БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.185.532

БЛОХИН
Алексей Владимирович

НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности
05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

Минск, 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель **Бельский Сергей Евграфович,**
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Детали машин и подъемно-транспортные устройства» учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Берестнев Олег Васильевич,**
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заместитель заведующего отделом ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»;
Капуста Павел Павлович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Детали машин, подъемно-транспортные машины и механизмы» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация – РУП «Минский тракторный завод»

Защита состоится «28» сентября 2012 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости 65, корп. 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря совета: 292 24 04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «____»_____2012 г.

Ученый секретарь совета по защите
диссертаций Д 02.05.03,
доктор технических наук, профессор О. Г. Девойно

© Блохин А. В., 2012
© Белорусский национальный
технический университет, 2012

Введение

Многие детали машин, работающие в условиях циклического нагружения при нормальных и повышенных температурах (поршни двигателей и компрессоров, шатуны компрессоров, трубопроводы, радиаторы и теплообменники, корпуса навесного оборудования двигателей и редукторов, крышки корпусов, клапанные крышки, кронштейны и т.п.) изготавливаются из алюминиевых сплавов. Их использование в транспортном машиностроении, определяемое высокими показателями удельной прочности, повышенной коррозионной стойкостью, а также способностью к поглощению энергии колебаний, имеет устойчивую тенденцию к росту. В настоящее время в связи с дефицитностью, высокой стоимостью, энергоемкостью и экологическими проблемами получения первичного алюминия значительная часть деталей, особенно изготавливаемых методом литья (корпуса и их крышки, кронштейны, фитинги), производится из сплавов (типа АК9М2, АК8М3 и др.), содержащих вторичное сырье. Такие материалы имеют большое количество интерметаллидных фаз, неметаллических включений, растворенных газов, отличаются гетерогенностью структуры. Механические и особенно их усталостные характеристики значительно уступают свойствам первичных алюминиевых сплавов, что существенно ограничивает возможности использования вторичных сплавов для изготовления деталей машин, работающих в условиях циклического нагружения, снижает надежность и конкурентоспособность выпускаемых изделий. Расширение сферы использования вторичных литейных алюминиевых сплавов требует существенного повышения их усталостных характеристик. Для решения данной задачи, прежде всего, необходим большой объем усталостных испытаний. В настоящее время наиболее широко используются низкочастотные (частота нагружения до 300 Гц) методы определения характеристик усталости (ГОСТ 25.502-79). Однако проведение таких испытаний требует больших временных и материальных затрат, т.к. для построения кривой усталости соответствующей 50% вероятности разрушения требуется осуществить нагружение не менее 15 образцов. Для снижения трудоемкости испытаний на больших базах (для сплавов цветных металлов 10^7-10^8 циклов) и обеспечения оперативного контроля характеристик усталости весьма перспективным является использование высоких (1-20 кГц и более) частот нагружения позволяющих существенно снизить время наработки заданного числа циклов. Однако имеющиеся в литературе сведения по влиянию частоты нагружения на усталостные характеристики вторичных алюминиевых сплавов практически отсутствуют, недостаточно изучено влияние на них повышенных температур, характерных для эксплуатации ряда деталей двигателей, компрессоров, а существующие методы определения низкочастотных характеристик усталости по результатам высокочастотного нагружения в силу своих ограничений не представляется возможным применить для вторичных литейных алюминиевых сплавов при нормальных и повышенных температурах испытаний. В этой связи научное обеспечение методики ускоренного определения характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов, повышение точности и достоверности таких испытаний, а также совершенствование испытательного оборудования является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006-2010 годы (Постановление №512 Совета Министров Республики Беларусь от 17 мая 2005 г.). Диссертация является частью исследований, проводимых на кафедре «Детали машин и ПТУ» БГТУ в 2000-2011 гг., в соответствии с заданием Министерства образования РБ «Исследование влияния параметров циклического нагружения на процессы усталостной повреждаемости металлических материалов» (ГБ 22-012, № ГР 20022047, 2002-2003 гг.), заданием ГПОФИ, раздел «Надежность и безопасность – 18» «Разработка научных основ метода ускоренного прогнозирования циклической прочности металлических материалов» (ГБ 21-201, № ГР 20011556, 2001-2005 гг.), отдельным заданием Исполнительной программы межгосударственного научно-технического сотрудничества Беларуси и Украины «Исследование механизмов усталостного повреждения и повышение циклической прочности конструкционных материалов, работающих в экстремальных условиях» (БС 24-081, № ГР 2005322 2004-2006 гг.), заданием ГКПНИ «Механика», раздел 3.01 «Развитие теории и разработка методов определения параметров надежности сложных технических систем, мониторинга расходования и путей повышения ресурса работоспособности (на примере трансмиссий и несущих конструкций тракторов МТЗ и др.) с учетом оптимизации экономической эффективности их жизненного цикла» (ГБ 26-142, № ГР 20064122, 2006-2010 гг), отдельным заданием Исполнительной программы межгосударственного научно-технического сотрудничества Беларуси и Украины «Разработка технологий, обеспечивающих повышение механических, технологических и эксплуатационных свойств вторичных силуминов до уровня первичных (БС 10-096, № ГР 20103077, 2010-2012 гг.).

Цель и задачи исследования

Цель работы: научное обеспечение метода ускоренного (за счет повышения частоты нагружения образцов) определения характеристик многоцикловой усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов, используемых при изготовлении деталей машин работающих в условиях циклического нагружения при нормальных и повышенных температурах (20-200 °С).

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Обосновать и экспериментально подтвердить возможность использования высоких частот нагружения для ускоренного определения низкочастотных характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов.

2. Обосновать методику ускоренного определения характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов, в диапазоне температур 20-200ºС при нагружении знакопеременным изгибом, с использованием высоких частот нагружения

3. Установить экспериментально-аналитические зависимости напряженно-деформированного состояния образцов, учитывающие их геометрические параметры и физико-механические свойства вторичных литейных алюминиевых сплавов.

4. Выполнить расчет и анализ сил действующих на детали резьбового крепления для соединения образцов с концентратором-волноводом при проведении испытаний на высоких частотах нагружения и разработать конструкцию, обеспечивающую повышение его надежности, а также точности и достоверности определения характеристик усталости.

5. Выполнить экспериментальную проверку метода ускоренного определения характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов, обосновать способ их повышения, обеспечить его практическую реализацию для изготовления деталей, работающих в условиях циклического нагружения при нормальных и повышенных (до 200ºС) температурах.

Объект исследования: алюминиевые сплавы типа АК9М2, АК8М3, полученные с использованием вторичного сырья и применяемые для изготовления деталей машин (кронштейны, поршни и шатуны компрессоров и ДВС), работающих в условиях циклического нагружения при нормальных и повышенных температурах.

Предмет исследования: метод ускоренного определения усталостных характеристик типовых образцов из литейных алюминиевых сплавов и оборудование для его реализации.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты экспериментальных исследований влияния частоты (0,3-18кГц) и температуры испытаний (20-200^{o}С) на характеристики усталости, физико-механические свойства и структурные характеристики вторичных литейных алюминиевых сплавов, позволившие установить единство процессов накопления усталостной повреждаемости исследованных материалов в указанном диапазоне частот и температур и тем самым доказать возможность использования высоких частот нагружения для определения низкочастотных характеристик усталости;

– теоретическая зависимость критических напряжений начала развития процесса усталостного разрушения алюминиевых сплавов от амплитудно-частотных параметров колебаний с учетом влияния температуры (20-200^{o}С) на упругое взаимодействие примесей замещения с дислокациями, позволившая обосновать методику определения низкочастотных характеристик усталости по результатам высокочастотных испытаний;

– экспериментально-аналитические зависимости для первой и второй форм колебаний напряженного состояния образца от амплитуды колебаний его свободного конца в условиях нагружения циклическим изгибом, учитывающие физико-механические свойства вторичных литейных алюминиевых сплавов и геометрические параметры образцов для испытаний, позволяющие повысить точность определения напряжений в различных сечениях образцов;

– результаты численного анализа сил, действующих на различных участках хвостовика образца, защемляемого на концентраторе-волноводе, учитывающие действие знакопеременных нагрузок, обосновавшие необходимость разработки новой конструкции крепления повышенной долговечности, обеспечившей точность определения характеристик усталости;

– результаты экспериментальной проверки разработанного метода, позволившие определить характеристики усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов типа АК9М2, АК8М3 в диапазоне температур 20-200ºС, на основании ко-

торых установлено предельное содержание железа в таких материалах, необходимое количество рафинирующе-модифицирующих добавок, а также разработаны режимы термоциклической обработки таких материалов, обеспечившие повышение усталостных характеристик, изготавливаемых из таких материалов деталей, работающих в условиях циклического нагружения.

