

На правах рукописи

МЕЛЕКЕСЦЕВ Георгий Анатольевич

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТНОЙ
И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПОРШНЕЙ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СТЕПЕНИ ФОРСИРОВАНИЯ
И УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАКТОРНЫХ
И КОМБАЙНОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

05.04.02 — Тепловые двигатели
01.02.06 — Динамика, прочность
машин, приборов и аппаратуры

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Лб 27.35

Диссертационная работа выполнена на кафедре двигателей внутреннего сгорания Харьковского политехнического института.

- Научный руководитель — заслуженный деятель науки Украины, доктор технических наук, профессор ШЕХОВЦОВ А. Ф.
- Научный консультант — доктор технических наук, профессор ТРЕТЯК Е. И.
- Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор ПОТИЧЕНКО В. А.
кандидат технических наук, доцент ЕРЕМЕНКО С. Б.
- Ведущая организация — ПО «ЮЖДИЗЕЛЬМАШ»

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00815367 (U)

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

Защита диссертации состоится «24» июни
1993 г. в 13³⁰ часов в ауд. 313 на заседании специализированного совета К 114.04.01 при Харьковском институте инженеров железнодорожного транспорта по адресу:

310050, г. Харьков-50, пл. Фейербаха, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «24» мая 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук

В. И. ПЕЛЕПЕИЧЕНКО

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие современного тракторного и комбайнового моторостроения на Украине характеризуется высоким уровнем форсирования создаваемых дизелей. Одними из основных факторов, определяющими их эксплуатационную надежность, и, в связи с этим, ограничивающими уровень форсирования, являются температурное и напряженно-деформированное состояние деталей цилиндропоршневой группы, прежде всего поршней. Экстремальное повышение таких характеристик при перспективных литровых мощностях может приводить к недопустимому сокращению наработки материала до его разрушения.

На процессы накопления повреждений в поршнях определяющее влияние оказывают:

а) нестационарные аperiodические изменения (размахи) температур и термоупругих напряжений низкой частоты, возникающие в течение пуска, останова и других эксплуатационных переходных процессов двигателя;

б) периодические колебания температур, механических и термоупругих напряжений высокой частоты в поверхностных слоях материала, обусловленные нестационарностью параметров рабочего тела в цилиндре в течение рабочих циклов двигателя;

в) статическая и динамическая ползучесть (и обусловленная ею релаксация) материалов, которая может возникать, соответственно, на стационарных режимах и при эксплуатационных переходных процессах работы двигателя.

Все это обуславливает многофакторность и сложную нестационарность термомеханических нагрузок поршней форсированных дизелей и упруго-пластическое разупрочнение таких деталей вплоть до растрескивания материала.

Изучение закономерностей возникновения и накопления термомеханических усталостных повреждений поршней в условиях столь сложных нагрузок представляет серьезную проблему, и в настоящее время, как правило, проводится на образцах с использованием специальных усталостных установок. Однако, предложенные методы и установки не позволяют воспроизвести весь комплекс эксплуатационных термомеханических нагрузок и влияние последних на ресурс поршней, что существенно снижает достоверность полученных результатов. С учетом сказанного, особую актуальность приобрета-

от разработку метода и установки, позволяющих на образцах поршневых материалов проводить экспериментальные исследования закономерностей накопления в них повреждений от усталости и ползучести при физическом моделировании нестационарных термомеханических нагружений поршней в соответствии с условиями работы дизелей на реальных режимах эксплуатации.

Проведение таких экспериментов с последующей обработкой их результатов с целью оценки абсолютного ресурса работы поршневых сплавов позволит обоснованно производить выбор таких сплавов и конструктивных мероприятий для повышения термомеханической и длительной прочности поршней перспективных тракторных и комбайновых дизелей.

Цель и задачи исследования. Для решения научно-практической задачи - изучения процессов накопления усталостных повреждений и путей повышения термоусталостной и длительной прочности поршневых материалов форсированных тракторных и комбайновых дизелей в настоящей работе поставлены следующие задачи:

- разработать метод физического моделирования нестационарных теплового и напряженного состояний поршней быстроходных дизелей на образцах материалов при сложных термомеханических нагружениях, адекватных эксплуатационным;

- создать универсальный стенд для исследования поршневых материалов, широко применяющихся в двигателестроении, и новых керамических и композитных материалов, на их термомеханическую усталость и длительную прочность в условиях отмеченных нагружений;

- идентифицировать по теплонапряженному состоянию поршней при различных мощностных режимах модели эксплуатации тракторных и комбайновых дизелей при выполнении основных видов сельскохозяйственных работ и на этой основе обосновать нестационарные характеристики нагружений поршневых сплавов при физическом моделировании их термомеханической усталости и длительной прочности;

- провести экспериментальные исследования поршневого сплава на термоусталостную и длительную прочность для конкретных моделей эксплуатации тракторных и комбайновых дизелей с последующей оценкой абсолютного ресурса поршней до их разрушения при различной степени форсирования отмеченных двигателей.

Научная новизна. Впервые разработан метод физического моделирования усталостной и длительной (от ползучести) прочности

поршней и других деталей ЦПГ на образцах материалов в условиях сложных термомеханических нагружений, соответствующих реальным моделям эксплуатации тракторных и комбайновых дизелей.

Предложена и научно обоснована методика выбора параметров циклов нагружений поршневых сплавов при их испытаниях на термомеханическую усталость и длительную прочность с учетом вероятностных характеристик моделей эксплуатации тракторов и комбайнов на различных сельскохозяйственных работах.

Впервые проведены экспериментальные исследования образцов из поршневого сплава АЛ25 на термомеханическую усталость при реальных циклах нестационарных нагружений, характерных для эксплуатации тракторных и комбайновых быстходных дизелей.

