

УДК 621.185

И. Г. Довгялло, доцент;
С. Е. Бельский, доцент

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ,
ПРОВОДИМЫХ НА КАФЕДРЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И
ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ**

The results of investigations obtained on the machines elements and conveying equipment department are submitted.

Целью исследований, проводимых в последние годы на кафедре деталей машин и подъемно-транспортных устройств в соответствии с ее научным направлением, является изучение свойств металлов и сплавов в условиях интенсивного воздействия на них разных типов механических колебаний широкого амплитудно-частотного диапазона, температур и схем напряженного состояния и создание научных основ практического использования выявленных эффектов при разработке ускоренных методов испытаний циклической прочности элементов сложнагруженных деталей и высокоэффективных технологических процессов их обработки.

Проектирование высоконадежных конструкций, работающих в условиях вибраций, связано как с разработкой новых конструкционных материалов, так и с использованием в прочностных расчетах уточненных характеристик усталости. Традиционные низкочастотные усталостные испытания требуют значительных материальных затрат. Для снижения длительности и трудоемкости испытаний, особенно при больших базах (10^8 - 10^{10} циклов), перспективным является использование высоких частот нагружения, позволяющих за приемлемый промежуток времени обеспечить наработку заданного числа циклов. Однако в связи с отличием величин циклической прочности при разных частотах требуется установление корреляционных зависимостей между частотой нагружения и получаемыми усталостными характеристиками.

Поэтому основной задачей исследований явилась разработка научно обоснованного метода ускоренного прогнозирования низкочастотной усталости по результатам высокочастотных испытаний.

Для успешной реализации этой важной задачи нами проведены и продолжают проводиться в значительном объеме экспериментальные исследования усталостной долговечности большой номенклатуры металлических конструкционных материалов при различных частотах и типах механических колебаний симметричного и асимметричного циклов в широком температурном диапазоне.

Для этой цели коллективом кафедры разработаны принципиально новые испытательные комплексы с приборным обеспечением, защищенные авторскими свидетельствами, позволяющие возбуждать в образцах интенсивные изгибные, продольные и крутильные колебания широкого диапазона частот (0,15-44,0 кГц) симметричного и асимметричного циклов и с помощью созданных электронных устройств автоматически поддерживать автоколебательный режим работы, использование которого обеспечивает проведение усталостных испытаний при неизменной величине циклических напряжений и дает возможность по падению собственной частоты проследить за кинетикой развития усталостного повреждения материала.

Асимметричное нагружение осуществлялось на трубчатых образцах, дополнительно нагруженных двух- и трехосным растяжением за счет внутреннего гидростатического давления, создаваемого с помощью разработанного нами стенда и оригинальных акустогидравлических систем. Постоянное значение давления заданной величины (до 200 МПа) поддерживалось гидроаккумуляторами.

Проведенные теоретические исследования позволили разработать и экспериментально проверить аналитические зависимости для определения напряженно-деформированного состояния элементов резонансных колебательных систем в условиях действия различных типов колебаний при разных схемах нагружения.

Полученные результаты по влиянию частоты как симметричного, так и асимметричного циклов показали монотонный рост ограниченных и физических пределов выносливости с увеличением скорости циклического деформирования и практически отсутствие ее влияния на функции распределения долговечности, которые удовлетворительно соответствуют нормальному закону.

Для всех исследуемых материалов установлено, что форма кривых усталости при высоких и низких частотах и всех схемах напряженного состояния сохраняется, а кривые пределов выносливости расположены практически эквидистантно, не изменяется также ориентация усталостных трещин по отношению к направлению действия максимальных нормальных и касательных напряжений, что доказывает принципиальную возможность проведения ускоренных усталостных испытаний. Дополнительная статическая поднагрузка снижает усталостную долговечность при всех исследуемых частотах.

Увеличение циклической прочности с ростом частоты мы объясняем влиянием скорости нагружения на неупругую деформацию микрообъемов материала. Величина пластической деформации за цикл

изменения нагрузки при высокой частоте меньше, чем при низкочастотном нагружении (при одинаковых амплитудах напряжений), поскольку необратимые процессы, ответственные за зарождение и развитие усталостного повреждения, в области высоких частот не успевают завершиться из-за малого времени пребывания материала под действием максимальных напряжений.

