 мм за 514 ч.

Характер повреждения рабочих поверхностей: вала шестерни – кольцевые борозды шириной в основном 0.04–0.08 мм и глубиной до 0.04 мм; вала колеса – кольцевые борозды шириной до 0.2 мм и глубиной до 0.1 мм. Образование этих дефектов объясняется накоплением в зазоре подшипников продуктов износа и коррозии в виде агломератов площадью до 10 мм² и толщиной до 0.2 мм, т.е. наблюдается коррозионно-механический и абразивный механизмы изнашивания. Одним из методов решения этой проблемы является полная или частичная замена «гладких» рабочих поверхностей ГДП многозаходными профилированными винтовыми нарезками, обеспечивающими циркуляцию теплоносителя через зазор подшипника с его охлаждением и удалением абразива. Такая опора обладает большей грузоподъемностью по сравнению с ГДП из-за возникновения радиальной гидростатической силы при эксцентричном положении вала. На данный момент авторами проводятся исследования, направленные на изучение особенностей работы этих опор в свинце.

На рабочих поверхностях зубьев колеса и шестерни зафиксированы микродефекты кратерообразной формы, размерами 0.002–0.04 мм и единичные дефекты, размеры которых достигают 0.4 мм в диаметре. Вероятно, характер дефектов свидетельствует об усталостном изнашивании (усталостное выкрашивание).

Прогнозируемые теоретические механизмы изнашивания трictionных поверхностей из стали в среде свинца при температурах более 400°C: усталостное, абразивное, коррозионное, а также изнашивание при заедании и адгезионное изнашивание. В условиях проведенных экспериментов, вероятно, преобладал адгезионный и коррозионно-механический износ рабочих поверхностей зубчатых зацеплений.

ВЫВОДЫ

Экспериментально доказана возможность работы зубчатых зацеплений, изготовленных из стали 40Х13, в свинцовом теплоносителе на протяжении 500 ч при температуре 450°C, содержании термодинамически активного кислорода в свинце, близком к насыщению, величине контактного напряжения в зацеплении 758 МПа, скорости вращения шестерни равной 500 об/мин или менее с передаточным числом зацепления 1,5 (окружная скорость шестерни и колеса на делительной окружности 2.1 м/с).

Исследования показали, что возможная основная причина разрушения рабочих поверхностей ГДП заключается в накоплении в зазоре подшипника продуктов коррозии и износа материалов подшипника и контура, выполняющих роль абразива.

Поступила в редакцию 14.07.2006