

2-36

一九五五年前

国外高速齿輪傳动的生产情况

第一机械工业部

机械科学研究院編制

1960年

30-221

СССР
МИНИСТЕРСТВО ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ
"ЦНИИТМАШ"

Отдел зубчатых передач

Лаборатория
турбинных передач

Составили: И.Т.Я.ЛИВШИЦ Г.А.
И.И.ШВЕЦОВА Г.Д.

О Б З О Р

22-3203

СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА СКОРОСТНЫХ
ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ЗА РУБЕЖОМ до 1955 г.

Заместитель директора ЦНИИТМАШ
по научной работе
инж. техн. наук

Зам. начальника отдела
профессор, докт. техн. наук

За /заведующий лабораторией/
турбинных передач

江苏工业学院图书馆
藏书章

/САВЕРИН И.И./

/ АРХАНГЕЛЬСКИЙ Л.А. /

МОСКВА 1955 г.

Декабрь

封
2

14/10/23

АННОТАЦИЯ

Настоящий обзор охватывает вопросы производства скоростных турбинных редукторов, используемых главным образом, в приводе морских судов, а также исследований, имеющих отношение к совершенствованию судового редукторного привода.

Обзор составлен на основании иностранных статей в основном за последние десять лет / включая 1955 г. /

В выполнении данной работы принимала участие
М.Н.С.МИХАЙЛОВА К.Н.

ЗАМ. НАЧАЛЬНИКИ ОТДЕЛА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ
профессор, докт. техн. наук

/ САВЕРИН М.М. /

12.10.55

74/4424

РНПАТОННА

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

I. Joughin, J.H. Судовые пестерки - опыт военного времени и современное развитие. Журнал "The Institution of Mechanical Engineers" Труды 1951 г. том 164 стр. 157-176.

В статье приведен подробный анализ ряда аварий турбинных редукторов, имевших место на морских судах английского флота в период с 1939 по 1945 годов. Отмечаются случаи поломки зубьев, заедания и истирания рабочих поверхностей зубьев и чрезмерный шум зубчатых колес, достигавший 125 децибелл. Установлено, что аварии были вызваны во-первых, чрезмерной концентрацией нагрузки вследствие погрешностей угла спирали зубьев, деформации вала пестерки под нагрузкой и неточности расточек корпусов редуктора и, во-вторых, дополнительными динамическими нагрузками, порожденными кинематическими погрешностями зубчатых колес. В работе описаны мероприятия и предложения ряда специалистов /в дискуссии по данной работе/ о методах устранения указанных недостатков в технологии производства турбинных зубчатых передач.

2. Couling, S.A. Качество косозубых колес, нарезанных на зубофрезерных станках с "цельным стоком". Журнал "Engineers" 1949 год Том 187 № 4865, 4870 и том 188 № 4881.

В статье показано, что увеличение числа зубьев ведущего колеса зубофрезерного станка приводит к уменьшению циклической погрешности ведущей цепи станка, воспроизведенной на зубчатом колесе. Рассмотрен вопрос о влиянии погрешности фрезы и ее установки на станке на точность нарезаемого зубчатого колеса. Для уменьшения погрешностей угла наклона

舊底圖總号

底圖總号

24A0023
日期 签收

描圖校對

描圖

зубьев рекомендуется нарезать косозубые колеса без дифференциала. Приведено описание конструкции зубофрезерного станка "Гульд и Збергарт", делительное червячное колесо которого имеет 960 зубьев.

3. Couling, S.A. Производство бесшумных косозубых зубчатых передач. Журнал "Machinery, L" 1944 год. Том 65 N1658.

Описывается работа по уменьшению шума зубчатых колес путем увеличения числа зубьев червячного колеса делительной цепи станка.

4. Couling, S.A. Производство высокоскоростных косозубых передач. Журнал "The Engineer". 1943 год, янв. 29 и февр. 5.

Рассмотрение источников шума зубчатых колес и методы уменьшения шума. /Увеличение числа зубьев делительного колеса станка, нарезание косозубых колес без использования дифференциала/.

