программа международной конференции ФИЗИКА.СПБ/2021

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 18-22 ОКТЯБРЯ 2021 ГОДА Тезисы докладов международной конференции

ФизикА.СПб

18-22 октября 2021 года

Санкт-Петербург 2021 ББК 22.3:22.6 Ф48

ФизикА.СПб: тезисы докладов международной конференции 18–22 октября 2021 г. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021

Организатор

ФТИ им. А. Ф. Иоффе

При поддержке

ООО «ИННО-МИР»

Программный комитет

Аверкиев Никита Сергеевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — председатель Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — заместитель председателя Арсеев Петр Иварович (ФИАН) Гавриленко Владимир Изяславович (ИФМ) Дьяконов Михаил Игоревич (Université Montpellier II, France) Зайцев Кирилл Игоревич (ИОФ РАН) Иванчик Александр Владимирович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) Калашникова Александра Михайловна (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) Карачинский Леонид Яковлевич (ООО «Коннектор Оптикс") Конников Семен Григорьевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) Кучинский Владимир Ильич (СПбГЭТУ, А. Ф. Иоффе) Пихтин Никита Александрович (ООО «Эльфолюм», ФТИ им. А. Ф. Иоффе) Рудь Василий Юрьевич (СПбПУ) Степина Наталья Петровна (ИФП им. А. В. Ржанова) Сурис Роберт Арнольдович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) Нестоклон Михаил Олегович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) Устинов Виктор Михайлович (НТЦ микроэлектроники РАН)

Организационный комитет

Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — председатель Поняев Сергей Александрович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — заместитель председателя Азбель Александр Юльевич (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) Дюделев Владислав Викторович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) Когновицкая Елена Андреевна (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева) Лосев Сергей Николаевич (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) Рябочкина Полина Анатольевна (МГУ им. Н. П. Огарёва) Серин Артем Александрович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) Черотченко Евгения Дмитриевна (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Международная конференция 2021 года продолжает традицию Итоговых семинаров по физике и астрономии по результатам конкурсов грантов для молодых ученых, проводившихся в Санкт-Петербурге с середины 1990-х годов.

ISBN 978-5-7422-7745-2

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

Модель микро-/наномотора с магнитным приводом

*Мартынов С. И.*¹, Ткач Л.Ю.¹

1СурГУ

e-mail: martynovsi@mail.ru

Современные технологии основаны на использовании новейших достижений в управлении физическими процессами на микро и наноуровне. Имеющиеся научные достижения в области молекулярной биологии и нанотехнологий уже в настоящее время обеспечивают потенциал для инженерной разработки наномеханических систем с различными функциональными возможностями. Биологические и синтетические наномоторы активно изучаются [1] в качестве управляемых транспортных средств для доставки груза (терапевтическая нагрузка к больной клетке, элементы самосборных микроустройств к месту назначения и т. д.) как в лабораторных, так и в естественных условиях. Большое количество самодвижущихся частиц обладают способностью к самоорганизации [2], что позволяет контролировать образование определенных структур из них. Различные синтетические наномоторы создаются в форме янусоподобных частиц, которые движутся в результате химических реакций [3] в жидкостях, которые являются топливом для таких двигателей. Специально разработанные наноразмерные частицы обладают способностью перемещаться во внешних переменных полях - электрическом, магнитном, ультразвуковом, химическом, световом. Во всех случаях движение наномотора происходит в вязкой жидкости, что требует корректного учета гидродинамической силы, действующей на него со стороны окружающей жидкости. Как показано в работах [4,5], для механизмов перемещения наномотора, связанных с каталитическими реакциями на его поверхности или действием переменного однородного магнитного (электрического) поля, именно формируемое в окружающей жидкости течение и создает гидродинамическую силу, перемещающую наномотор в заданном направлении

В настоящей работе предложена модель микро-/наномотора, представляющего собой цепочку из трех заряженных сферических частиц разного размера и обладающую следующей структурой. Центральная частица имеет электрический заряд, который по величине равен сумме зарядов крайних частиц, но имеет другой знак. Суммарный заряд системы в целом равен нулю и считается, что она находится в состоянии устойчивого равновесия в результате действия сил взаимодействия между частицами. Одна или две частицы, расположенные относительно центральной частицы, имеют магнитный момент. Вращающееся внешнее однородное магнитное поле заставляет магнитные частицы вращаться, что создает течение окружающей цепочку вязкой жидкости и гидродинамические силы и моменты, действующие на каждую частицу и смещающих их из положения равновесия. Циклическим изменением направления вращения магнитного поля, формируется такое течение окружающей жидкости, которое создает гидродинамическую силу, действующую на цепочку и перемещающую ее в определенном направлении. Варьируя величину и период циклического действия магнитного поля, можно управлять движением такой цепочки частиц в жидкости. При расчетах динамики такой цепочки решались уравнения гидродинамики в приближении малых чисел Рейнольдса с соответствующими граничными условиями и уравнения поступательного и вращательного движения для каждой

