

Д. Ю. Ершов^{1, 2}, И. Н. Лукьяненко¹, А. О. Смирнов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ² Санкт-Петербургский горный университет

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛОВ

Статья посвящена рассмотрению основных причин выхода из строя электромеханических узлов приборов вследствие возникновения локальных дефектов в материале ответственных деталей. Раскрыта физическая природа появления таких дефектов, которая обусловлена дискретными включениями в материалах деталей. Зарождение локальных дефектов в значительной степени сказывается на возникновении внешних вибрационных воздействий и динамических процессов в узлах механизмов приборов при их дальнейшем функционировании, снижая качество работы. Приведено математическое выражение для учета локальных дефектов при создании математической модели описания узла механической системы с помощью анализа Фурье. Показаны возможные направления развития локальных дефектов в узлах системы и следствия из них, а также предложены методы исключения этих дефектов при изготовлении деталей.

Ключевые слова: ряд Фурье, локальный дефект, вибродиагностика, электронная микроскопия

Введение

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью изучения физических причин возникновения вибрационных воздействий в узлах механических систем, которые в дальнейшем приводят к внезапным отказам всей системы в целом, а также разработки новых методов вибродиагностирования механических систем как при их эксплуатации, так и на этапе создания и проектирования.

Анализ результатов испытаний и характера проявления неисправностей в условиях эксплуатации изделий механических систем показал, что во многих случаях к внезапным отказам приводят локальные дефекты различных форм и сочетаний. Подробно причины возникновения локальных дефектов рассмотрены в работах [1–3].

Локальные дефекты в материале и деталях могут появляться как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации. При получении металла и деталей в процессе плавления и литья возможно образование таких дефектов, как окислы, шлаковые включения, усадочные раковины, поры, рыхлости, трещины. В процессе обработки деталей давлением могут появиться трещины, рванины, расслоения, закаты, заливы, флокены,

волосовины и др. В результате термической обработки, которой часто сопровождается изготовление деталей, могут происходить обезуглероживание поверхностных слоев металла, снижение твердости, перегрев, пережог, образование хрупких участков, изменение структуры, появляться закалочные трещины. Дефекты механической обработки выражаются в нарушении точности и чистоты обработки, образовании шлифовочных трещин, подрезов и др.

Во время эксплуатации детали и конструкции деформируются, изнашиваются, поражаются коррозией и эрозией, в них образуются трещины, изменяются структура и механические свойства металла. Все эти дефекты могут располагаться на поверхности, под поверхностью или в глубине изделия. При этом они носят местный характер, охватывая ограниченные участки изделия либо равномерно или неравномерно все изделие [4, 5].

В настоящее время предъявляются все более высокие требования к качеству стали. Поэтому на предприятиях, связанных с металлопродукцией, для контроля качества металла на различных этапах его передела от слитка до готового изделия с успехом используется метод просвечивающей электронной микроскопии.

Определение природы дефектов (флокены, трещины различного происхождения, неметаллические включения и др.) дает важную информацию о причинах разрушения и является одним из оснований для внесения возможных корректив в технологии литья, термической обработки, сварки и т. д. [6, 7].

Причины формирования локальных дефектов

Причинами возникновения и развития локальных дефектов в узлах механических систем являются дискретные включения и воздействия различной природы [8]:

- концентрация вибрационных воздействий от дисбаланса вращающихся масс;
- различные сочетания неровностей контактирующих поверхностей узлов механической системы, имеющие гармонический характер;
- нарушение технологического процесса изготовления деталей механических систем.

Локальным является дефект, занимающий незначительную часть поверхности изделия. Он имеет дискретную структуру и проявляется в информационном виброакустическом сигнале в виде периодически повторяющихся импульсов малой длительности.

При эксплуатации контролируемого узла механической системы можно определить различные фазы формирования неровностей контактирующих поверхностей. Первая фаза соответствует зарождению локальных дефектов в местах высоких вибрационных воздействий. Вторая фаза соответствует сохранению локальных дефектов и развитию их формы и величины.

Условия формирования локальных дефектов носят случайный характер, но с момента зарождения дефекта процесс формообразования и развития имеет квазипериодический характер. Поэтому для его математического описания используется анализ Фурье.

Дискретные включения при разложении в ряд Фурье дают большое число составляющих гармоник, которые соответствуют разложению ударных воздействий в ряд Фурье.

Вибрационное воздействие от локального единичного дефекта можно оценить с помощью следующего выражения:

$$F_{\text{лд}}(\varphi) = \sum_{j=q}^{\infty} F_{0j} [1 - \cos j(\varphi - \Delta\varphi_j)],$$

где F_{0j} – амплитуда j -й дефектной составляющей вибрационного воздействия на данной гармонике; j – номер гармоники; $\Delta\varphi_j$ – начальная фаза дефектной составляющей вибрационного воздействия

на данной гармонике или место включения j -й гармоники; q – гармоника возникновения локального дефекта.

Каждая из составляющих дискретного разложения принимает действующие значения на участке изменения аргумента от $\Delta\varphi_j$ до $\Delta\varphi + \frac{2\pi}{j}$. При остальных значениях аргумента φ указанная составляющая равна нулю. Сложные формы дискретных включений могут быть достаточно точно описаны сочетаниями дискретных составляющих вибрационного воздействия.