Личный вклад соискателя

Автором обоснована актуальность исследований, модернизирован комплекс испытательного оборудования, разработан метод ускоренных усталостных испытаний при повышенных температурах, проведен расчет экспериментальных моделей, предложена конструкция их крепления. Цель и задачи исследований сформулированы совместно с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом С. Е. Бельским. Соискателем разработан теоретический расчет, позволяющий определить критические напряжения начала процесса усталостного разрушения алюминиевых сплавов, учитывающий влияние температурного фактора и наличие примесей в металле; впервые исследованы при нормальной и повышенной температурах усталостные характеристики широкой номенклатуры алюминиевых сплавов в диапазоне частот 0,3-18,0 кГц. С использованием предложенного метода автором впервые определено рациональное количество рафинирующе-модифицирующих добавок и влияние термической обработки на усталостные характеристики алюминиевых сплавов, изготовленных с применением вторичного сырья, разработан способ термоциклической обработки, обеспечивающий их повышение. Теоретические исследования взаимодействия дислокаций с примесными атомами в процессах передачи энергии механических колебаний и влияние на эти процессы частоты колебаний с учетом температурного фактора проводились совместно с доктором физико-математических наук, профессором В. Р. Соболем, экспериментальные исследования усталостных характеристик алюминиевых сплавов – с кандидатом технических наук, доцентом Ф. Ф. Царуком, что отражено в совместных публикациях.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты работы доложены и обсуждены на Международной конференции «Современные технологии, материалы, машины и оборудование» (Могилев-2002), IV Международном симпозиуме по трибофатике (Тернополь-2002), I-III Международных конференций «Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технологии изготовления» (Минск-2002, 2005, 2008), Международной конференции «Прогрессивная технология, технологические процессы и оборудование» (Могилев-2003), Международной конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (Минск-2003), VIII республиканской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Минск-2003), III Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов (Минск-2003), Международной конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (Минск-2004), Международной конференции «Современные технологии, материалы и оборудование» (Могилев-2004), Международной конференции «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев-2004), Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела (Минск-2005), Международной научно-технической конференции

«Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск-2005), Международной научной конференции «Литейное производство и металлургия» (Барановичи-2006), научно-техническом семинаре «Эффективность научно-исследовательской работы высших учебных заведений и проблемы внедрения результатов в производство» (Минск-2007), 67-76 конференциях профессорско-преподавательского состава БГТУ (Минск, 2002-2012 г.г.).

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований опубликовано 23 печатные работы; в том числе 6 научных статей в включенных в Перечень ВАК изданиях, объемом 1,4 авторских листа, 9 статей в прочих изданиях, 6 материалов и 2 тезиса докладов научных конференций, получено 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 203 наименования, в том числе 23 публикации соискателя и приложения. Работа изложена на 226 страницах, включая 91 иллюстрацию на 48 страницах, 16 таблиц на 8 страницах, приложения на 49 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены особенности конструкции и условия работы ряда основных деталей двигателей и компрессоров (поршни, шатуны, кронштейны, корпуса и крышки навесного оборудования, редукторов, трубопроводы, теплообменники и др.), изготавливаемых из литейных алюминиевых сплавов. Показана необходимость повышения физико-механических характеристик материалов для обеспечения надежности и долговечности таких изделий. Отмечено, что в связи с дефицитом и высокой стоимостью первичных сплавов алюминия для производства широкой номенклатуры деталей используют сплавы, содержащие значительное количество интерметалидных фаз, газовых и усадочных пор и, следовательно, имеющие нестабильные механические характеристики (предел прочности, предел выносливости, относительное удлинение и др.), которые зависят от состава шихты и других технологических факторов. Усталостные характеристики таких материалов значительно уступают свойствам первичных алюминиевых сплавов, что существенно ограничивает их применение для изготовления деталей, работающих в условиях циклического нагружения.

Совершенствование технологии производства изделий из вторичных литейных алюминиевых сплавов, прежде всего, требует реализации большого объема усталостных испытаний. Они проводятся, как правило, при низких частотах нагружения (0,1-100 Гц) и поэтому характеризуются значительным временем, высокими трудо- и энергозатратами. Поэтому для сокращения их стоимости, особенно при значительных (10^7-10^8) базах, целесообразно использовать высокие частоты нагружения, обеспечивающие за меньшее время наработку заданного числа циклов.

Однако в связи с отличием характеристик усталости, полученных на различных частотах нагружения, необходимы теоретические и экспериментальные иссле-

дования влияния частоты проведения испытаний на процесс усталостного разрушения литейных алюминиевых сплавов.

Существующие методы определения низкочастотных характеристик усталости по результатам высокочастотного нагружения, либо применяются для ограниченного круга материалов (материалы для которых определяется горизонтальный участок на кривой усталости), либо используют энергетические критерии усталостного разрушения, основанные на измерении количества тепловой энергии выделяемой при нагружении на различных частотах, реализация которого требует сложного и дорогостоящего оборудования, а использование такого подхода при испытаниях в условиях повышенных температур еще больше усложняет измерение рассеяния энергии образцов

Анализ литературы показал, что в настоящее время недостаточно систематизированных данных, позволяющих корректно учитывать влияние амплитудно-частотных параметров нагружения на изменение усталостных характеристик и физико-механических свойств (ФМС) литейных алюминиевых сплавов, так как многие испытания проводились в несопоставимых условиях и преимущественно на деформируемых сплавах, таких как Д16 и АМг. Практически отсутствуют системные исследования влияния температуры и частоты испытаний на сопротивление усталости деталей машин и элементов их конструкций.

Следует отметить, что разработка метода испытаний требует совершенствования испытательного оборудования и приборного обеспечения. Для повышения точности и достоверности определения характеристик усталости алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья, необходим единый подход к установлению момента разрушения образцов при испытаниях, а также корректное определение их напряженно-деформированного состояния. С целью снижения рассеяния характеристик сопротивления усталости исследуемых материалов необходимо совершенствование элементов конструкции крепления образцов при высокочастотных испытаниях. Выполнение значительного объема усталостных испытаний вторичных алюминиевых сплавов обеспечит повышение их усталостных характеристик путем совершенствования технологий выплавки и термической обработки.

На основании анализа теоретических и экспериментальных исследований влияния частоты нагружения на усталостные характеристики алюминиевых сплавов и существующих методов испытаний сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны испытательное оборудование и методика исследования физико-механических свойств образцов из вторичных алюминиевых сплавов при их нагружении знакопеременным изгибом в диапазоне частот 0,3-18,0 кГц, а также расчеты элементов колебательных систем. Для низкочастотного нагружения (0,3 кГц) использован электромагнитный вибростенд, при частотах нагружения 3,0, 9,0, 18,0 кГц - магнитострикционные установки, разработанные на кафедре «Детали машин и подъемно транспортные устройства» БГТУ. Для проведения испытаний при повышенных температурах испытательный комплекс был дополнительно оборудован стационарными нагревательными печами с контрольно-измерительным оборудованием. Испытания проводились путем циклического нагружения образцов

знакопеременным изгибом при симметричном цикле, что позволяло реализовать резонансный режим колебаний образцов без применения дополнительных согласующих элементов.

Образцы для испытаний представляли собой балочки с прямоугольным поперечным сечением 6х2 мм, которые вырезались из слитков или из деталей, затем подвергались шлифовке, электрополировке, а при необходимости - термообработке. Выбор такой формы образцов представляется наиболее удобным как с точки зрения их подготовки, проведения испытаний, определения напряжений в необходимых сечениях, так и дальнейших исследований физико-механических характеристик. Микротвердость измерялась на приборах ПМТ-3М и Duramin5 (Struers, Дания), электросопротивление определялось на стенде с использованием измерителя иммитанса Е7-20, плотность дислокаций и микронапряжения – с помощью рентгеновских дифрактометров ДРОН-3 и Bruker.