Результаты экспериментальных исследований позволяют проводить оценку накопления повреждений в поршнях таких дизелей для конкретных моделей их эксплуатации, разделять влияние высокочастотных и низкочастотных составляющих нагружений на усталостную долговечность, прогнозировать абсолютные ресурсы поршней форсированных быстходных дизелей.

Практическая ценность. Разработанная методика и установка для проведения испытаний поршневых материалов на их термомеханическую усталость и длительную прочность в условиях многофакторных нестационарных нагружений может быть использована для получения достоверных экспериментальных данных о накоплении повреждений в этих деталях при эксплуатации.

Методика идентификации моделей эксплуатации тракторных и комбайновых дизелей на основе связи теплонпряженного состояния поршней с их мощностной загрузкой при учете вероятности выполнения ими основных сельскохозяйственных работ позволяет выбирать реальные циклы ускоренных испытаний поршневых сплавов на усталость и длительную прочность с оценкой, в конечном счете, абсолютного ресурса работы поршней при различной степени форсирования таких двигателей.

Созданная установка позволяет определять реальные характеристики термомеханической усталости и длительной прочности новых (перспективных) керамических и композитных материалов, что может быть использовано в целях их обоснованного выбора для поршней вновь создаваемых двигателей.

Проведение таких испытаний на надежность при реальных значениях нагружения позволяют уточнить характеристики термусталост-

ной прочности и ползучести поршневых материалов для использования их в расчетах по оценке длительной прочности поршней.

Полученные результаты и разработки могут быть использованы в НИИ и организациях, занимающихся доводкой и проектированием быстроходных дизелей при выборе материалов деталей ЦПГ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях ХИИТ (1992г.) и ХПИ (1985-1991г.г.).

Реализация работы. Разработанные установка и стенд для испытаний на термомеханическую усталость материалов деталей камеры сгорания двигателя внутреннего сгорания, способ моделирования теплонапряженного состояния деталей двигателя внутреннего сгорания, устройство для испытаний на прочность образцов в условиях высоких температур и сложного термомеханического нагружения внедрены в ДМЭТИ и проблемной лаборатории перспективных двигателей ХПИ, что подтверждено актами об использовании изобретений.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы шесть научных работ. Получено четыре авторских свидетельства на изобретения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены результаты анализа наиболее часто применяемых методов оценки и экспериментальных исследований термомеханической усталостной прочности деталей ЦПГ двигателей. Рассмотрены: ускоренные испытания двигателей, методы расчетной оценки, испытания деталей ЦПГ и их материалов на безмоторных стендах. Исходя из анализа рассмотренных методов, для изучения процессов накопления повреждений, происходящих в деталях ЦПГ дизеля, сформулированы требования к физическому моделированию процессов усталости и ползучести поршневых сплавов, выбраны критерии подобия ($\frac{\sigma}{E} = 1\text{дем}$; $\nu = 1\text{дем}$; $\frac{P}{E} = 1\text{дем}$; $\frac{E}{G} = 1\text{дем}$; $P_0 = \frac{\sigma \tau}{R} = 1\text{дем}$; $P_a = \frac{kR^2}{a} = 1\text{дем}$) и на этой основе предложен и обоснован метод такого моделирования на образцах материала в условиях нестационарных, многофакторных нагружений, адекватных эксплуатационным.

Предложено во время модельных экспериментальных испытаний подвергать образец поршневого материала воздействию нестационар-

ных аperiodических и периодических температур, термоупругих и механических напряжений, назначенных, исходя из конкретной модели эксплуатации дизеля. На этой основе можно обеспечить, чтобы напряженно-деформированное состояние в представительной (локальной) зоне образца было идентичным тому, которое имеет место в опасных зонах реальных деталей ЦПГ в условиях эксплуатации дизеля, например, в зоне кромки открытой камеры сгорания в поршне тракторного или комбайнового дизеля.

Подчеркнуто, что для обеспечения возможности проведения подобных усталостных испытаний путем физического моделирования условий работы конкретных деталей ЦПГ дизелей различного назначения, должно быть предусмотрено изменение возбуждаемых низкочастотных и высокочастотных нестационарных термических и механических нагрузений образцов этих деталей в широких диапазонах рабочих температур и напряжений.

С учетом сказанного, разработан метод физического моделирования усталостной и длительной прочности поршней быстроходных дизелей, который позволяет:

- получить достоверные экспериментальные данные о термомеханической усталости и длительной прочности материалов поршней и других деталей ЦПГ дизеля при реальных эксплуатационных многофакторных законах их нестационарных нагружений;

- оценить влияние определяющих факторов на термомеханическую усталость и длительную прочность поршневых материалов быстроходных дизелей;

- выявить влияние различных моделей эксплуатации дизеля на термомеханическую усталость и длительную прочность поршневых сплавов;

- выявить при разных степенях форсирования дизеля характеристики процессов ползучести и релаксации температурных напряжений поршневых сплавов;

- изучить закономерности и кинетику накопления усталостных повреждений в поршнях при изменении величин напряжений, числа циклов и режимов термомеханических нагружений;

- исследовать термомеханическую усталость и длительную прочность с последующей оценкой ресурса поршневых материалов, как применяемых в двигателестроении, так и перспективных (керамических, композитных).

Вторая глава посвящена описанию способа, стенда (установ-

ки), измерительной системы, предложенных для проведения термомеханических усталостных испытаний образцов материалов с физическим моделированием реальных, адекватных эксплуатационным условиям работы поршней. На рис.1 представлена принципиальная схема разрабатываемой установки.