5. Sykes, W.A. Прогресс в производстве турбинных шестерен в последние годы. "The Institution of Mechanical Engineers" 1947 г., том 157 N35.

Конструкция зубофрезерных станков для обработки турбинных зубчатых колес. Приводится сравнение станков горизонтального и вертикального типа, станков с кривошипно-шатунным и с обычной конструкцией стола. Методы нарезания турбинных зубчатых колес и нарезочные станки. Влияние погрешностей делительной цепи, ходового винта и цепи подач, червячной фрезы на точность фрезерованных зубчатых колес. Контроль зубчатых колес.

6. James, C Измерения ошибок турбинных зубчатых колес. "The Institution of Mechanical Engineers". 1947 г. т. 157 N35. Обзор работ, проведенных за последние 6 лет Национальной фи-

Фондовый номер	
Фондовый номер	
1810023	
Дата	Сбор
Проверка	Коррекция
Проверка	

зической лабораторией в связи с развитием методов измерения погрешностей турбинных зубчатых колес с помощью переносных измерительных приборов. Методы измерения периодических погрешностей зубофрезерных станков. Конструкция приборов для измерения волнистости, окружного шага, профиля зуба, осевого шага.

7. Sykes, W.A. Шевингование зубчатых колес. Журнал "Engineering". 1953 год. Июнь, 26.

Рассматривается процесс резания при шевинговании зубчатых колес. Отмечается, что шевингованием величина волнистости $7,5 \mu$ уменьшена до 2μ .

8. Jimms, C Измерение накопленной ошибки в станках способом мгновенного фотографирования. Журнал "Engineering". 1949 год N 4378, том 168.

Описание прибора для измерения накопленных погрешностей перемещения фрезерного супорта. Принцип измерения этим прибором заключается в том, что производится сравнение перемещения супорта с эталонной шкалой. С помощью специального устройства производится фотографирование этих отклонений.

9. Jimms, C Измерение зубчатых колес. Журнал "Power Transmission" дек. 1954 г. Янв., фев., март 1955 год.

Обзор существующих методов измерения зубчатых колес всех размеров, включая и судовые передачи. Предложения по новым методам измерений. Предлагаются формулы для определения допусков на окружной шаг. Методы измерения чистоты поверхности зубьев.

10. Dorey, S.F. и Forsyth, G.H. Некоторые погрешности при нарезании зубчатых колес и их влияние на нагрузки и шум в передачах. "North East Coast Institution of Engineers

舊底圖總号	
底圖總号	
16A0023	
日期	簽收
描圖校對	
描圖	

and shipbuilders." Transactions. 1947 год, апрель том 63. Часть 6 и 8.

Экспериментальная работа по исследованию влияния погрешностей зубчатых колес на вибрации и шум турбинного агрегата. Исследования проведены на действующих турбинных редукторах с использованием современной виброакустической аппаратуры. В результате исследований выяснено, что кинематические погрешности зубчатых колес вызывают осевые и крутильные колебания как самих зубчатых колес, так и других элементов машины, в частности, ротора турбины.

- II. Dorey, S.F. Чарльз Парсонс и производство турбинных зубчатых передач. Журнал "Engineering". Окт. 2, 1942 год. Том 154.

История развития турбинных зубчатых передач от Парсонса до наших дней.

12. Jates, H.G. Определение и измерение вибраций судовых турбинных редукторов. Журнал "The Institution of Mechanical Engineers". 1955 г., апрель

Приведен метод определения вибраций редуктора с помощью электрического моделирования. При этом рассматривается возбуждение как от гребного винта, так и от погрешностей зубчатой передачи. Даны примеры расчета крутильных колебаний в судовых редукторах. Методы измерения крутильных колебаний.

13. Jates, H.G. Вибрации в морских судовых турбинных редукторах "Journal of the American society of Naval Engineers" 1950 г. том 62, N 2.