В третьей главе приведены результаты усталостных испытаний вторичных алюминиевых сплавов, определена зависимость влияния частоты механических колебаний на развитие усталостной повреждаемости сплавов с учетом температурного фактора. Экспериментально доказано, что форма кривых усталости с увеличением частоты не изменяется. Исследованные вторичные алюминиевые сплавы не имеют горизонтального участка, как на низкой частоте, так и на высоких частотах, а кривые усталости для разных частот располагаются практически эквидистантно, что позволяет говорить о возможности использования высоких частот нагружения для определения низкочастотных характеристик усталости. Анализ результатов испытаний показал, что с ростом частоты для различных баз нагружения характерно монотонное увеличение усталостной долговечности, растут (в 1,5-2,5 раза) и величины пределов ограниченной выносливости (рисунок 1), а повышение температуры приводит к монотонному снижению усталостных характеристик (в 1,1-1,6 раза в исследованном диапазоне температур) на всех базах испытаний (рисунок 2). Исследование изменения микротвердости, микронапряжений и плотности дислокаций показало, что характер их изменений при росте частоты сохраняется как при нормальных, так и повышенных температурах (рисунок 3), что подтверждает возможность

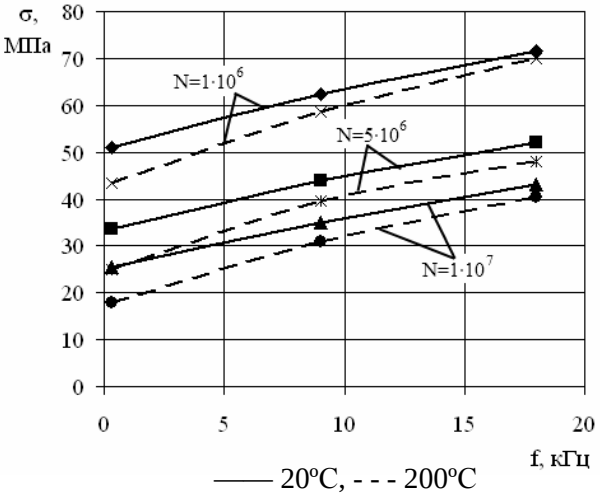
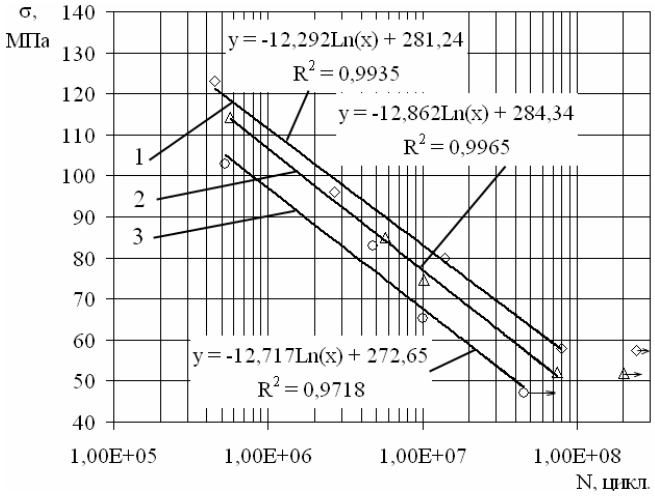


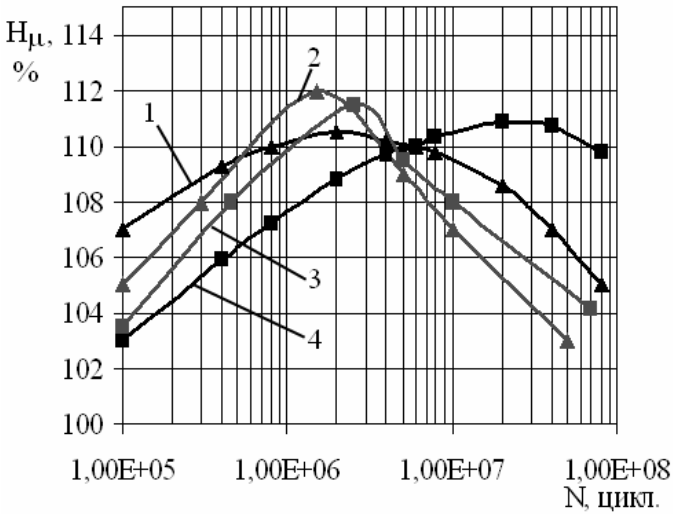
Рисунок 1 – Пределы ограниченной выносливости сплава АК8М3 при различных частотах и базах нагружения



1 – 20°С; 2 – 100°С; 3 – 200°С

Рисунок 2 – Усталостные кривые сплава АК9М2 (частота испытаний 18 кГц)

использования высоких частот нагружения для проведения испытаний в рассмотренном диапазоне температур.



1 – 0,3 кГц (20°С); 4 – 18,0 кГц (20°С);
2 – 0,3 кГц (200°С); 3 – 18,0 кГц (200°С)

Рисунок 3 – Изменение микротвердости сплава АК9М2

Для теоретической оценки влияния частоты испытаний на развитие процесса усталостного разрушения и выбора критерия позволяющего определять низкочастотные характеристики усталости по результатам высокочастотного нагружения были рассмотрены особенности поведения дислокационного источника Франка-Рида, находящегося в условиях воздействия знакопеременного напряжения различной частоты в рамках приближенной модифицированной с учетом влияния температуры на упругое взаимодействие примесей замещения с дислокациями и точечными дефектами модели Келлера.

В результате была получена зависимость, позволяющая определить влияние частоты нагружения на критические напряжения, характеризующие начало развития процесса усталостного разрушения сплавов с учетом температурного фактора:

$$\sigma = \frac{Gb}{l}\left[\frac{6}{\pi(1-\mu)}\left(1+\left(\frac{\omega B l^2 \pi(1-\mu)}{4Gb^2}\right)^2\right)+\frac{l\varepsilon c_0}{4b}\exp\left(\frac{W}{kT}\right)\right], \quad (1)$$

где b – вектор Бюргерса; B – коэффициент определяющий силу динамического вязкого трения сегмента; G – упругий модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона; ω – частота знакопеременной силы внешнего источника напряжения; $\varepsilon = \frac{R_i - R_0}{R_0}$ – относительная разность радиусов примесных атомов R_i и собственных атомов R_0; c_0 – объемная равновесная концентрация примесных атомов вдали от дислокационного сегмента, T – абсолютная температура; l – длина дислокационного сегмента; k – постоянная Больцмана, W – энергия связи сегмента с примесными атомами.

Установлено, что при амплитудах σ_a, превышающих определенное значение (критические напряжения) происходит необратимое смещение и увеличение числа дислокаций, при этом для достижения одинакового уровня смещения дислокаций на высоких частотах требуется более высокие уровни напряжений, а изменение температуры в пределах 20-200°С не оказывает существенного влияния на механизм смещения дислокационного сегмента и с ее возрастанием частотная зависимость σ_a не изменяется (рисунок 4). Таким образом, показана принципиальная возможность использования высоких частот нагружения для определения характеристик сопротивления усталости литейных алюминиевых сплавов при повышенных температурах. Для исследованных материалов экспериментально определены пороговые напряжения ниже которых структурные изменения на микроуровне отсутст-

вуют. Характер частотных зависимостей теоретически рассчитанных критических напряжений начала процесса усталостного разрушения и пороговых напряжений, практически одинаков, что свидетельствует о корректности теоретического расчета.

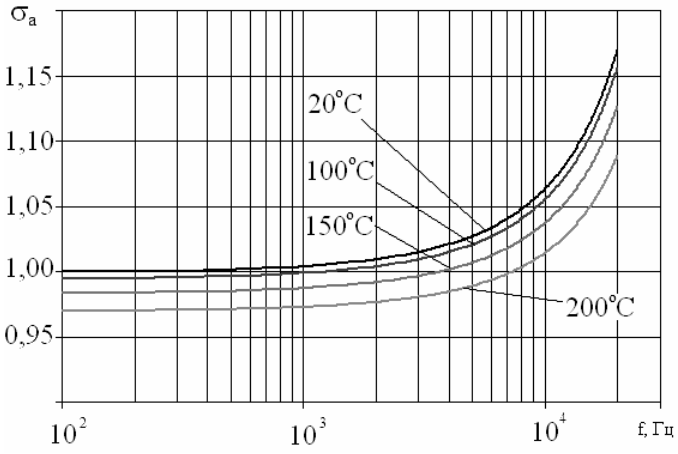


Рисунок 4 – Зависимость критических напряжений от частоты колебаний при различных температурах

Установлено, что частотные зависимости пределов ограниченной выносливости (σ_{-1}) и пороговых напряжений ($\sigma_П$) вторичных литейных алюминиевых сплавов в рассмотренном диапазоне температур эквидистантны, разность σ_{-1} и $\sigma_П$ в диапазоне частот 0,3-18,0 кГц величина практически постоянная (колебания не более 10%). Это позволяет предложить метод определения низкочастотных характеристик многоцикловой усталости таких материалов с использованием высоких частот нагружения.