С целью количественной оценки влияния высоких и низких частот нагружения на процессы усталостной повреждаемости материалов и выявления физической сущности этого влияния нами впервые проведены комплексные исследования кинетики физико-механических характеристик металлов и сплавов с различными кристаллическими решетками и свойствами. Для их реализации предложены и созданы комплексы оборудования для изучения изменений твердости и микротвердости, электросопротивления, наведенной ЭДС, плотности дислокаций, величины блоков, уровня макро- и микронапряжений, акустической эмиссии, максимальной и остаточной индукций, коэрцитивной силы, магнитной проницаемости и других характеристик в процессе усталости.

Показано, что квазипериодические изменения этих свойств во всем исследованном диапазоне режимов нагружения имеют качественно одинаковый характер, что свидетельствует о существовании единой физической природы усталости при действии высоких и низких частот, в том числе и при сложном напряженном состоянии.

Это послужило основанием для разработки физической модели влияния частоты механических колебаний на критические напряжения ($\sigma_{кр}$), соответствующие началу развития процесса усталости (старта работы источника Франка-Рида), учитывающей энергетические факторы, характеристики среды и коллективные эффекты взаимодействия различных типов дислокаций и позволившей научно обосновать метод ускоренных усталостных испытаний. На основании теоретических исследований выведена формула для определения $\sigma_{кр}$ с учетом действующих частот и схем напряженного состояния. Однако полученное уравнение является достаточно сложным для практического использования. Поэтому при разработке ускоренного метода прогнозирования низкочастотной усталости по результатам высокочастотных испытаний эта теоретическая характеристика заменена нами новой экспериментальной, получившей название пороговых напряжений (σ_a^n), т.е. циклических напряжений, ниже которых не наблюдается необратимых изменений структурно-чувствительных свойств материалов при неограниченно больших базах. Установлено, что увеличение частоты ведет

к монотонному росту значений σ_a^n , кривые которых располагаются эквидистантно кривым ограниченной выносливости. При этом для каждого материала разность этих величин является постоянной во всем исследованном диапазоне частот и статических поднагрузок, что и положено в основу предложенной методики ускоренных испытаний. Экспериментальная проверка метода на широкой номенклатуре конструкционных материалов показала возможность многократного сокращения длительности и трудоемкости определения усталостных характеристик без ущерба для точности прогноза. Данная методика, а также разработанное для ее реализации экспериментальное оборудование с приборным обеспечением внедрены в Центральном аэрогидродинамическом институте им. профессора Н. Е. Жуковского, Лётно-исследовательском институте им. М. И. Громова (г. Жуковский), на Минском электромеханическом заводе со значительным экономическим эффектом.

В процессе эксплуатации большинства современных машин, механизмов и инженерных конструкций наряду со статическими нагрузками существенную роль играют колебательные процессы, вызывающие явления усталости их деталей или приводящие к резонансным либо другим неустойчивым состояниям, которые зачастую служат причиной разрушений (коленчатые валы, трубопроводы, гидроцилиндры, стволы орудий, камеры сгорания двигательных установок, элементы конструкций летательных аппаратов и др.). Поэтому проблема изучения прочности, пластичности и динамики материала, для которых характерны высокие скорости, большие давления, вибрации в широком диапазоне частот и температур, является одной из важнейших и настоятельно требует дальнейшего расширения теоретических и экспериментальных исследований в этой области.

Круг вопросов, связанных с этими исследованиями, очень разнообразен, еще недостаточно изучен и представляет большой научный и практический интерес.

Для проведения экспериментальных исследований предельных разрушающих напряжений элементов трубопроводов из большой номенклатуры широко применяемых в промышленности металлов и сплавов при сложных схемах нагружения, предполагающих действие многофакторных механических нагрузок (трехосное растяжение, сдвиговые статические напряжения с различными скоростями деформирования и продольные ультразвуковые вибрации), в различных сочетаниях при высоких и низких температурах создана специальная экспе-

риментальная техника; разработаны и применены оригинальные установки и аппаратура, защищенные авторскими свидетельствами.