В статье приведен анализ вибраций судовых турбинных редукторов. Примеры анализа ряда аварий в турбинных редукторах вследствие повышенных вибраций, вызванных погрешностями зубчатых колес и погрешностями упругой муфты.

14. Duncan, J.P. Редукторный привод судовых турбин, исследование характеристик вибраций по методу электрической аналогии.

舊底圖總号

底圖總号

1/2 A0023

日期 簽收

描圖 校對

描圖

Журнал "Engineering" 1955 год. Том 179 N 4653.

Описывается метод расчета крутильных колебаний в турбинном редукторе путем исследования колебания электрического контура, схема которого в динамическом отношении аналогична схеме исследуемого зубчатого редуктора.

15. Turpin, W.A. Развитие нарезания крупных косозубых колес.

Журнал "The Machinist, L" Год 1948. Том 91, № 48.

Анализ станков с криво-механизмом. Вопросы точности делительных цепей зубофрезерных станков. Регулирование температуры при нарезании. Методы невинтования - однопрофильное и двупрофильное невинтование. Шлифование зубьев.

Материалы для изготовления зубчатых колес.

16. J. Rogerson. Некоторые замечания о судовых зубчатых передачах. Журнал "The Institute of Marine Engineers" август 1955 года. Том 67 N 8.

Анализ причин возрастания нагрузки на зубья зубчатых колес в судовом редукторе. /Плохая погода, эффект прецессии, быстрое маневрирование, продольное расширение зубчатых колес и т.д./. Геометрия зуба, применяемая в английских судовых редукторах.

17. Taggart, R. Шум в редукторах. "Journal of the American Society of Naval Engineers" 1954 год. Том 66, N 4.

Приведен обзор литературы о шуме зубчатых колес. Описание мероприятий по уменьшению шума зубчатых колес на судах американского военно-морского флота. Исследование шума редукторов на ряде кораблей.

18. Allen и Jones. Планетарные зубчатые передачи. Журнал "The Institute of Marine Engineers, Transactions" 1952 год. Том 64, N 5.

Конструкции планетарных передач, которые могут быть

Фондовый номер

Классификационный номер

11110023

Дата сдачи

Проверка

Проверка

применены на морских судах. Примеры применения планетарных передач на морских судах. Приводится сравнение планетарных редукторов с обычными передачами.

19. Судовые планетарные передачи. Максимальный КПД. Журнал "Engineering". 1954 год № 4593.

Описание реверсивного планетарного редуктора мощностью 500 л.с. Установленного на судне с реверсивным двигателем.

20. Malanchir, W. Сооружение зубчатого щеха в Клайдене в соответствии с требованиями производства турбинных редукторов. Журнал "Metalworking Production" 1955 год. Том 99, № 19 и 20.

Описание зубчатого щеха, фундамента станков, установок для регулирования температуры в щехе.

21. Zeman, J. Точность нарезанных быстроходных зубчатых колес. Журнал "The Iron Age" 1938 г. Том 141, № 20 и 23.

Распределение погрешностей, вызванных ошибками при делении и пока подат станка, на зубчатом колесе. Измерение погрешностей при подат.

22. Точность 72" зубчатого станка. Журнал "Engineering" 1952 год. Том 174, № 4510.

Описание процесса контроля точности зубчатого станка, проводимого национальной физической лабораторией.

23. Как избежать больших колес. Журнал "American Machinist" 1948 год. Декабрь, 18.

Объяснение процесса изготовления. Влияние различных факторов на процесс изготовления.

卷底图编号

底图编号

18A0023

日期 签收

插图校对

插图

中	国	图	书
机	械	工	程
图	书	室	
阅	者	姓	名
阅	者	单	位
阅	者	职	称
阅	者	工	号
阅	者	借	号
阅	者	还	期
阅	者	备	注

24. Британский стандарт BS 1948 - 1954. Зуборезные станки для турбинных и подобных передач.