Разработанный метод предполагает проведение следующих операций (рисунок 5): 1 – подготовка образцов; 2 – измерение микротвердости образцов до на

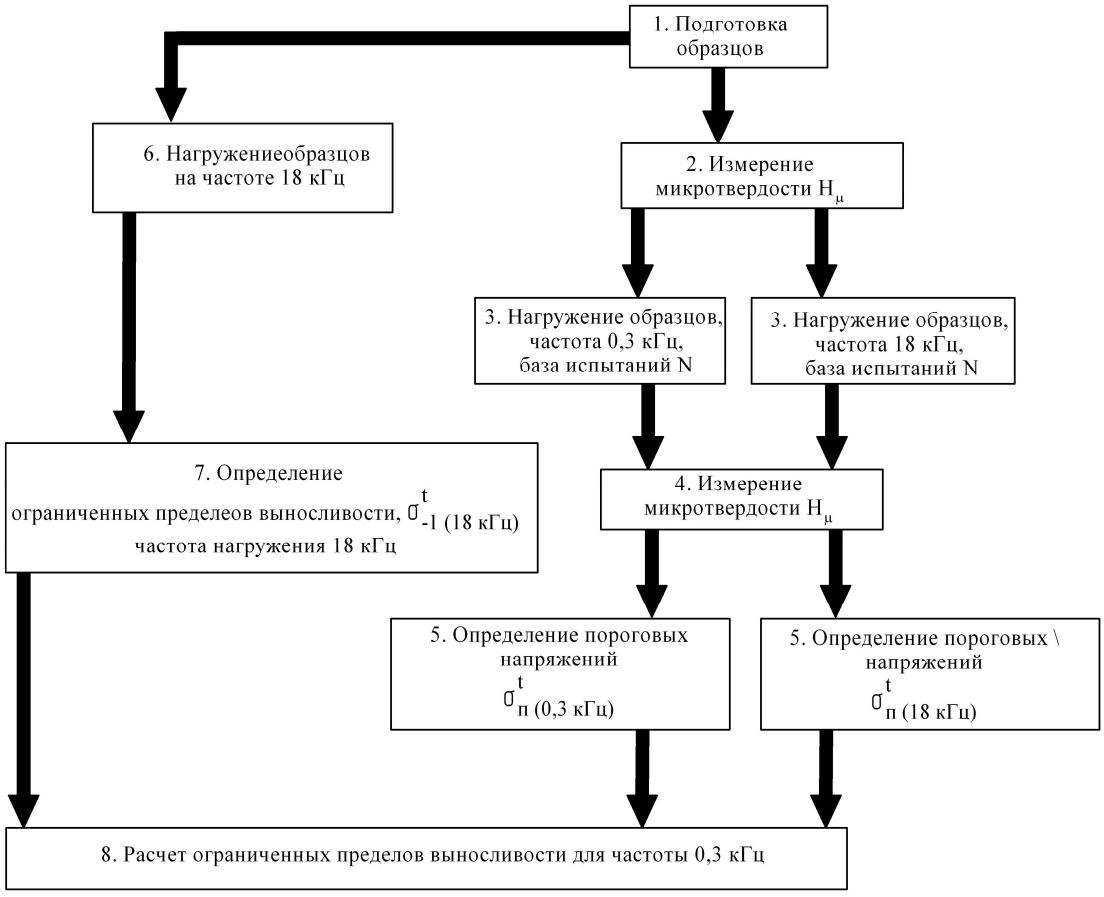


Рисунок 5 – Последовательность операций при ускоренном определении характеристик усталости по результатам высокочастотного нагружения

гружения; 3 – нагружение образцов на низкой (0,3 кГц) и на высокой (18кГц) частотах на заданной базе при необходимой температуре испытаний; 4 – измерение микротвердости образцов после нагружения; 5 – сравнение результатов измерения микротвердости до и после нагружения, определение пороговых напряжений на низкой частоте (0,3 кГц) $\sigma^{t}_{п(0,3\ кГц)}$ и на высокой частоте (18 кГц) $\sigma^{t}_{п(18\ кГц)}$; 6 – параллельно операциям 2 и 3 производится нагружение образцов на высокой частоте (18кГц) на заданных уровнях напряжений с дальнейшим определением высокочастотных ограниченных пределов выносливости (операция 7); 8 – расчет низкочастотных ограниченных пределов выносливости по зависимости (2).

$$\sigma^{t}_{-1(0,3\ кГц)} = \sigma^{t}_{n(0,3\ кГц)} + \left(\sigma^{t}_{-1(18\ кГц)} - \sigma^{t}_{п(18\ кГц)}\right). \qquad (2)$$

Пример расчета низкочастотного предела ограниченной выносливости показан на рисунке 6. Выполнение указанных операций разработанным методом позволяет сократить время проведения исследований в 10-15 раз как при нормальных так и при повышенных температурах.

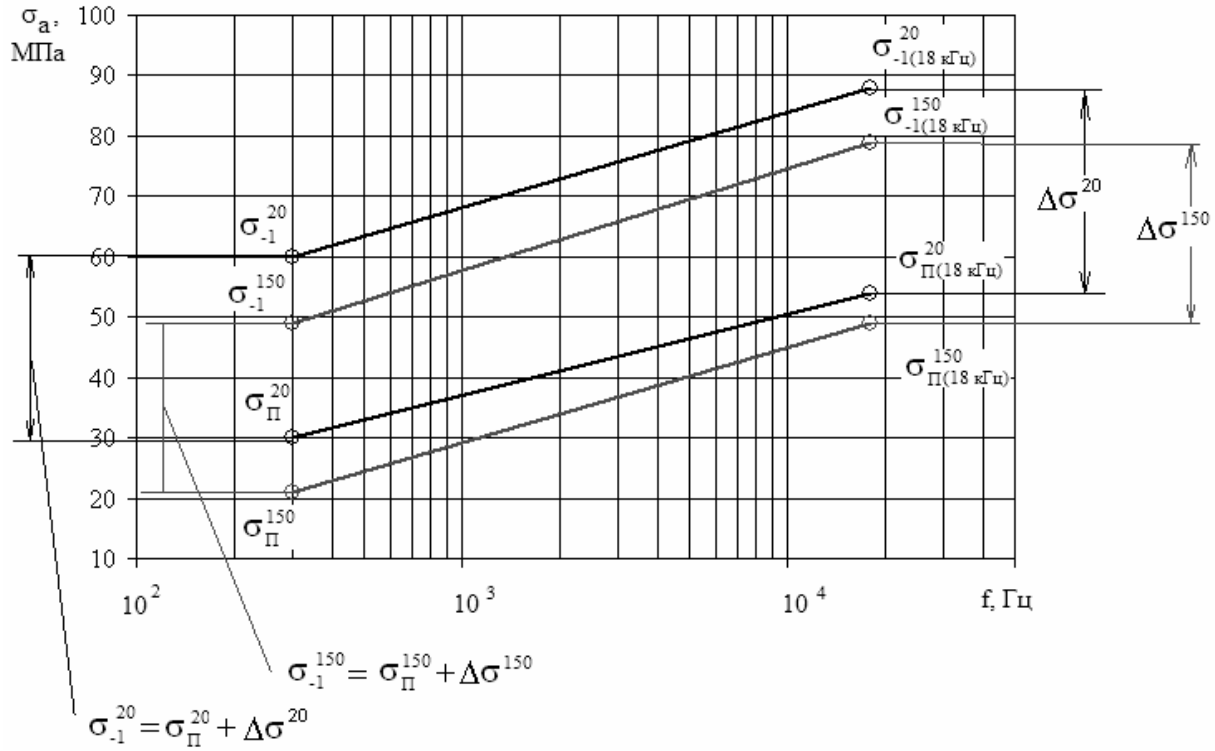
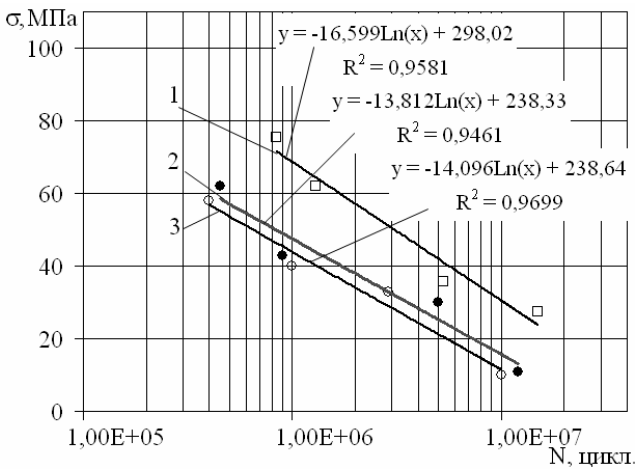


Рисунок 6 – Схема расчет предела ограниченной выносливости для сплава АК9М2

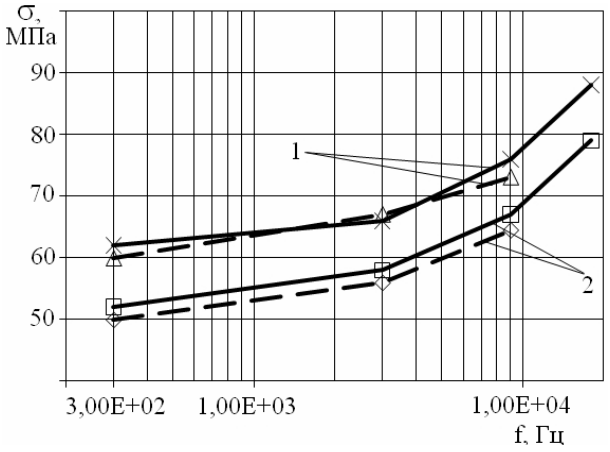
Экспериментальной проверкой разработанного метода установлена высокая степень сходимости его результатов с результатами испытаний на низких частотах. Их разность не превышала 10-25% как при нормальных, так и при повышенных (до 200°С) температурах (рисунки 7 и 8).