Образец испытываемого материала 2, захваченный захватами 3,4 в шпинделях 7,8, нагружается по заданной программе при помощи основных узлов:

- нагревателя, генерирующего тепловые воздействия низкой частоты;
- лучистого нагревателя системы высокочастотного нагрева;
- узла высокочастотного механического нагружения;
- узла низкочастотного механического нагружения.

В связи с тем, что все применяемые в настоящее время образцы для проведения усталостных испытаний оказались непригодны при исследованиях с моделированием сложных нестационарных теплового и напряженного состояний деталей ШП, были разработаны и изготовлены оригинальные образцы и захваты для него, отмеченные авторским свидетельством на изобретение.

Низкочастотное изменение температуры образца, моделирующее таковое в деталях ШП при пуске (останове), быстром набросе и сбросе нагрузки дизеля, в установке осуществляется при помощи специально разработанной нагревательной системы, которая состоит из собственно нагревателя и узла автоматического управления нагревом и охлаждением. Нагреватель 4I создает два газовых факела, которые обтекают образец с двух сторон его рабочего сечения. Узел автоматического управления нагревом включает в себя управляющий кулачек, концевой выключатель, электромагнит и заслонку. Управляющий кулачек расположен на валу кулачка низкочастотного нагружения и в зависимости от наброса или сброса низкочастотной механической нагрузки открывает (для разогрева образца) или закрывает (для его охлаждения) заслонку. Для достижения необходимого размаха температур в тепловом переходном процессе предусмотрены подвод воздуха к заслонке и обдув образца.

Размахи аperiodических тепловых напряжений, возникающих в поршне от низкочастотных (при переходных процессах) изменений температур, моделируются на образце при помощи пружинно-кулачковой системы узла осевого низкочастотного нагружения. Закон изменения напряжений в рабочем сечении образца задается кулачком 25

при его воздействии через пружины 28, 29 и тягу 24 на опорные подшипники ведомого шпинделя.

Кулачки узла низкочастотных нагрева и механического нагружения находятся на одном валу, в связи с чем такие нагружения материала моделируются синхронно.

Высокочастотные колебания температуры, моделирующие такие же колебания в поверхностных слоях деталей ЦПГ, возбуждаются при воздействии на образец лучистого нагревателя 33. В момент падения луча на поверхность рабочего сечения вращающегося образца происходит возрастание температуры, а после выхода этого участка из зоны луча — ее падение. В качестве облучателя (лучистого нагревателя) выбран газовый CO_2 -лазер. Величины температурных колебаний в деталях ЦПГ могут изменяться в зависимости от режима работы двигателя. В установке изменение полного температурного колебания, поставлено в зависимость от наброса или сброса низкочастотной нагрузки, т.е. от характеристик переходного процесса дизеля, что достигается путем регулирования выходной мощности лазера, с помощью специально разработанной системы автоматического программного управления циклическим нагружением.

Оценка амплитуд высокочастотных температурных колебаний производится по формуле

$$t(x, \tau) = t_0 + \sqrt{a / (\pi \lambda^2)} \int_0^{\tau} (1 / \sqrt{\tau - u}) q (\tau - u) du,$$

где a — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности; q — тепловой поток; τ — время; t_0 — средняя температура.

Значения термоупругих напряжений, возникающих при воздействии на образец высокочастотных колебаний температуры, оценивались по формуле

$$\sigma_{tm} = \alpha_t E \delta t / (1 - \nu).$$

Здесь ν — коэффициент Пуассона; α_t — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости.

Периодические напряжения, возникающие в поршнях от сил давления газов, моделируются в установке при помощи пружинно-кулачковой системы высокочастотного механического нагружения. Закон изменения напряжений задается профилем кулачка 15, который через систему рычагов передает на образец, изгибающую нагрузку.

В реальном двигателе величины напряжений, возникающих в поршнях, могут изменяться в зависимости от режима его работы. Для

моделирования такого изменения, в зависимости от наброса или сброса аperiodической нагрузки, был разработан и изготовлен рычаг с регулируемым плечом И8, на который получено авторское свидетельство на изобретение.

Динамика изменения низкочастотных и высокочастотных температур и напряжений в рабочем сечении образца из поршневого сплава АЛ25 показана на рис.2 и рис.3

Здесь же приведены аналогичные данные для кромки КС открытого типа поршня форсированного тракторного дизеля типа СМД.

Видно, что предложенное устройство обеспечивает физическое моделирование циклов термомеханических нагружений поршневых материалов, практически адекватных реальным эксплуатационным.

В третьей главе проведен анализ статистических данных о занятости тракторов и комбайнов на различных сельскохозяйственных операциях, об использовании при этом мощности их двигателей в разных природно-производственных условиях. На этой основе получены вероятностные характеристики моделей эксплуатации каждого из этих типов дизелей в виде гистограмм распределения вероятностей мощностных режимов работы двигателя и соответствующих им частот вращения коленчатого вала при рядовой эксплуатации. Проведена идентификация таких моделей эксплуатации применительно к целям их использования для оценок усталостной и длительной прочности поршней. При этом был сформирован комплекс характеристик теплового и напряженно-деформированного состояний материала в наиболее опасной зоне поршня (кромка камеры сгорания) для спектра мощностных эксплуатационных режимов работы дизеля. Это позволило обоснованно перейти к выбору циклов ускоренных усталостных испытаний образца из поршневого сплава АЛ25. Такие циклы адекватно воспроизводили тепловое и напряженное состояние упомянутой наиболее нагруженной части поршня при самых жестких переходных процессах, наблюдаемых при эксплуатации форсированных тракторных и комбайновых дизелей. В качестве объекта исследования выбраны форсированный до $N_{л} = 27$ кВт/л дизель типа СМД-22Н, установленный на гусеничном тракторе общего назначения тягового класса 30кН и форсированный до $N_{л} = 26$ кВт/л дизель типа СМД-17кН, используемый на зерноуборочном комбайне СК-5 "Нива". Исходя из эксплуатационных режимов работы этих машин при выполнении различных сельскохозяйственных операций, были построены гистограммы вероятности загрузки дизеля за весь

срок службы и в соответствии со структурой годовой занятости выявлены временные и другие характеристики зон основных сельскохозяйственных работ, выполняемых ими (рис.4).