25. Jimes, C и др. Измерение периодических ошибок в зубофрезерных станках. Журнал "Engineering". Год 1948. Том 166, № 4315

Описание прибора для измерения периодических ошибок делительной цепи зубофрезерного станка с записью на закопченное стекло.

26. Зубофрезерный станок 216" для изготовления турбинных зубчатых колес фирмы "David Brown".

Характеристика станка и краткое описание конструкции. Число зубьев делительного колеса 950. Станок выполнен по классу A BS 1498 - 1954.

Д о п о л н и т е л ь н а я л и т е р а т у р а

27. Sawyer Оборудование для измерения зубчатых колес, применяемое судовым бюро военно-морского флота США. "Journal of the American Society of Naval Engineers" 1952 г. Том 64, № 4.

28. Everest Зубчатые редукторы. Журнал "Power Transmission" 1954 год. Том 23, № 272.

29. Вибрации в морских судовых редукторах. Журнал "The Marine Engineer and Naval Architect" 1950 год, июль.

30. Davies, J.A. Samar H.W. Судовые зубчатые редукторы. Журнал "Shipbuilder and Marine Engine Builder" 1948 г. Том 55, № 472.

31. Wohlberg, G. Уменьшение шума зубчатых передач. Журнал "Machine Design". 1948 год. Том 20, № 8.

32. Newton, J.M. Метод уменьшения погрешностей крупных зубофрезерных станков. Журнал "Machinist" Год 1948. Том 92, № 28.

舊底圖總号

底圖總号

10023

日期 签收

描圖 校對

描圖

I. Значение и роль зубчатого редуктора в судовом турборедукторном приводе

Первые попытки использования турбин в качестве главного двигателя корабля потребовали решения задачи редуцирования оборотов быстроходного вала турбины к сравнительно тихоходному валу гребного винта. Для достижения приемлемых габаритов и веса турбины большой мощности и экономичной ее работы, турбина должна быть достаточно быстроходной. С другой стороны, экономичная работа гребного винта в воде требует невысокой скорости его вращения.

Поэтому лишь с того момента, когда была открыта и практически осуществлена возможность производства зубчатых редукторов, надежно работающих при больших скоростях в условиях судового привода, применение турбин в качестве двигателей корабля стало реальностью /Чарльз Парсонс, начало текущего столетия/.

Без преувеличения можно утверждать, что рождение турбинного привода корабля было предопределено успехами в производстве быстроходных зубчатых колес.

В развитии собственно двигателей судового привода рациональной тенденцией являлось повышение скорости турбин, что отвечает

舊底圖總号

底圖總号

格A0023

日期 簽收

描圖校對

描圖

задача снижения веса и габаритов машин при заданной мощности.

Развитие двигателя в этом естественном направлении ограничивалось в значительной мере скоростным пределом работоспособности зубчатых редукторов.

Производственный и эксплуатационный опыт показал, что зубчатый редуктор в линии судового привода, в зависимости от условий изготовления и монтажа редуктора, является причиной более или менее значительного шума и вибраций, а тем числе вибраций, передающихся водной среде /структурный шум/.

Эти обстоятельства не только затрудняют эксплуатационное обслуживание агрегатов, но могут являться причиной типовой аварии и снижать тактические качества военных судов /обнаружение по структурному шуму/.

Последнее обстоятельство, в частности, привело к тому, что развитие привода подводных лодок долгое время не шло путем установки новых типовых тихоходных двигателей без редукторного привода, хотя это направление в принципе должно быть освоено и признано в значительной мере, отвечающей состоянию производства редукторов на этом этапе развития [17].

Названное выше обстоятельство тот факт, что на протяжении всего развития турборедукторного привода на судах, кораблестроители и турбостроители Англии, США, Германии и других стран уделяли очень большое внимание исследованию факторов, определяющих качество работы зубчатых передач в турборедукторном агрегате и прилагали значительные усилия в области совершенствования производства редукторов.