Оценка неопределенности проводилась эмпирическим методом, при этом ее величина достигала 40%. Было установлено, что основной вклад вносит среднее квадратическое отклонение предела выносливости полученного на основании испытаний на высокой частоте (18 кГц), что вызвало необходимость совершенствования методического обеспечения предложенного метода с целью повышения его точности.



1 – частота нагружения 18 кГц; 2 – частота нагружения (0,3 кГц); 3 – прогнозируемая низкочастотная кривая по результатам высокочастотных испытаний

Рисунок 7 – Результаты усталостных испытаний сплава АК9М2



1 – 20ºС; 2 – 200ºС

Рисунок 8 – Экспериментальные (——) и прогнозируемые (- - -) пределы выносливости сплава АК9М2 при различных температурах

В четвертой главе для повышения точности разработанного метода определения характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов экспериментальным путем были установлены зависимости между изменениями резонансной частоты колебаний системы и относительного числа циклов нагружения. Анализ полученных результатов показал, что для литейных алюминиевых сплавов, в отличие от деформируемых, устойчивое снижение резонансной частоты колебаний фиксируется при меньших базах нагружения ($N=1\cdot10^6$-$5\cdot10^6$ циклов). Было установлено, что усталостная трещина достигает размеров соответствующих усталостному разрушению при падении частоты испытаний на 0,3-0,5 % для низкочастотного нагружения (0,3кГц), на 7-9% – для высокочастотного нагружения (18кГц), что позволило единообразно подходить к выбору момента разрушения образцов

Контроль достижения необходимой степени повреждения образцов по относительной площади усталостного разрушения на изломе для разных частот колебаний позволил уменьшить разброс результатов эксперимента, а проведение испытаний в автоколебательном режиме обеспечило возможность более точно определять по изменению резонансной частоты колебаний системы степень усталостного повреждения материала образца.

Для повышения точности определяемых значений пределов выносливости исследуемых материалов, как на низких (0,3 кГц), так и на высоких частотах нагружения (18 кГц), был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния образцов, в основу которого положено общее уравнение технической теории стержней. Для учета влияния податливости заделки, жесткости прикорневого участка образца, смещения опасного сечения от заделки на напряженно-деформированное состояние образцов были проведены расчеты методом конечных элементов с помощью прикладного пакета ANSYS. На основании исследований были получены новые экспериментально-аналитические зависимости напряженного состояния образцов, нагружаемых знакопеременным изгибом при возбуждении

через заделку для первой и второй форм собственных колебаний, позволяющие определять напряжения в необходимом сечении образца по формуле:

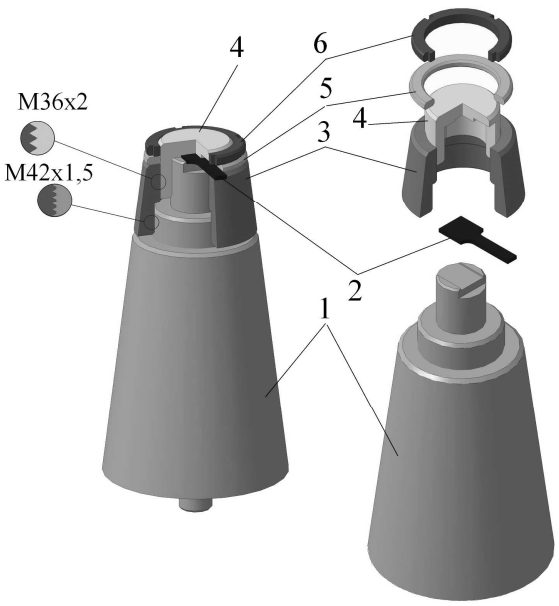
$$\sigma_a(x = x_p) = \psi_З \cdot \psi_П \cdot \psi_X \cdot A_m \cdot \sigma(x = x_p), \quad (3)$$

где A_m – амплитуда колебаний свободного конца образца; $\sigma(x=x_p)$ напряжения, рассчитанные на основании уравнения технической теории стержней; $\psi_З$ – коэффициент учитывающий влияние податливости заделки; $\psi_П$ – коэффициент учитывающий влияние увеличения площади поперечного сечения переходного участка образца (для второй формы колебаний коэффициент $\psi_П$=1); ψ_X – коэффициент учитывающий влияние жесткости прикорневого участка образца. При этом было установлено, что поправочные коэффициенты принимали следующие значения: $\psi_З$=(0,94-1,00), $\psi_П$ =(1,00-1,06), ψ_X =(0,90-0,99).

Анализ результатов испытаний модельных образцов методом тензометрирования показал их адекватность теоретическим данным, полученным по зависимости (3). Разность результатов составила 3-5%.

Форма и размеры крепления образцов с концентраторами колебаний определялись требованиями минимизации резонансно-колеблющихся масс ввиду ограниченной мощности экспериментальных установок. Установлено, что использование известных креплений приводило либо к недостаточной точности позиционирования образца, низкой добротности системы, либо они показывали низкую надежность в эксплуатации. Их использование для вторичных литейных алюминиевых сплавов приводит к существенному увеличению рассеяния характеристик сопротивления усталости, что повышает в 2-3 раза длительность испытаний.

Для повышения надежности крепления образца на основании анализа сил действующих на его детали разработано и запатентовано (патент РБ № 12691) устройство крепления (рисунок 9), обеспечивающее стабильность коэффициента трения при воздействии высокочастотных колебаний (18 кГц) за счет повышения силы затяжки. Предложенная конструкция позволила повысить точность позиционирования образца относительно концентратора за счет соосных прорезей на хвостовике концентратора 1 (рисунок 9) и прижимной гильзы 4. Результаты сравнительных испытаний на частоте 18 кГц показали снижение рассеяния характеристик сопротивления усталости на 25-30%, что позволило повысить точность и достоверность их определения, снизить расход исследуемых материалов и трудоемкость испытаний.



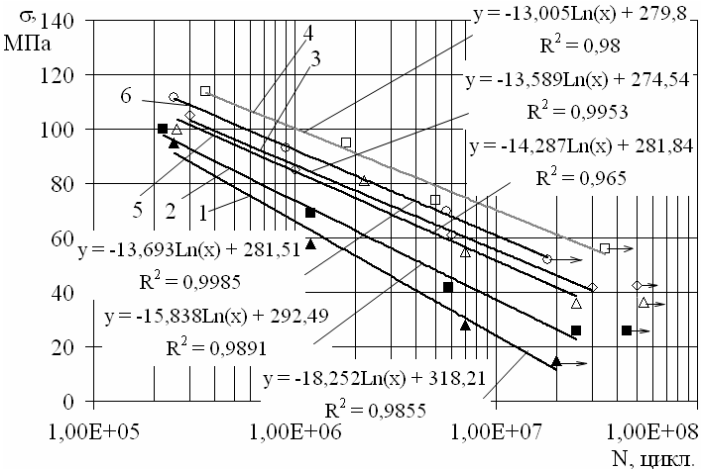
1 – концентратор; 2 – образец; 3 – дифференциальная гайка; 4 – прижимная гильза; 5 – прокладка; 6 – контргайка

Рисунок 9 – Устройство крепления образца для усталостных испытаний при нагружении знакопеременным изгибом на высоких частотах

Использование предложенной конструкции крепления образцов и расчетных зависимостей для определения напряженно-деформированного состояния образцов по-

зволило уменьшить неопределенность нахождения предела выносливости вторичных литейных алюминиевых сплавов предлагаемым методом до 20%. При этом разность с результатами испытаний, полученными на низкой частотой нагружения, составляла не более 10%.