Полученные гистограммы предоставляют возможность рассчитать количества низкочастотных апериодических и высокочастотных периодических циклов нагружений поршней, что позволяет оценивать усталостные и пластические повреждения на каждом режиме эксплуатации и, после их суммирования, прогнозировать абсолютную предельную наработку (ресурс) детали до разрушения.

В итоге, на основании проведенного анализа для ускоренных усталостных испытаний поршневого сплава АЛ25 был назначен комплекс характеристик (испытательный цикл) тепло-силового нестационарного нагружения, адекватного таковому на кромке открытой КС поршня.

Применительно к форсированному до $N_{л} = 27$ кВт/л дизелю типа СМД-22Н, установленному на гусеничном тракторе класса 30 кН, такой цикл нагружений (холостой ход - полигон НИ8 - холостой ход) имеет место при выполнении этим трактором почвообработающих операций; его характеристики:

- низкочастотное (апериодическое) изменение температуры $168-370^{\circ}\text{C}$;
- размах низкочастотного изменения напряжений $\Delta\sigma_{\text{та}} = 66,7$ МПа;
- наибольшее полное высокочастотное (периодическое) колебание температуры $\delta t_{\text{max}} = 24,5^{\circ}\text{C}$;
- наименьшее полное высокочастотное колебание температуры $\delta t_{\text{min}} = 6,1^{\circ}\text{C}$;
- наибольшее полное высокочастотное колебание механических напряжений $\delta\sigma_{\text{M max}} = 43$ МПа;
- наименьшее полное высокочастотное колебание механических напряжений $\delta\sigma_{\text{M min}} = 24,8$ МПа;

Применительно к форсированному до $N_{л} = 25$ кВт/л дизелю типа СМД-17КН, установленному на зерноуборочном комбайне СК-5 "Нива", такой цикл нагружений (холостой ход-полигон НИ3-холостой ход) возникает при уборке комбайном кукурузы на зерно с измельчением листостебелной массы; его характеристики:

- низкочастотное (апериодическое) изменение температуры $151-336^{\circ}\text{C}$;
- размах низкочастотного изменения напряжений $\Delta\sigma_{\text{та}} = 61,4$ МПа;
- наибольшее полное высокочастотное (периодическое) колеба-

ние температуры $\Delta\sigma_{\max} = 21,6^{\circ}\text{C}$;

- наименьшее полное высокочастотное колебание температуры $\Delta\sigma_{\min} = 6,0^{\circ}\text{C}$;

- наибольшее полное высокочастотное колебание механических напряжений $\Delta\sigma_{\max} = 40,6 \text{ МПа}$;

- наименьшее полное высокочастотное колебание механических напряжений $\Delta\sigma_{\min} = 24,1 \text{ МПа}$;

Продолжительность испытательного цикла выбиралась с учетом особенностей эксплуатации трактора (комбайна) и необходимости стабилизации теплового состояния исследуемой детали ЦПГ. Она составляет порядка 6 мин (3 мин - наброс нагрузки и 3 мин - сброс ее).

В четвертой главе проведена проверка адекватности математической модели, используемой для расчетной оценки числа термоциклов до появления трещин в деталях ЦПГ быстроходного дизеля, и реального процесса разрушения (появление трещин) образца поршневого сплава АЛ25 на установке при физическом моделировании термомеханической усталостной и длительной прочности.

Выполнены исследования поршневого сплава при аperiодических и совместных аperiодических и периодических циклах нагружений, с использованием специально спроектированной и изготовленной измерительной оснастки.

В процессе испытаний непрерывно обеспечивались измерения осевой нагрузки, позволяющие осуществить постоянный контроль напряжений, возникающих в рабочем сечении образца, а также измерения его осевой деформации в цикле термомеханических нагружений.

При испытаниях с низкочастотным циклом нагружения измерения температур производилось термопарой непрерывно, а при совместных низкочастотном и высокочастотном циклах нагружений и вращающемся образце тепловое состояние регистрировалось с помощью агрегатного комплекса стационарных пирометров АПИР-С. В последнем случае при закрытой заслонке нагревательной системы фиксировалась максимальная и минимальная температуры термоцикла. Оценка возникающих при измерении погрешностей, проведенная на основании общепринятых методик, показала, что достоверность получаемых нестационарных значений температур, деформаций и нагрузки удовлетворяет требованиям обеспечения высокой метрологической точности.

Проведена также оценка термомеханической усталостной прочности поршня с открытой камерой сгорания форсированного до $N_{пл} = 27$ кВт/л дизеля СМД-22Н, исходя из выбранного деформационно-кинетического критерия, основанного на принципе линейного суммирования усталостных и квазистатических (от ползучести) повреждений. При этом

$$d_f + d_c = \int_1^N dN / N_{f1} + \int_0^{\tau^*} dt / \tau_1^* = 1,$$

где d_f и d_c - доли, соответственно, усталостных и квазистатических повреждений; N_f - число циклов до повреждения материала; N - число циклов нагружения поршня; N_{f1} - число циклов до разрушения на 1-ом уровне (в 1-той зоне эксплуатационных режимов), определяемое по кривой усталости; τ^* - время до усталостного разрушения материала в условиях его малоциклового нагружения; τ_1^* - время до разрушения материала от ползучести, определяемое по кривой его длительной прочности при заданных напряжении и температуре.