С целью более точного определения параметров колебаний и циклических напряжений дан аналитический расчет многоступенчатых стержней с учетом изменения их геометрических характеристик и выявлена функциональная зависимость между амплитудой, частотой колебаний и статическими нагрузками. Достаточно хорошее соответствие теоретических и опытных результатов позволило рекомендовать разработанную методику для расчета сложнагруженных элементов колебательных систем.

Выполнены теоретические исследования величин разрушающих статических напряжений при одновременном действии циклических нагрузок, которые удовлетворительно подтверждены экспериментально. Установлено, что наложение высокочастотных вибраций на процесс статической деформации металлов и сплавов приводит к значительному снижению напряжений, находящихся в зависимости от интенсивности колебаний, скорости статического деформирования, величины внутреннего давления и температуры испытания, что может служить основой для рекомендаций использования ультразвука в процессах обработки металлов давлением и особенно труднообрабатываемых материалов (нержавеющая сталь, бериллий, вольфрам и др.).

Проведенные исследования напряженного состояния при действии многофакторных механических нагрузок свидетельствуют о том, что ультразвук оказывает в основном прямое воздействие на материал, вызывая разрушение, подобное усталостному. Решающую роль при этом играет амплитуда цикла, получаемая сложением статических и циклических напряжений.

Некоторые несовпадения опытных и теоретических данных говорят о сложности процессов, протекающих в металлах и сплавах под действием циклических нагрузок в разнообразных условиях нагружения, и требуют для более полного объяснения анализа физической сущности рассматриваемых явлений.

С позиций дислокационной теории наложение переменных напряжений с высокой частотой полупериода колебаний приводит к активации имеющихся в металле дислокаций, подъему их из энергетических ям, способствует преодолению ими потенциальных барьеров и передвижению их через препятствия, вызывая тем самым пластическую деформацию и снижая необходимый уровень напряжений. Продолжение циклического нагружения вызывает появление новых дефектов за счет действия источников дислокаций, активизированных в

первые циклы нагружения, а также источников, возникающих за счет взаимодействия дислокаций, расположенных в соседних параллельных плоскостях скольжения. В результате этого заметно возрастает плотность дислокаций и точечных дефектов (межузельных атомов и вакансий). При определенной концентрации дефектов как дислокаций, так и вакансий происходит их массовый срыв с препятствий, вызывая нарушение межатомных связей и зарождение трещин. Определяющим фактором при этом является увеличение плотности дислокаций с ростом числа циклов нагружения, что подтверждено проведенными нами рентгенографическими исследованиями.

Изучение воздействия высокочастотных вибраций на процесс пластической деформации металлов при повышенных температурах показало, что с увеличением температуры влияние ультразвуковых колебаний усиливается, что также можно объяснить с точки зрения теории дислокаций.

Увеличение температуры уменьшает напряжение, необходимое для работы новых источников дислокаций; окруженные облаками Коттрелла-Ломера дислокации могут вырваться из этого окружения и стать подвижными, причем наложение переменных напряжений при повышенных температурах намного облегчает прохождение ими леса дислокаций. С повышением температуры изменяются силы взаимодействия, что позволяет дислокациям с противоположным знаком сближаться и аннигилировать. Уменьшаются энергетические потенциальные максимумы и минимумы, вследствие чего импульс, даваемый ультразвуковыми колебаниями, становится более действенным.

Для подтверждения высказанных предположений нами были проведены аналогичные опыты при температурах испытаний 163К и 77К, которые показали уменьшение влияния ультразвука на изменение прочности с понижением температуры деформирования.

Методологические, теоретические и экспериментальные результаты этих исследований внедрены на ряде предприятий оборонной промышленности при разработке специального испытательного оборудования, а также при проведении стендовых и натурных испытаний изделий на подвижных объектах, что позволило сократить сроки их разработок с одновременным уменьшением коэффициента запаса прочности, веса и габаритов.