В пятой главе представлены результаты исследования характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов с использованием предложенного метода. Сокращение времени нагружения образцов позволило выполнить значительный объем испытаний, в ходе которых определено рациональное количество предложенного специалистами Запорожского национального технического университета (Украина) рафинирующе-модифицирующего состава (РМС), содержащего Na_2CO_3 – 25-40 %, SiC – 10-20 %, KCl – 10-15 %, Ti – 3-8%, S – остальное (патент Украины № 57584А). Показано, что введение 0,06-0,08 % РМС обеспечивает снижение среднего значения параметра формы интерметаллидов λ с 5,8-6,75 до 3,94-4,21, что способствует смещению кривых усталости в область более высоких напряжений (рисунок 10) и, как следствие, повышение усталостных характеристик на 40-50 % на всех рассматриваемых частотах нагружения. Установлено, что для обеспечения стабильности усталостных характеристик (снижение не более чем на 10-15 %) содержание железа не должно превышать 1,0-1,1 %.



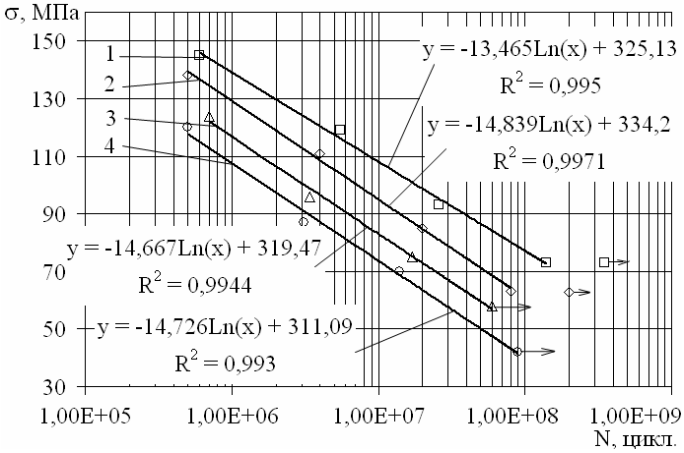
1 – без обработки; 2 – 0,05% модификатора;
3 – 0,06% модификатора; 4 – 0,07% модификатора;
5 – 0,08% модификатора; 6 – 0,09% модификатора

Рисунок 10 – Результаты усталостных испытаний сплава АК9М2, выплавленного из лома (алюминиевая стружка)

Результаты исследований были апробированы при изготовлении опытной партии отливок деталей радиатора АКСМ 201-732000 и поршня 682В-292402 в условиях ОАО «БЕЛНИИЛИТ» с использованием вторичных литейных сплавов АК9М2, АК8М3, Ал25, АК5М4 при плавке которых добавлялись рафинирующее-модифицрующие составы Запорожского национального технического университета. Предлагаемая технология позволила снизить расход универсального флюса с 2,20% до 0,05% от массы жидкой ванны без снижения качественных показателей отливок. Аналогичные результаты были получены в ходе проведения опытно-промышленной плавки партии алюминиевого сплава АК5М2 в литейном цехе №3 РУП «МТЗ».

Использование разработанного метода ускоренного определения характеристик усталости позволило предложить режимы термоциклической обработки (патент РБ № 12582), включающей термоциклирование перед закалкой, закалку и старение путем термоциклирования. Использование такой обработки, обеспечило повышение усталостных характеристик сплавов АК9М2 и АК8М3 в 1,4-1,5 раза (рисунок 11) по сравнению со стандартной термообработкой Т5. Разработанные режимы термоциклической обработки вторичных сплавов способствуют более равно-

мерному распределению термических напряжений и дроблению железосодержащих фаз, прежде всего, Al3Fe (снижение среднего значения параметра формы интерметаллидов λ с 3,94-4,21 до 2,73-3,21). Эффективность термоциклической обработки была опробована в производственных условиях ОАО «БЕЛНИИЛИТ» на алюминиевых сплавах АК9, АК9М2, АК8М3, АЛ25, АК5М4. Использование термоциклической обработки позволило повысить усталостные характеристики в 1,3-1,4 раза. На этом же предприятии была изготовлена опытная партия детали кронштейн педали тормозной (ТУ ВУ 100354059.091-2011) из алюминиевого сплава АК9М2, полученного с использованием вторичного сырья. Было установлено, что применение разработанных режимов термоциклической обработки позволило повысить предел прочности на 15-20%, циклическую долговечность – на 40-50%.



1 – 1,0 % Fe + T5; 2 – 1,3 % Fe + T5;
3 – 1,5 % Fe + T5; 4 – 1,5 % Fe + термоциклическая обработка

Рисунок 11 – Результаты усталостных испытаний на частоте 18 кГц сплава АК9М2 с различным содержанием железа и различной термообработкой

Разработанные режимы термоциклической обработки были опробованы на предприятии ОАО «Мотор Сич» (Украина) для изготовления опытной партии деталей к двигателям моторных лодок и бензопил, работающих в условиях статического и динамического нагружения, изготовленных из алюминиевых сплавов, с содержанием в шихте до 50% вторичного сырья. Экспериментальная проверка показала, что по механическим и эксплуатационным свойствам они не уступают деталям, изготовленным из первичных сплавов. Использование вторичного сырья позволило снизить себестоимость этих деталей на 15-20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате экспериментальных исследований влияния частоты нагружения на характеристики усталости и физико-механические свойства различных алюминиевых сплавов установлено, что изменение частоты знакопеременных колебаний с 0,3 до18 кГц приводит к росту пределов ограниченной выносливости в 1,5-2,5 раза. Анализ частотных зависимостей характеристик усталости и физико-механических свойств таких материалов позволил установить их качественно одинаковый характер, а разность пределов ограниченной выносливости и пороговых напряжений в исследованном диапазоне частот величина постоянная (колебания менее 10%). Повышение температуры испытаний (до 200ºС) приводило к снижению характеристик усталости в 1,1-1,6 раза без изменения характера частотных зависимостей пределов ограниченной выносливости, пороговых напряжений и физико-механических свойств таких материалов, что позволило установить единство

механизмов накопления усталостной повреждаемости исследованных материалов в указанном диапазоне частот и температур [2, 8, 14, 15, 16, 18, 20, 21].

2. В результате теоретических исследований приближенной, модифицированной с учетом влияния температуры модели Келлера, установлена зависимость критических напряжений начала развития процесса усталостного разрушения алюминиевых сплавов от амплитудно-частотных параметров колебаний с учетом влияния температуры (20-200ºС) на упругое взаимодействие примесей замещения с дислокациями. Ее графический анализ показал, что с ростом частоты колебаний (0,3-18 кГц) критические напряжения возрастают на 15% и более, а повышение температуры приводит к их снижению во всем диапазоне частот без изменения характера зависимости, что позволило предложить методику определения низкочастотных характеристик усталости по результатам высокочастотных испытаний в указанном диапазоне температур с обеспечением сокращения времени проведения испытаний в 10-15 раз [1, 3, 4, 5, 17, 19].

3. На основании расчета напряженно-деформированного состояния консольно закрепленных нагружаемых знакопеременным изгибом на первой и второй формах колебаний с возбуждением через заделку образцов для испытаний установлены и экспериментально подтверждены аналитические зависимости напряжений, действующих в различных сечениях образцов от амплитуды колебаний, учитывающие физико-механические свойства вторичных алюминиевых сплавов и геометрические параметры образцов. Экспериментальная проверка на модельных образцах методами тензометрирования показала разбежку 3-5% с результатами, полученными с использованием полученной зависимости. В результате экспериментальных исследований влияния относительного числа циклов нагружения на изменение резонансной частоты колебаний системы было установлено, что усталостная трещина достигает размеров соответствующих усталостному разрушению при падении частоты испытаний на 0,3-0,5 % для низкочастотного нагружения (0,3кГц), на 7-9% – для высокочастотного нагружения (18кГц), что позволило единообразно подходить к выбору момента разрушения образцов [1, 3, 7, 11, 13, 18].

4. На основании расчетно-аналитических исследований сил, действующих на различных участках хвостовика образца для испытаний, изготовленного из исследованных материалов, при нагружении знакопеременным изгибом на высоких частотах (18 кГц), установлено, что амплитудные значения знакопеременных сил могут достигать 1,0-2,0 кН, что вызвало необходимость разработки конструкции крепления образцов позволившей повысить ее надежность за счет увеличения диаметра резьбы, а также обеспечившей за счет повышения точности позиционирования образца для испытаний относительно концентратора-волновода снижение: рассеивания результатов испытаний на 20-30%; неопределенности результатов испытаний с 40 до 20%; разности с результатами исследований на низкой частоте нагружения до 10%; необходимого числа образцов для определения пределов ограниченной выносливости в 2-3 раза [12, 23].