Для оценки термоусталостной прочности поршней использовался принцип Нейбера, который позволяет учесть влияние пластической деформации на отдельные предельные состояния при использовании результатов расчета напряженно-деформированного состояния детали в упругой постановке. Для кромки камеры сгорания (зона концентрации напряжений) он записывается в виде

$$\sigma_{лин} / E = \epsilon_y^m \epsilon^{1-m},$$

где $\sigma_{лин}$ - напряжения, рассчитанные по закону Гука; E - модуль упругости; ϵ_y - упругая деформация; $\epsilon = \epsilon_y + \epsilon_{пл}$ - полная деформация; m - показатель степени, зависящий от условий нагружения.

После подстановки в уравнение обобщенного принципа Нейбера уравнения для усталости (полученного на основе формулы Морроу)

$$\epsilon_y = \sigma_f' / E [(2 N_f)^c + \epsilon_{пл.н} / \epsilon_f']^{b/c}$$

где σ_f' - усталостная прочность; ϵ_f' - усталостная вязкость; b, c - константы материала,

получаем универсальное соотношение для расчета количества циклов до разрушения N_f :

$$\sigma_{алин} = \left(\sigma_f' [(2 N_f)^c + \epsilon_{пл.н} / \epsilon_f']^{b/c} \right)^m \left(\sigma_f' [(2 N_f)^c + \epsilon_{пл.н} / \epsilon_f']^{b/c} + [\epsilon_f' (2 N_f)^c + \epsilon_{пл.н}] \right)^{1-m}.$$

Постоянные b и c , а также усталостные характеристики поршневого сплава АЛ25, определялись в результате обработки эксперименталь-

ных данных, полученных при усталостных испытаниях образцов.

Доля квазистатических (от ползучести) повреждений на основе принципа Нейбера

$$\tau^* = c_0 \sigma^{-n} / g \exp(-k_2 / T),$$

где c_0 , n , k_2 - константы материала; σ - действительное напряжение (среднее для каждого участка), T - температура (средняя для каждого участка); g - коэффициент, полученный при испытании образцов АЛ25 на ползучесть.

Расчет накопленных повреждений производился на каждом участке разбиения цикла низкочастотного нагружения, который проходил неравномерными "шагами".

Результаты испытаний поршневого сплава АЛ25 и расчетной оценки накопленных повреждений на кромке открытой КС типа поршня от усталости и ползучести приведены в таблице I.

Таблица I

	Условия (физического и математического моделирования			
	аперриодическое нагружение	совместные аперриодическое и периодическое термомеханические нагружения		
	170-370	170-370	170-370	170-370
Размах температур в цикле, °С	170-370	170-370	170-370	170-370
Размах суммарных действительных напряжений цикла, МПа	49,8	64,8	97,0	127,0
Коэффициент влияния асимметрии цикла	1,41	1,0	1,3	1,23
Амплитуда пластической деформации, %	0,05	0,12	0,20	0,53
Полученное при физическом моделировании число циклов до разрушения	1350	194	19	5
Расчетное число циклов до появления трещины на кромке КС поршня реального дизеля	1133	240	23	6
Доля накопленных повреждений от термомеханической усталости (df)	0,723	0,739	0,754	0,757
Доля накопленных повреждений от ползучести (dt)	0,277	0,261	0,246	0,243

* Характеристики циклов нагружений соответствовали реальной модели эксплуатации тракторного дизеля СМД-22Н.

Приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных данных (рис.5) показали, что разработанные методика и установка могут

омы использованы для испытаний на термомеханическую усталость и длительную прочность материалов поршней и других деталей ЦП форсированных дизелей при физическом моделировании на образцах реальных условий работы этих деталей в эксплуатации.

Результаты физического моделирования позволили установить, что увеличение в 1,3 раза размаха действительных напряжений, при наложении нестационарных периодических тепловых и механических воздействий на низкочастотный аperiodический цикл нагружения, значительно ускоряет процесс накопления повреждений в поршневом сплаве АЛ25 и снижает в 7 раз усталостную долговечность материала в зоне кромки открытой камеры сгорания алюминиевого поршня быстрого дизеля.

Удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о достоверности оценок усталостной долговечности поршней по идентифицированным моделям эксплуатации тракторного или комбайнового быстрого дизелей и в итоге позволяет определить суммарную абсолютную наработку (ресурс) поршней в эксплуатации до их разрушения (появления микротрещин критического размера).

Оценка ресурса поршня проводилась по зависимости, предложенной А.Ф.Шеховцовым. При этом

$$\tau_p / p = 1 / \left(\sum (z_{A1} / N_{f1}) + \sum (\tau_1 / \tau_1^*) \right),$$

где τ_p - наработка дизеля до разрушения поршня; p - плечевой моторесурс дизеля (принят 10000ч); $\sum (z_{A1} / N_{f1})$ - накопленные повреждения от термомеханической усталости (z_{A1} - количество аperiodических циклов нагружений на конкретном эксплуатационном режиме работы за весь срок службы дизеля);

$\sum (\tau_1 / \tau_1^*)$ - накопленные повреждения от ползучести.

Проведенные расчеты показали, что относительная долговечность (ресурс) поршня с открытой КС форсированного до $N_{л} = 27 \text{ кВт/л}$ тракторного дизеля СМД-22Н при работе по модели эксплуатации гусеничного трактора составляет 299 часов наработки. Для такого же поршня форсированного до $N_{л} = 26 \text{ кВт/л}$ комбайнового дизеля СМД-17КН при работе по модели эксплуатации зерноуборочного комбайна СК-5 "Нива" ресурс возрастает в 10 раз.