Актуальность проблемы совершенствования судовых редукторов возросла во время войны 1930 - 1945 г.г. когда на ряде кораблей вооруженных флотов Англии и США имели место аварии, связанные с

舊底圖總號	
底圖總號	
13A0023	
日期	簽收
描圖	校對
描圖	

вибрациями, порождаемыми зубчатыми редукторами. При этом аварии имели место на кораблях, которые считались до начала войны вполне надежными, но машины которых /сами редукторы, а также в некоторых случаях и лопатки ротор турбин/ в условиях длительной форсированной работы, вызванной военной необходимостью, аварийно выходили из строя. Причиной последнего, как показали специальные исследования, являлись вибрации, порождаемые погрешностями зубчатых колес турбинных редукторов.

Исследования, проводимые в широком масштабе адмиралтействами Англии и США непосредственно и через специальные организации /Паметрала, Испытательная станция флота США, Судовой регистр Ллойда и др./ с привлечением квалифицированных научных учреждений /Национальная физическая лаборатория, университеты США и Англии, исследовательские центры отдельных фирм, привлечение специально создаваемых групп специалистов и отраслевых исследовательских учреждений и т.п./ привели к значительному прогрессу в выяснении причин виброактивности зубчатого редуктора, в разработке методов и средств соответствующих исследований, в уточнении требований к зубчатым колесам турбинных редукторов. Одновременно был достигнут также значительный прогресс в совершенствовании технологии производства турбинных редукторов, в оснащении заводов прецизионным зубообрабатывающим оборудованием, в создании средств контроля точности производства, в разработке и внедрении новых стандартов точности производства.

舊底圖總号

底圖總号

14.0023

日期 签收

描圖校對

描圖

2. Вибрации, воздушный и структурный шум турбозубчатых агрегатов

Установлено [2,3,4,10,12,13 и др.], что вибрации, воздушный и структурный шум турбозубчатого агрегата прямо связаны с кинематической точностью зубчатых колес и шестерен, а точность последних находится в прямой четкой зависимости от точности применяемых средств и методов производства при конкретной технологической схеме изготовления редукторов. Замена шестерен и колес более точными или исправление шестерен и колес в корпусе редуктора приводят к резкому улучшению работы агрегата по шуму и вибрациям. В частотном спектре вибраций и шума турбинных редукторов обнаруживаются компоненты с частотой за один оборот зубчатых колес /и шестерен/ равной числу зубьев делительных колес зубофрезерных станков. Кроме того, в шуме и вибрациях содержится частота, соответствующая числу проходящих через зацепление зубьев в секунду. Колебания этой частоты в косозубых зацеплениях турбинных редукторов зависят от полноты контакта на длине зубьев и по высоте профилей /от взаимного согласования углов спирали на сопряженных колесах/ и от точности расточек в корпусах и от точности эвольвенты зубьев.

Существенную роль в снижении вибраций и шума с частотой зацеплений играет фланкирование профилей.

Исследования, проведенные с зубьями увеличенной высоты [1], показали, что до некоторой степени при таких зубьях шум и вибрации уменьшаются, но при этом в связи с увеличением скорости скольжения делается реальной опасность задира. Поэтому высокий

舊底圖總号

底圖總号

✓修A0023

日期 簽收

描圖校對

描圖

зуб не может быть признан более предпочтительным. Вообще параметры номинальной геометрии зацеплений /выбор системы корригирования, угла зацепления, угла спирали, отношения диаметра к длине шестерни и т.п./ не оказывают столь большого влияния на шум и вибрации агрегата, как точность изготовления редукторов.

В системе привода имеют место как крутильные так и поперечные колебания, передающиеся через подшипники корпусу и всему кораблю. Кроме того, вибрации распространяются к ротору турбины и к гребному винту, являющемуся также возбудителем колебаний. От гребного винта и от корпуса корабля колебания передаются в водной среде /структурный шум/. [I, IO, I2, I7 и др.]

Величина вибраций и в особенности шума агрегата при данном уровне точности производства зависит от жесткостей зубчатых колес, валов, редуктора, фундамента, корпуса корабля, от схемы самой линии привода. Здесь имеет большое значение эффект резонанса возбудителей колебаний /зубчатые колеса редуктора, гребной винт, турбина/ с собственными частотами упругой системы линии привода и окружающих конструкций.