5. На основании результатов экспериментальной проверки разработанного метода ускоренного определения усталостных характеристик установлено, что для вторичных литейных алюминиевых сплавов АК9М2, АК8М3 рациональное количество рафинирующе-модифицирующих добавок составляет 0,06-0,08 %, а количе-

ство железа в таких материалах не должно превышать 1,0-1,1%. Снижение среднего значения параметра формы интерметаллидов исследуемых материалов λ (с 5,8-6,75 до 3,94-4,21) обеспечило повышение усталостных характеристик на 40-50 %. Разработаны режимы термоциклической обработки, обеспечивающие дополнительное повышение усталостной долговечности исследованных материалов (АК9М2, АК8М3) в 1,4-1,5 раз за счет равномерного распределения термических напряжений и дробления железосодержащих фаз, прежде всего Al_3Fe (снижение среднего значения параметра формы интерметаллидов λ с 3,94-4,21 до 2,73-3,21). Повышение характеристик усталости было обеспечено как при 20ºС, так и при 200ºС [6, 9, 10, 22].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Метод ускоренного определения характеристик усталости литейных алюминиевых сплавов (МПИУ 0911/01 – 2011), устройство крепления образца к концентратору при высокочастотных испытаниях (патент РБ № 12691), уточненный расчет напряжений в опасном сечении для различных форм собственных колебаний образцов, использование зависимости начала развития процесса усталостного разрушения с падением частоты колебательной системы обеспечивают проведение испытаний в условиях различных температур (20-200ºС) с экономией материальных и трудовых ресурсов при проведении таких исследований за счет снижения времени проведения испытаний в 10-15 раз, что подтверждается актом о практическом использовании. Использование разработанного метода ускоренного определения характеристик усталости позволило установить рациональное количество рафинирующе-модифицирующих добавок и подобрать режимы термоциклической обработки (патент РБ № 12582), обеспечившие повышение усталостных характеристик вторичных литейных алюминиевых сплавов. Это позволило осуществить замену первичных сплавов вторичными для изготовления деталей машин работающих в условиях циклического нагружения, что подтверждено проведением ряда опытно-промышленных плавок в условиях Минского тракторного и Минского моторного заводов, опытного производства УП «Институт БЕЛНИИЛИТ», Запорожского завода «Мотор Сич» с выпуском опытной партии изделий «Радиатор», «Поршень». Разработаны технические условия на заготовку кронштейна педали тормозной (ТУ ВУ 100354059.091-2011) и организован на опытном производстве УП «Институт БЕЛНИИЛИТ» выпуск опытной партии деталей из вторичных литейных алюминиевых сплавов с повышенными механическими характеристиками. Использование при изготовлении таких деталей вторичного сырья позволило снизить себестоимость их изготовления на 10-20%.

Испытательное оборудование, обеспечивающее снижение неопределенности результатов исследований, используется для определения характеристик усталости широкой номенклатуры сплавов, а также в учебном процессе БГТУ. Расчет напряженно-деформированного состояния плоских балочных образцов нагружаемых знакопеременным изгибом по амплитуде колебаний его характерных точек, учитывающий жесткость прикорневого участка образца и податливость заделки, расчет усилий действующих на детали соединений, находящихся под воздействием знакопеременного нагружения, методом конечных элементов внедрены в учебный про-

цесс на кафедре «Детали машин и ПТУ» БГТУ для проведения практических занятий по курсу «Детали машин».

Результаты работы целесообразно использовать на предприятиях и в организациях, занимающихся разработкой алюминиевых и других сплавов цветных металлов, применяемых для изготовления деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузок широкого диапазона частот при нормальных и повышенных температурах.

Список публикаций соискателя

Статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК

1. Блохин, А.В. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования / А.В. Блохин, Ф.Ф. Царук, Н.А. Гайдук // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2002. – Вып. X. – С. 213–215.

2. Царук, Ф.Ф. К методике исследования усталостных свойств конструкционных материалов / Ф.Ф. Царук, С.Е. Бельский, А.В. Блохин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2003. – Вып. XI. – С. 233–236.

3. Блохин, А.В. Развитие комплекса оборудования для усталостных испытаний конструкционных материалов / А.В. Блохин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2004. – Вып. XII. – С. 263–266.

4. О влиянии сил вязкости на движение дислокационного сегмента и распространение упругих колебаний в металлах / В.Р. Соболь, О.Н. Мазуренко, П.Н. Логвинович, С.Е. Бельский, А.В. Блохин // Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2007. – Т. 51. – № 3. – С. 121–124.

5. Температурные механизмы взаимодействия дислокаций с примесями в процессах передачи энергии упругих колебаний / В.Р. Соболь, П.Н. Логвинович, С.Е. Бельский, А.В. Блохин // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80. – № 4. – С. 193–199.

6. Блохин, А.В. Повышение усталостных характеристик литейных алюминиевых сплавов полученных с использованием вторичного сырья методом термоциклической обработки / А.В. Блохин // Литье и металлургия. – 2009. – №4. – С. 72–75.

Статьи в других изданиях

7. Блохин, А.В. Определение степени циклической повреждаемости алюминиевых сплавов по изменению резонансной частоты колебаний системы / А.В. Блохин, С.Е. Бельский, Ф.Ф. Царук // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2005. – Вып. XIII. – С. 213–215.

8. Блохин, А.В. Электросопротивление как структурно-чувствительная характеристика при усталостных испытаниях металлических конструкционных материалов / А. В. Блохин, С. Е. Бельский// Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2006. – Вып. XIV. – С. 248–250.

9. Блохин, А.В. Исследование характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов / А.В. Блохин, С.Е. Бельский, Ф.Ф. Царук // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 278–282.

10. Блохин, А.В. Влияние состава и технологии выплавки на усталостные характеристики вторичных литейных алюминиевых сплавов / А.В. Блохин, Ф.Ф. Царук, С.Е. Бельский // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 310–313.

11. Блохин, А.В. Использование методов конечно-элементного моделирования для расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при циклическом изгибе / А.В. Блохин, А. М. Лось // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 288–290.

12. Блохин, А.В. Статистический анализ результатов усталостных испытаний, полученных при использовании различных устройств крепления образцов / А.В. Блохин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 247–251.

13. Блохин, А.В. Методика расчета напряжений в опасном сечении плоских балочных образцов, нагружаемых знакопеременным изгибом / А.В. Блохин // Труды БГТУ. №2(140), Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2011. – С. 291–294.

Материалы научных конференций

14. Царук, Ф.Ф. Развитие метода ускоренного определения усталостных характеристик материалов с использованием высокочастотного нагружения / Ф.Ф. Царук, А.В. Блохин // Трибофатика : тр. IV Междунар. симпозиума, Тернополь, 23–27 сент. 2002 г. : в 2 т. / Тернополь. гос. техн. ун-т им. Ивана Пулюя ; редкол.: В.Т. Трощенко [и др.]. – Тернополь, 2002. – Т. 1. – С. 503–506.

15. Бельский, С.Е. Пороговые напряжения – важная характеристика сопротивления усталости конструкционных материалов / С.Е. Бельский, Ф.Ф. Царук, А.В. Блохин // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления : сб. тр. 1-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 дек. 2002 г. : в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск, 2002. – Т. 2. – С. 380–382.

16. Царук, Ф.Ф. Высокочастотное сопротивление усталости металлов при нормальных и повышенных температурах / Ф.Ф. Царук, С.Е. Бельский, А.В. Блохин // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления : сб. тр. 1-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 дек. 2002 г. : в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск, 2002. – Т. 2. – С. 409–411.

17. Бельский, С.Е. Ресурсо- и энергосбережение при проведении усталостных испытаний / С.Е. Бельский, Ф.Ф. Царук, А.В. Блохин // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2005 г. : в 2 ч. / Бел. гос. технолог. ун-т ; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2005. – Ч. 2. – С. 258–261.

18. Царук, Ф.Ф. Выбор оптимальных геометрических параметров образцов для усталостных испытаний при различных частотах нагружения / Ф.Ф. Царук, А.В. Блохин // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2005 г. : в 2 ч. / Бел. гос. технолог. ун-т ; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2005. – Ч. 2. – С. 262–263.

19. К динамике дислокационного сегмента в поле знакопеременных сил / В.Р. Соболь, О.Н. Мазуренко, С.Е. Бельский, А.В. Блохин // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 26–28 окт. 2005 г. : в 2 т. / Ин-т физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси ; редкол.: Н.М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2005. – Т. 2. – С. 21–24.

Тезисы докладов

20. Блохин, А.В. Особенности усталостных испытаний литейных алюминиевых сплавов / А.В. Блохин // НИРС-2003 : тезисы докл. VIII Респ. науч.-техн. конф.

студ. и асп., Минск, 9–10 нояб. 2003 г. : в 7 ч. / Бел. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2003. – Ч 1 : Транспорт и машиностроение. – С. 154.

21. Блохин, А.В. Пороговые напряжения как характеристика сопротивления усталости литейных алюминиевых сплавов / А.В. Блохин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Респ. науч.-техн. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 29 янв. 2004 г. / Бел.-Рос. ун-т ; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – С. 20.