Матфизика и численные методы

частицы с учетом сил взаимодействия между ними. Компьютерное моделирование выполнялось с использованием специального программного комплекса [4, 5], позволяющего визуализировать результаты расчетов. Численное моделирование динамики проведено для 6 модельных цепочек с одной вращающейся частицей и одной модели цепочки с двумя вращающимися частицами. Результаты расчетов позволяют определить размеры частиц и частоту вращения магнитного поля, при которых цепочка частиц перемещается в жидкости с наибольшей скоростью, что может быть использовано при конструировании микро-/наномотора с магнитным приводом. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 18-41-860002 р-а.

Список литературы

- 1. Gao W., Wang J., Synthetic micro/nanomotors in drug delivery, Nanoscale, No 6, 10486--10494, 2014.
- 2. Lin Z., Gao C., Chen M., Lin X., He Q., Collective motion and dynamic self-assembly of colloid motors, Current Opinion in Colloid and Interface Science, V.35, 51–58, 2018.
- 3. Paxton W.F., Sen A., Mallouk T.E., Motility of catalytic nanoparticles through selfgenerated forces, Chemistry, V.11, No 22, 6462–6470, 2005.
- 4. Martynov S. I., Tkach L. Yu., Mechanism of moving particle aggregates in a viscous fluid, Comput. Math. Math. Phys., V.59, No. 3, 475–483, 2019.
- 5. Martynov S. I., Tkach L. Yu., Mechanism of Locomotion of Synthetic Nanomotors in a Viscous Fluid, Comput. Math. Math. Phys., V. 60, No. 11, 1913-1922, 2020.

Физическое моделирование масштабно-структурного усталостного разрушения материалов лопаток газотурбинных двигателей при осевом многоцикловом нагружении с несимметричным циклом

Завойчинская Э. Б.¹

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: elen@velesgroup.com

Охлаждаемые лопатки компрессора или турбины в эксплуатации подвергаются растяжению при вращении вала двигателя, изгибающим и крутящим моментам от центробежных и аэродинамических сил, и находятся в условиях сложного нагружения, представляющего собой случайный набор циклов с различными частотами, амплитудами и постоянными составляющими напряжения. Анализ отказов промышленных турбоагрегатов показывает, что в 80% случаев аварии происходят из-за усталостных повреждений. Экспериментально обнаруживается, что усталостные микро- и макротрещины возникают перпендикулярно оси лопатки в корневом сечении в зоне концентрации напряжений, в основном, от изгибных форм вынужденных резонансных колебаний. Здесь рассматривается осевое одночастотное напряжение с резонансной частотой.

Усталость лопаток в большей степени определяется состоянием поверхностного слоя. При этом много- и, в особенности, гигацикловая усталость могут быть связаны с вероятным возникновением очагов микроразрушения в объеме тела от технологических дефектов, геометрических концентраторов структуры материала, включений и др., представляющих собой шероховатую мелкозернистую область, называемую "рыбий глаз" [1-4]. Макроразрушение имеет место, в основном, по коротким трещинам мезоуровня зерна или группы зерен, при упругом макродеформировании.

Предложен метод оценки ресурса по теории усталостного масштабно-структурного разрушения [5-7]. Выделяются шесть уровней дефектов, записываются определяющие соотношения для функций распределения вероятности достижения предельных состояний каждого уровня. Для симметричного нагружения никелевого сплава ЖС6К строятся области развития дефектов и кривые усталости по четырем уровням дефектности. Для лопатки из ЖС6К турбокомпрессора двигателей М-601 [8] определяются: постоянная составляющая напряжения из известных соотношений для упругой консольной балки как максимальное значение в корневом сечении суммы растягивающих напряжений от центробежных сил и изгиба от аэродинамических сил, и амплитуда напряжения в зависимости от прогибов из известного решения задачи изгиба консольной балки, жестко закрепленной в обод диска, в зависимости от прогибов; строятся области развития дефектов и кривые усталости по уровням поврежденности при соответствующих асимметриях цикла. При достаточно больших прогибах лопатки нагружение можно считать симметричным. Расчет по модели показывает, что в разрушенных лопатках при эксплуатации около 370-1670 часов [8] возможно возникла концентрация напряжений вследствие возможных резонансных вынужденных колебаний с эффективным коэффициентом концентрации, равным 3.3. Для алюминиевого сплава ВД17 лопатки турбины двигателя Д30 [8] (нагружение можно рассматривать симметричным [5]) получено, что в разрушенных лопатках первой и второй ступени после эксплуатации около 18 000 часов возникла концентрация напряжений с эффективными коэффициентами концентрации, равными 4.7 и 9.7 соответственно.