В качестве основных средств борьбы с вибрациями и шумом наиболее эффективным является повышение точности производства редукторов, выбор рациональной схемы привода и жесткостных параметров валов и муфт, а также применение демпфирующих приспособлений. Некоторый эффект в части, главным образом, снижения воздушного шума достигается применением звукопоглощающих прокладок и облицовок [I7].

Проблема уменьшения вибраций и шума турбозубчатых агрегатов продолжает оставаться актуальной и в настоящее время.

舊底圖總号

底圖總号

11A0023

日期 签收

描圖校對

描圖

Работы над решением этой проблемы остаются в центре внимания адмиралтейств, судостроительных и турбостроительных фирм и многочисленных исследовательских учреждений.

3. Работоспособность зубчатых зацеплений

В турбинных редукторах имеют место следующие основные виды разрушений: усталостный излом зубьев, питтинг, задир.

Усталостный излом зубьев вызывается концентрацией нагрузки, связанной с погрешностями в угле спирали сопряженных зубчатых колес и погрешностями в расточках редукторных корпусов, вследствие чего фактические изгибные напряжения значительно превышают те, которые рассчитываются из условия равномерного распределения нагрузки по длине шестерни и колеса. Аналогичное влияние оказывает угловая деформация ведущих шестерен, из-за которой происходит локализация передаваемого окружного усилия в короткой эсна у торца шестерни. Для избежания значительных деформаций кручения ограничиваются длины шестерен $l \leq \frac{d}{2} \leq 2l$, применяется подвод крутящего момента к середине полой шестерни, вводится компенсационное искажение угла спирали для компенсации деформации при максимальной нагрузке. Поколки зубьев наблюдались в большинстве случаев на кораблях с высоким уровнем шума и вибраций. Это обстоятельство позволяет предполагать, что наличие динамической

нагрузки на зубьях влияет на этот вид разрушения зубчатых колес. Однако известны случаи работы машин с очень высоким шумом и вибрациями, на которых усталостного излома зубьев не наблюдалось [1]. Поэтому о степени влияния динамической нагрузки на усталостный излом зубьев имеются противоречивые суждения.

舊底圖總号

底圖總号

修A0023

日期 签收

描圖校對

描圖

Значительное влияние на явление усталостного излома зубьев оказывает профиль дна впадины зуба /форма переходной кривой/.

Общепризнанным является требование плавного перехода без изломов и выступов /в виде дуги окружности или подобной кривой/ в сопряжении левого и правого рабочего профиля впадины зубчатого колеса.

Большое значение придается в связи с изгибной прочностью /и с другими параметрами работоспособности/ чистоте обработки зубьев.

Питтинг /усталостное выкрашивание поверхности/ зубьев также связан с концентрацией нагрузки на небольших участках рабочей поверхности зубьев. Питтинг может возникать в передачах с низким контактом по длине зубьев /погрешности осевого шага, перекос осей/ или в передачах с пятнистым контактом из-за наличия циклической погрешности зацепления. Появление питтинга в зацеплении обычно не приводит к выводу передачи из строя.

Известны случаи длительной работы передач с явным питтингом [1]. При ремонтах запиттингованные участки подвергают легкой набравке, способствуя тем самым более равномерному распределению нагрузки по длине зубьев.

Задиры рабочих профилей зубьев связаны также с концентрацией нагрузки в частях места задиры располагаются по гребням волн циклической погрешности. Отмечается [1], что задиры часто наступают при большом крутящем моменте и малой скорости вращения - например при форсированном резерве турбин.

Большое значение в вопросе прочности зубчатых передач, кроме того, имеет выбор в сочетании материалов зубчатых колес, их твердости и термической обработки, условий смазки и геометрических параметров зацепления.

底圖號

底圖號

14A0023

日期 簽收

描圖校對

描圖