Патенты

22. Способ термической обработки литейных алюминиевых сплавов из вторичного сырья : пат. 12582 Респ. Беларусь, МПК C 22 F 1 / 04 / А.В. Блохин, С.Е. Бельский; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № a 20081099; заявл. 21.08.2008; опубл. 06.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуальн. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 93.

23. Способ крепления образца на ступенчатом коническом концентраторе-волноводе для высокочастотных усталостных испытаний : пат. 12691 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 3 / 00 / А.В. Блохин, С.Е. Бельский; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № a 20070875; заявл. 12.07.2007; опубл. 25.09.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуальн. уласнасці. – 2009. – № 6. – С. 119.

РЭЗЮМЭ

Блахін Аляксей Уладзіміравіч

Навуковае забеспячэнне метаду паскоранага вызначэння характарыстык стомленасці другасных ліцейных алюмініевых сплаваў для дэталяў машын, якія працуюць ва ўмовах цыклічнага нагружэння

Ключавыя слова: метады разліку, стомленасныя выпрабоўванні, цыклічныя хваляванні, узор для выпрабоўвання, алюмініевы сплаў, мяжа вынослівасці, частата, тэмпература.

Мэта працы: распрацоўка методу паскоранага (за кошт павышэння частаты нагружэння) вызначэння характарыстык стомленасці другасных алюмініевых сплаваў, выкарыставаемых при вырабе дэталяў машын, якія працуюць ва ўмовах цыклічнага нагружэння пры нармальных і павышаных тэмпературах (20-200 ^{o}C).

Метады даследавання і апаратура: сучаснымі метадамі выконваліся стомленасныя выпрабоўванні ліцейных алюмініевых сплаваў у дыяпазоне частот 0,3-18,0 кГц, пры тэмпературы 20-200 ^{o}C і праводзіліся даследаванні іх фізіка-механічных характарыстык. Метадам канечных элементаў даследаваўся напружана-дэфармаваны стан узораў для выпрабоўванняў. Разліковым метадам вызначалася частотная залежнасць крытычных напружанняў пачатку працэсу стомленаснага разбурэння матэрыялаў.

Навуковая навізна атрыманых вынікаў: распрацавана методыка паскоранага вызначэння характарыстык стомленасці даследаваных матэрыялаў, якая адрозніваецца ўлікам уплыву тэмпературнага фактару ў дыяпазоне 20-200 ^{o}C. Прапанаваны эксперыментальна-аналітычныя залежнасці вызначэння напружана-дэфармаванага стану ўзораў, якія працуюць ва ўмовах цыклічнага напружання і дазваляюць павысіць дакладнасць вызначэння напружанняў у небяспечным сячэнні ўзораў. На падставе разліку напружанага стану дэталяў разьбовага злучэння ўзора з канцэнтратарам хваляванняў распрацавана и запатэнтавана канструкцыя мацавання, якая забяспечвае стабільнасць каэфіцієнта трэння за кошт павышэння сілы зацыжкі пры ўздзеянні высокачастотных вібрацый. Выкарыстане гэтай канструкцыі дазволіла знізіць няпэўнасць вынікаў вызначэння мяжы вынослівасці распрацаванай методыкай выпрабоўванняў. З выкарыстаннем методыкі прагназавання ўпершыню атрыманы характарыстыкі стомленасці ў дыяпазоне тэмператур 20-200 ^{o}C першасных і другасных ліцейных алюмініевых сплаваў. Распрацаваны і запатэнтаваны метад павышэння стомленасных характарыстык другасных ліцейных алюмініевых сплаваў, які заключаецца ў правядзенні тэрмацыклічнай апрацоўкі перад загартоўкай і пры старэнні.

Ступень выкарыстання: вынікі даследаванняў былі апрабаваны ў вытворчых умовах ААТ «БЕЛНІІЛІТ» (Рэспубліка Беларусь) і ААТ «Мотор Сич» (Украіна).

Галіна прымянення: вынікі працы могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі алюмініевых сплаваў, прыдатных для вырабу дэталяў машын, якія працуюць ва ўмовах цыклічных нагрузак шырокага дыяпазону частот пры павышаных тэмпературах.

РЕЗЮМЕ
Блохин Алексей Владимирович

Методика ускоренного прогнозирования характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов для деталей машин, работающих в условиях циклического нагружения

Ключевые слова: методики расчета, усталостные испытания, циклические колебания, напряжения, частота.

Цель работы: разработка методики и испытательного оборудования для прогнозирования характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов используемых при изготовлении деталей машин работающих в условиях циклического нагружения при нормальных и повышенных температурах (20-300°С).

Методы исследования и аппаратура: расчеты напряженно-деформированного состояния образцов, работающих в условиях знакопеременного изгиба, напряженного состояния деталей резьбового соединения образца с концентратором колебаний и частотной зависимости критических напряжений начала процесса усталостного разрушения материалов. Выполнялись усталостные испытания литейных алюминиевых сплавов в диапазоне частот 0,3-18,0 кГц при температурах 20…300°С и проводились исследования их физико-механических характеристик с использованием современной аппаратуры для регистрации и обработки экспериментальных данных.

Научная новизна полученных результатов: экспериментально-аналитические зависимости определения напряженно-деформированного состояния образцов, работающих в условиях циклического нагружения, позволяющие повысить точность определения напряжений в опасном сечении образцов. Выполнен расчет напряженного состояния деталей резьбового соединения образца с концентратором колебаний, учитывающий действие знакопеременных нагрузок. Запатентована конструкция крепления, обеспечивающая стабильность коэффициента трения при воздействии высокочастотных вибраций, позволяющая повысить точность результатов испытаний. Разработана методика ускоренного определения характеристик усталости исследуемых материалов, отличающаяся учетом влияния температурного фактора и позволяющая прогнозировать характеристики усталости в диапазоне температур 20…200°С. С использованием методики прогнозирования впервые получены характеристики усталости в диапазоне температур 20…200°С первичных и вторичных литейных алюминиевых сплавов. Разработан и запатентован метод повышения усталостных характеристик вторичных литейных алюминиевых сплавов, заключающийся в проведении термоциклической обработки перед закалкой и при старении.

Степень использования: результаты исследований целесообразно использовать для определения характеристик сопротивления усталости литейных алюминиевых сплавов.

Область применения: результаты работы могут быть использованы для разработки алюминиевых сплавов, применяемых для изготовления деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузок широкого диапазона частот при повышенных температурах

SUMMARY
Blokhin Aleksei V.

Scientific support of the method for accelerated fatigue characteristics test of the secondary cast aluminum alloys for machine elements operating in the conditions of cyclic loading

Key words: method of analysis, fatigue tests, cyclical oscillations, test sample, aluminum alloy, fatigue limit, frequency, temperature.

Work objective: **method study for accelerated (due to the rise of the frequency of cycling) fatigue characteristics test of the secondary cast aluminum alloys for machine elements operating in the conditions of cyclic loading under the standard and elevated temperatures (20-200°C).**

Analysis and equipment: modern techniques have been used for accelerated fatigue characteristics test of the secondary cast aluminum alloys in the frequency range from 0,3 to 18,0 kHz under the temperatures from 20 to 200°C and their physical-mechanical properties were being investigated. Finite element method has been used to examine deflected modes of the test samples. Design method has been applied to define frequency dependence of the critical stresses at the beginning of material fatigue failure.

Scientific novelty of the obtained results: the technique for accelerated fatigue characteristics test has been developed. This technique takes into account the effects of temperature factor in the range from 20 - 200°C. There have been suggested experimental and analytical dependencies for defining deflected modes of the test samples operating in the conditions of cyclic loading and allowing to rise the accuracy of stress calculation in dangerous section of the samples. Fastening construction providing the stability of friction factor due to a rise in pull force under high-frequency vibrations has been developed and patented on the basis of stress state determination of the elements of the sample threaded joint with oscillation concentrator. The use of this construction made it possible to decline the results ambiguity in fatigue limit determination. The fatigue characteristics of the virgin and secondary cast aluminum alloys in the temperature range from 20 to 200°C have been obtained by means of prediction technique. The method of increasing fatigue characteristics of the secondary cast aluminum alloys has been developed and patented. This method comprises thermal fatigue treatment before casting and aging.

Efficiency: investigation results have been tested in manufacturing environment at public corporations “BELNIILIT” (Belarus) and “MOTOR SICH” (Ukraine).

Application domain: the obtained results can be put into practice for the development of aluminum alloys being used for the manufacturing of machine elements operating in the conditions of cyclic loading in a wide frequency range under normal and elevated temperatures.

Научное издание

БЛОХИН Алексей Владимирович

НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности
05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

Подписано в печать 26.06.2012. Формат $60\times84^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 60. Заказ 824.
Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ №02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.