Для 9-12 % мартенситной хромистой стали [3,4] построены области развития дефектов и кривые усталости шести уровней при симметричном нагружении и с отношением постоянной составляющей к амплитуде $\alpha = 1.22$, и получено удовлетворительное соответствие опытным данным [3,4] при $N_f \in (6*10^4, 4*10^9)$ циклов. Изучено влияние асимметрии цикла в областях $1.22 \le \alpha 3$. При ультразвуковых колебаниях с $\alpha = 3$ и $\alpha = 5.7$ предельное максимальное напряжение цикла σ_{max} мало меняется с ростом числа циклов и практически равно пределу статической прочности стали σ_{st} . В этих случаях определяющим является процесс вязкого разрушения в условиях установившейся циклической ползучести и при неупругом макродеформировании. Построены кривые длительной прочности при этих асимметриях, которые ложаться на кривую длительной прочности материала. Полученные результаты представляются в виде предельных поверхностей разрушения по микро- и коротким трещинам в координатах (σ_{max}/σ_{st} , α , N). Линии уровня $\alpha = const$ при $|\alpha|3$ определяют кривые усталости по уровню дефектности, при $|\alpha| \ge 3$ – кривую длительной прочности. Линии уровня N = const представляют расченые диаграммы Хея.

Список литературы

- 1. Jeddi D., Palin-Luc T. A review about the effects of structural and operational factors on the gigacycle fatigue of steels, Fatigue Fract Eng Mater Struct., 41, 969–990, 2018
- Sakai T., Nakagawa A., Oguma N., Nakamura Y., Ueno A., Kikuchi S., Sakaida A. A review on fatigue fracture modes of structural metallic materials in very high cycle regime, Int. J. of Fatigue, 93,2, 339-351, 2016
- 3. Kovacs S., Beck T., Singheiser L. Influence of mean stresses on fatigue life and damage of a turbine blade steel in the VHCF-regime, Int. J. of Fatigue, N 49, 90–99, 2013

- 4. Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles / Christ H. J.(Ed.), Springer, 627 pp., 2018
- Завойчинская Э.Б. О методе оценки ресурса лопаточного аппарата газотурбинного двигателя при асимметричном циклическом нагружении центробежными и аэродинамическими силами, Математическое моделирование и численные методы, 1 (25), 45-63, 2020
- Zavoychinskaya E., A Stochastic Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading, Understanding complex systems, Springer Nature Switzerland AG, 71-89, 2021
- 7. Zavoychinskaya E.B. On the Theory of Scale Structural Fatigue of Metals at the Proportional Loading, Journal of Physics, 1431, 012024-012032, 2020
- 8. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации, Уфа: Изд-во н.-.т. лит-ры «Монография», 500 с., 2007

Regular electrically charged objects in Nonlinear Electrodynamics coupled to Gravity

Dymnikova I.¹, Galaktionov E.¹

¹Ioffe Institute

e-mail: evgalakt@mail.ru

We outline the basic properties of regular electrically charged black holes (RCBH) and electromagnetic solitons replacing naked singularities, which are predicted by the analysis of the dynamical equations of the Nonlinear Electrodynamics coupled to Gravity (NED-GR).

Electrically charged regular objects are governed by the source-free NED-GR equations in such a way that their electromagnetic fields are described by general source-free nonlinear Maxwell equations while their gravitational fields are described by the Einstein equations with the stress-energy tensors of their own nonlinear electromagnetic fields.

The algebraic structure of stress-energy tensors for electromagnetic fields is determined by $T_t^r = T_r^r$ ($p_r = -\rho$) and the metrics belong to the Kerr-Schild class [1]. For the stress-energy tensors satisfying the weak energy condition which guarantees the non-negativity of density and mass, dynamical equations contain the class of regular spherically symmetric solutions which escribe RCBHs and electromagnetic solitons with the de Sitter vacuum centers [2].

Regular spherical solutions with the metrics of the Kerr-Schild class are transformed by the G• urses-G• ursey algorithm [3] in the regular axially symmetric solutions which describe the rotating RCBHs and spinning electromagnetic solitons. The NED-GR regular objects have positive masses of electromagnetic origin [2] generically related to breaking of spacetime symmetry from the de Sitter group which is the fundamental property of all regular objects described by the metrics of the Kerr-Shild class [4]. The internal structure of rotating NED-GR objects contains the de Sitter vacuum disk which has the properties of a perfect conductor and ideal diamagnetic [5,6]. It is confined by the ring with a superconducting current which replaces the Kerr ring singularity, serves as a nondissipative source of electromagnetic and gravitational fields [7] and provides the origin of the intrinsic magnetic momenta of NED-GR regular objects [8]. These fundamental general properties of all regular NED-GR objects are predicted by the behavior of the asymptotic solutions ([9] and references therein) and verified by the detailed analysis of dynamics of electromagnetic fields [10].