Для проверки адекватности этих результатов проведена расчетная оценка ресурса поршня с КС типа ЦНИДИ дизеля СМД-22Н ($N_{e_{ном}} = 106,6 \text{ кВт}$, $n_{ном} = 2000 \text{ мин}^{-1}$), характеристики термомеханических нагружений которого практически идентичны таковым для

кромки открытой камеры сгорания рассматриваемого форсированного дизеля. Расчет производился на основе той же модели эксплуатации гусеничного трактора. Рассчитанный ресурс такого поршня 223 часа соответствует полученным в ГСКБД данным о растраскивании поршней с КС типа ЦНИДИ в эксплуатации через 200-300 часов работы, что подтверждает адекватность результатов физического моделирования и рядовой эксплуатации.

Результаты оценок ресурса поршней быстроходных дизелей также показали, что на основе разработанного метода физического моделирования термомеханической усталостной и длительной прочности материала поршня возможно значительно ускорить проведение испытаний на надежность. Так, эксперимент на установке за счет ужесточения цикла нагружения позволил оценить абсолютный ресурс поршня тракторного дизеля СМД-22Н по наработке до разрушения, за 19,4 часа, т.е. с коэффициентом ускорения $K_y = 15,4$.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод физического моделирования нестационарных теплового и напряженно-деформированного состояний поршней дизелей при нагружении их совместно аperiodическими и периодическими циклами изменения температур и напряжений, адекватными эксплуатационным.

2. Разработана и создана оригинальная установка для такого физического моделирования условий работы поршней дизелей, которая обеспечивает получение достоверных экспериментальных данных по термомеханической усталости и длительной прочности материалов этих деталей в эксплуатации.

3. Созданные в установке узел низкочастотного механического нагружения с системой нагрева низкой частоты и узел высокочастотного механического нагружения с системой автоматического программного управления циклическим термонагружением позволяют проводить длительные испытания поршневых материалов на усталость и ползучесть при стабильном поддержании параметров циклов термомеханических нагружений, адекватных реальным переходным процессам быстроходных дизелей.

4. На основе анализа условий эксплуатации тракторов и комбайнов на различных сельскохозяйственных работах и с помощью методов математической статистики получены вероятностные

характеристики моделей эксплуатации таких дизелей по их режимным параметрам - крутящему моменту и быстроходности. Выполнена идентификация таких моделей по тепловому и напряженному состояниям поршня в зависимости от мощностной загрузки дизеля, что позволяет обоснованно назначать параметры циклов нагружений при испытаниях материалов деталей ЦПГ на термомеханическую усталость и длительную прочность, а так же оценивать соответствующие накопленные повреждения и абсолютную наработку (ресурс) деталей до разрушения для конкретных моделей эксплуатации тракторных и комбайновых дизелей.

5. Созданная установка и разработанная методика позволяют проводить ускоренные испытания поршневых материалов, исходя из наиболее жестких переходных процессов реальных моделей эксплуатации тракторных и комбайновых дизелей.

6. Разработанная методика и установка подтвердили свою работоспособность и позволяют получать достоверные результаты при проведении испытаний поршневого сплава А25 при многофакторном термомеханическом аperiodическом и периодическом нагружениях для конкретных моделей эксплуатации быстроходных дизелей. Это позволило впервые получить научную информацию о количестве циклов и абсолютной наработке (ресурсе) до разрушения поршневого сплава АЛ25 при эксплуатации форсированных тракторного и комбайнового дизелей типа СМД.

7. Полученные результаты физического моделирования позволили разделить влияние высокочастотной и низкочастотной составляющих нестационарных нагрузок на накопление усталостных повреждений в зоне кромки камеры сгорания поршня.

8. Разработанный метод и установка для физического моделирования нестационарных теплового и напряженно - деформированного состояний деталей ЦПГ дизель, защищены свидетельствами на изобретения и используются для проведения в 1992-1995гг. работ по госбюджетному проекту "Разработка методов и конструктивных мероприятий по повышению термоусталостной прочности высоконагруженных чистых энергоустановок", выполняемых по постановлению Государственного комитета Украины по вопросам науки и технологий

9. Установка исследования термомеханической усталости материалов деталей ЦПГ дизеля, узлы стенда для усталостных испытаний в условиях высоких температур и сложного механического нагружения и способ физического моделирования теплонапряженного состоя-

- 38 -

ния поршней двигателя внутреннего сгорания внедрены в ДМетИ (г.Днепропетровск) и проблемной научно-исследовательской лаборатории перспективных двигателей ХПИ (г.Харьков).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Шеховцов А.Ф., Абрамчук Ф.И., Мелекесцев Г.А., Кокуш В.А., Степанко В.Г. Установка для испытания на термомеханическую усталость материалов деталей камеры сгорания ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. -1988. - Вып.47. -с.55-60.

2. Шеховцов А.Ф., Абрамчук Ф.И., Бачевский А.М., Мелекесцев Г.А. Система автоматического программного управления процессами циклического нагружения деталей при испытании ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. -1990. -Вып.51. -с.105-108.

3. А.с. N 1300321. Установка для испытания материалов на термомеханическую усталость деталей камеры сгорания двигателя внутреннего сгорания / Шеховцов А.Ф., Абрамчук Ф.И., Мелекесцев Г.А. // Б.И., 1987, N 12.

4. А.с. N 1357746. Стенд для испытания на термомеханическую усталость материала камеры сгорания двигателя / Шеховцов А.Ф., Абрамчук Ф.И., Мелекесцев Г.А. // Б.И., 1987, N 45.

5. А.с. N 1665057. Способ моделирования теплонапряженного состояния деталей двигателя внутреннего сгорания / Шеховцов А.Ф., Абрамчук Ф.И., Бачевский А.М., Мелекесцев Г.А. // Б.И., 1991, N 27.