Учитывая, что эксплуатационные свойства сложнагруженных деталей машин в значительной степени определяются состоянием их поверхностных слоев, разработан новый метод диффузионного насыщения легирующими элементами из расплава солей с использова-

нием знакопеременных колебаний. Для его реализации создан комплекс экспериментального оборудования, позволяющий проводить обработку с введением колебаний различной частоты и интенсивности как в расплав, так и в упрочняемую модель, а также изучение структуры и эксплуатационных характеристик поверхностных слоев. На базе их комплексного исследования установлены корреляционные зависимости между параметрами процесса и их свойствами. Разработана физическая модель влияния амплитудно-частотных параметров механических колебаний на физико-химические процессы в расплавах, адсорбцию и диффузию легирующих элементов. Впервые предложена высокоэффективная технология поверхностного упрочнения труднодоступных участков деталей и инструмента. Разработанные технологии и опытно-промышленное оборудование внедрены на многочисленных предприятиях Беларуси и России (АП "Беларусьрезинотехника", БелАЗ, Минский тракторный завод, Гомельский завод станочных узлов и др.).

На базе теоретической модели воздействия механических колебаний высокой частоты на физико-химические процессы в растворах впервые предложены технологические процессы ультразвукового лагунирования и фосфатирования арматуры для резино-технических изделий, обеспечивающие существенное повышение адгезии металла и вулканизата. Для их реализации разработана и защищена авторскими свидетельствами опытно-промышленная установка. Внедрение данных технологий на АП "Беларусьрезинотехника", ПО "Волжскрезинотехника" (г. Волжский) и Саратовском заводе РТИ обеспечило большой экономический эффект за счет интенсификации процессов в 5-10 раз и повышения прочности крепления резин к металлу в 2 раза, что способствовало повышению качества выпускаемой продукции и снижению потерь от брака при ее эксплуатации.

Большие работы проведены по исследованию, разработке и промышленному внедрению прогрессивного технологического процесса производства, эксплуатации и ремонта вулканизационных прессформ для резинотехнических изделий с целью значительного повышения срока их службы. В основу созданного впервые в мировой практике способа очистки технологической оснастки положены разработанная на кафедре теоретическая модель влияния механических колебаний на процессы в расплавах солей и результаты комплексных исследований состава нагара, образующегося при вулканизации различных типов резины. Для проведения этого технологического процесса сконструированы и изготовлены оригинальные автоматизированные про-

мышленные линии линейного и карусельного типов, основные элементы которых защищены авторскими свидетельствами. С целью замены традиционных процессов термообработки пресс-форм, требующих впоследствии значительного объема ручного труда для доводки их до окончательных размеров, разработана технология бездеформационного поверхностного упрочнения проводимого после финишной механической обработки. Внедрение процессов поверхностного упрочнения, очистки и оборудования для их реализации на АП "Беларусьрезинотехника", ПО "Волжскрезинотехника" и других предприятиях отрасли обеспечило получение значительных экономических эффектов.

Исследования на кафедре проводились в соответствии с республиканскими координационными планами важнейших научно-исследовательских работ в области естественных, технических и общественных наук, научно-техническими программами "Машиностроение" (задание 06.08), "Номотех" (задание 128-а), "Металлургия" (задание 03.06), заданием Министерства образования на 2000-2001 гг. и договорами о совместных исследованиях с рядом организаций: ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, ЛИИ им. М. И. Громова, институтом проблем прочности АН Украины, Политехническим институтом г. Белостока (Польша), Камагуэйским университетом (Куба).

Результаты исследований и опытно-конструкторских разработок защищены более чем 70 авторскими свидетельствами, опубликованы в многочисленных статьях, докладывались на научных конференциях и симпозиумах различных уровней, внедрены в учебный процесс БГТУ, положены в основу многочисленных дипломных проектов. К настоящему времени защищены и подготовлены к защите 5 кандидатских и 1 докторская диссертация.

К проведению исследований привлекались преподаватели кафедр БГТУ (теоретической механики, сопротивления материалов, материаловедения, электрохимии, высшей математики), а также студенты II - V курсов, сотрудники ряда институтов НАН Беларуси (физики твердого тела и полупроводников, прикладной физики, физико-технического). Большой вклад в научно-исследовательскую работу кафедры внесли доценты Борд В.И., Долбин Н.А., Царук Ф.Ф., старшие преподаватели Сурус А.И., Нехаев И.П., научные сотрудники Капсаров А.Г., Шойхет Д.Н., ассистент Зайцев А.В.