6. А.с. N 1696949. Устройство для испытаний на прочность образцов в условиях высоких температур и сложного механического нагружения / Шеховцов А.Ф., Абрамчук Ф.И., Мелекесцев Г.А. // Б.И., 1991, N 45.

Шех

Схема стенда

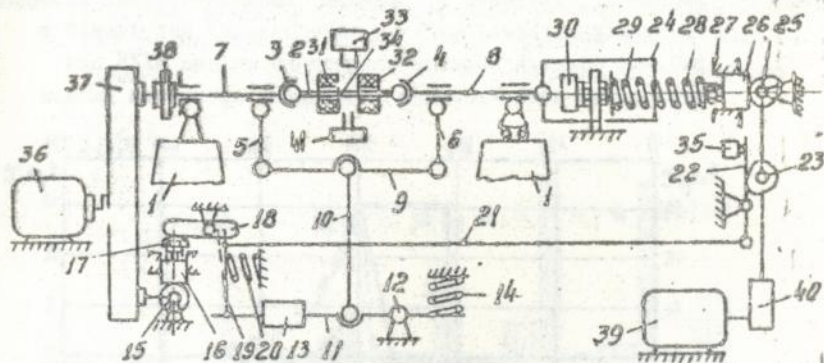
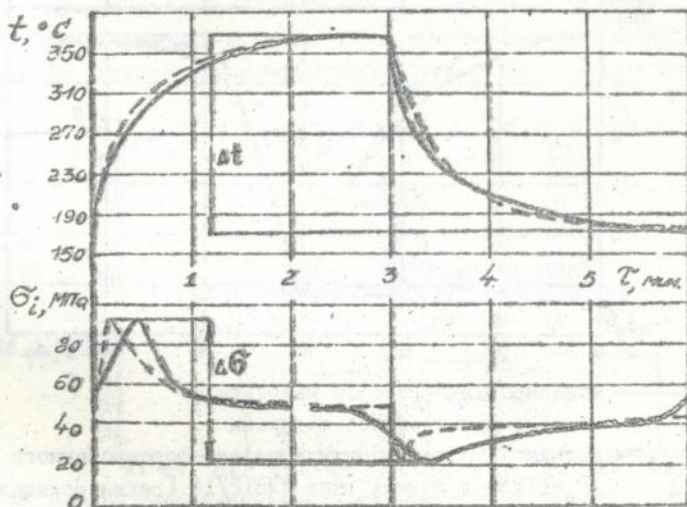


Рис. I

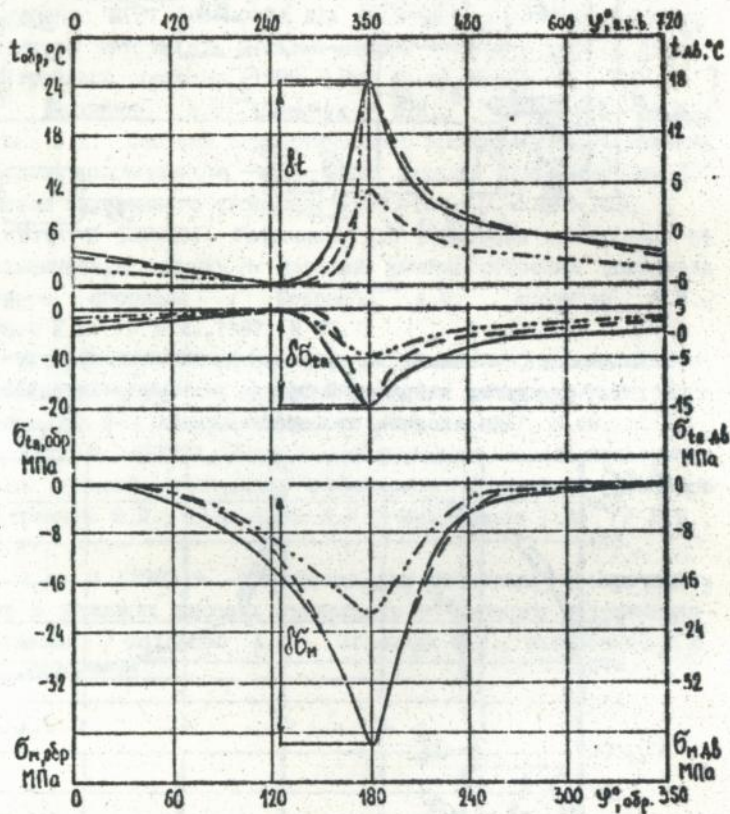
Динамика (изменение во времени) низкочастотных температур и термоупругих напряжений при физической моделировании переходных процессов дизеля



— рабочее сечение образца поршневого сплава Al25;
 - - - кромка открытой КС поршня форсированного до $N_d = 27 \text{ кВт/л}$ дизеля типа 4CH12/14.

Рис. 2

Динамика (изменение во времени) высокочастотных колебаний температуры, термоупругих и механических напряжений в рабочем сечении образца поршневого сплава АЛ25 при физическом моделировании переходных процессов дизеля



- — — — — моделирование набросе нагрузки ;
- - - - - моделирование сброса нагрузки ;
- - - - - кромка КС открытого типа поршня форсированного до $N_{д} = 27 \text{ кВт/л}$ дизеля типа 4ЧН12/14 (режим номинальной мощности).

Гистограммы загрузки по мощности и быстроходности и полигоны основных эксплуатационных режимов дизелей СМД-22Н (а) установленного на гусеничном тракторе класса 30кН и СМД-17КН (б) установленного на зерноуборочном комбайне СК-5 "Нива"

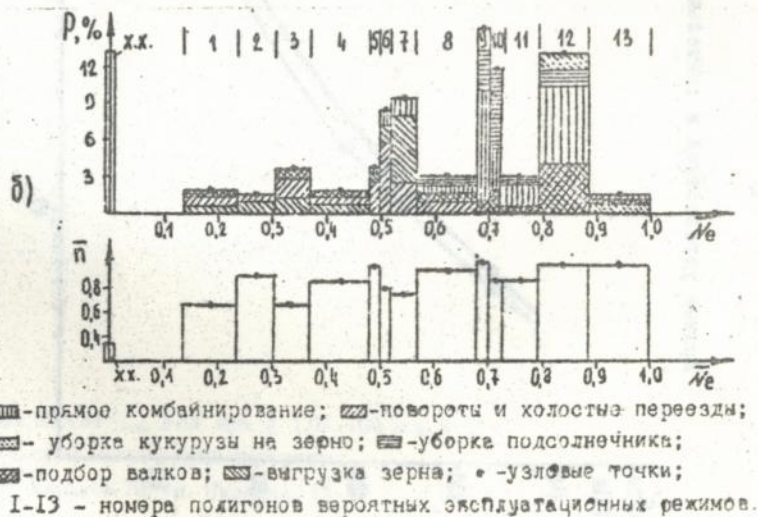
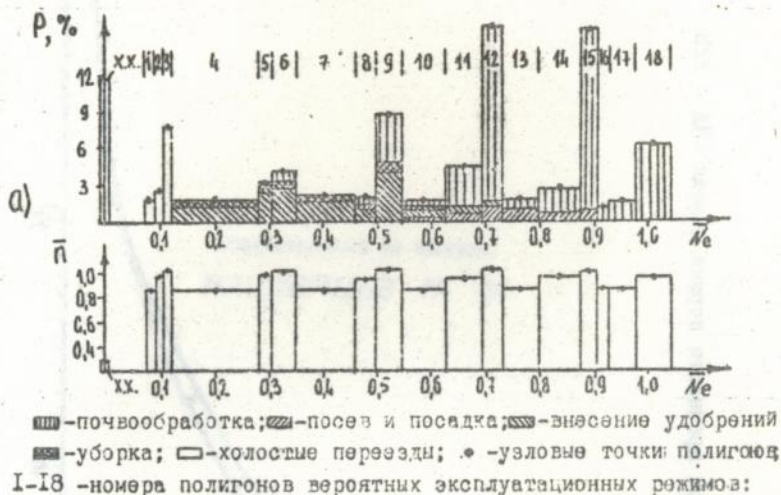


Рис. 4

Кривые усталостной и длительной прочности поршня дизеля СМД - 22Н

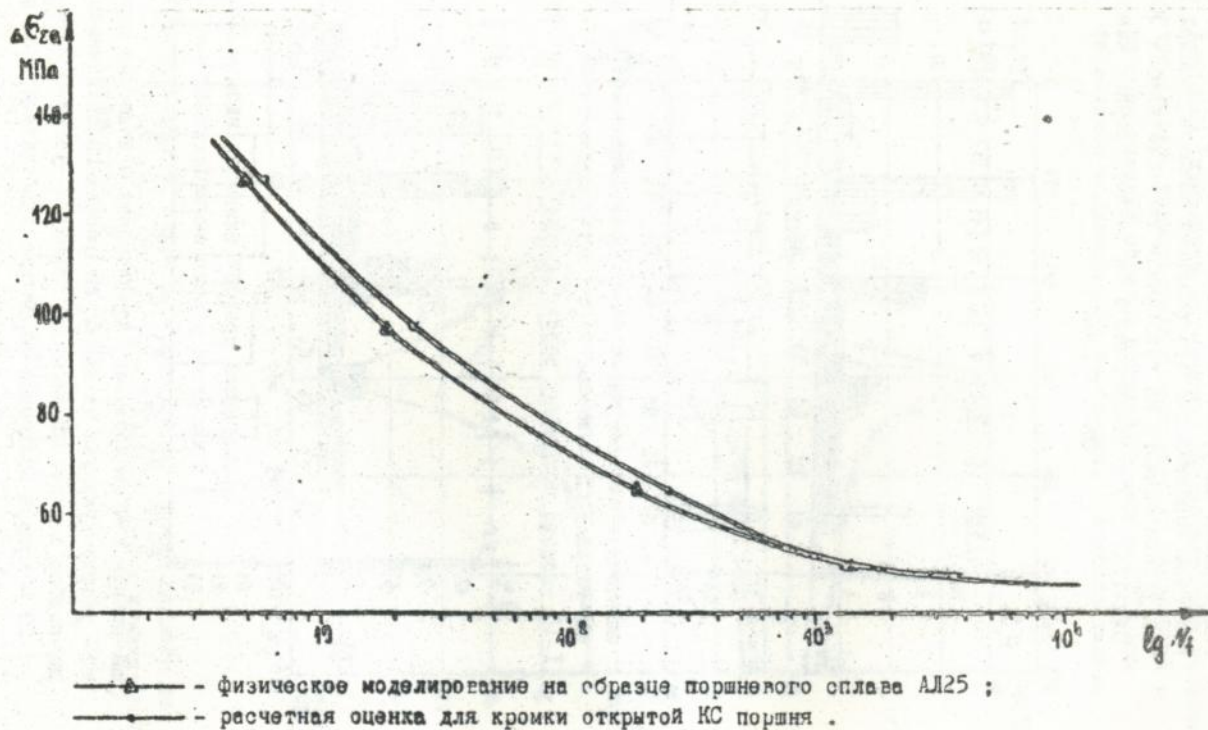


Рис. 5

Ответственный за выпуск
РАЗЛЕЙЦЕВ Н. Ф.

Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,07. 100 экз. 3. 45

Харьковский авиационный институт

310070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17

Ротап rint типографии ХАИ

310070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17

465813

AB 27.594