Формирование локальных дефектов может идти по трем направлениям. В первом случае их развитие приводит к лавинообразным процессам. Происходит усиление вибрационных воздействий на отдельных участках изделия, которое может привести к заклиниванию механической системы и, как следствие, к внезапному отказу. При быстром лавинообразном процессе появляется неравномерный износ поверхностей контакта элементов вращения узлов механической системы. Медленный лавинообразный процесс приводит к образованию раковин на поверхности изделия.

Во втором случае развитие локальных дефектов носит равномерный характер. Происходит переход от дискретного периодического импульса малой длительности к установившейся гармонике. Это создает условия для равномерного износа поверхностей контакта элементов вращения узлов механических систем.

В третьем случае формирование локальных дефектов существенным образом зависит от направления вращения роторов механических систем. При однонаправленном вращении роторов системы имеет место тенденция к развитию овальностей поверхностей контакта элементов вращения. Овальность с определенной степенью допущения можно оценивать аналогично эллипсу. В этом случае важно соотношение полуосей эллипса. Условия равномерного износа формируются при соотношении малой и большой полуосей эллипса, близком к единице. На практике отклонение от округлости должно составлять не более 5–7%. При существенном возрастании этих отклонений создаются условия для формирования либо гармонических вибрационных воздействий более высоких порядков, либо локальных дефектов. В случае разнонаправленного вращения роторов механической системы условия равномерного износа практически не обеспечиваются, развитие локальных дефектов идет либо в направлении формирования гармоник, либо лавинообразных процессов на отдельных участках поверхностей контакта элементов вращения узлов механических систем.

Выявление и однозначная идентификация локальных дефектов в металле помогает разрабатывать те или иные технологические приемы их устранения.

Выводы

Таким образом, в настоящей работе выявлены основные причины формирования локальных

дефектов в элементах вращения узлов механической системы и тенденции к неравномерности износа их контактирующих поверхностей. Рассмотрен один из важнейших видов вибрационных воздействий – локальный дефект, раскрыта его физическая природа, показано влияние на развитие динамического процесса и вибрационное состояние механических узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный В. Ф. Расчетное прогнозирование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. № 3 (81). С. 14–21.
2. Валетов В. А., Иванов А. Ю. Микрогеометрия поверхностей деталей и их функциональные свойства // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 8. С. 7–11.
3. Горячева И. Г. Моделирование влияния микрогеометрии поверхностей на характеристики контактного взаимодействия и силу трения. Материалы XX юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС-2017). М.: Принт, 2017. С. 217–220.
4. Медеяев И. А. Научное обоснование технических решений по управлению изнашиванием в условиях ограниченного слоя // Вестник машиностроения. 2008. № 11. С. 37–42.
5. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. М.: Техносфера, 2006. 256 с.
6. Громаковский Д. Г. Исследование повреждаемости поверхностей трения, оценка кинетических характеристик их состояния и прогнозирование износостойкости // Вестник Самарского государственного университета. Технические науки. 2013. № 2 (28). С. 105–110.
7. Медеяев И. А. Принцип деформации в трибосопряжениях машин и механизмов и пути их снижения // Вестник машиностроения. 2018. № 11. С. 48–52.
8. Ershov D. Y., Zlotnikov E. G., Koboyankwe L. E. Analysis of causes and mathematical description of process of manufacturing errors and local defects in mechanical system nodes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. No. 87. V. 8. 2017. P. 82015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ershov Дмитрий Юрьевич, к. т. н., доцент кафедры высшей математики и механики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А; доцент кафедры машиностроения, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, д. 2, тел.: 8 (921) 598-24-62, e-mail: fetcat@mail.ru.

Лукьяненко Ирина Николаевна, к. т. н., доцент кафедры высшей математики и механики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (921) 890-47-68, e-mail: irina.n.lukyanenko@gmail.com.

Смирнов Александр Олегович, д. ф. - м. н., зав. кафедрой высшей математики и механики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (812) 371-91-73, e-mail: alosm@mail.ru.

For citation: Ershov D. Yu., Lukyanenko I. N., Smirnov A. O. Physical nature of occurrence of local defects of products and their influence on quality of functioning of mechanical components. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 7, pp. 6–9. DOI 10.21778/2218-5453-2019-7-6-9

D. Yu. Ershov, I. N. Lukyanenko, A. O. Smirnov

PHYSICAL NATURE OF OCCURRENCE OF LOCAL DEFECTS OF PRODUCTS AND THEIR INFLUENCE ON QUALITY OF FUNCTIONING OF MECHANICAL COMPONENTS

The paper is devoted to the consideration of the main reasons for the failure of various kinds of electromechanical instrument assemblies, caused by the occurrence of local defects in the material of the critical parts. The physical nature of the appearance of such defects, which is caused by discrete inclusions in the materials of parts, is disclosed. The origin of local defects largely affects the appearance of external vibration effects and dynamic processes in the nodes of the mechanisms of the devices and their further functioning and quality of work. A mathematical form of accounting for local defects when creating a mathematical model for describing a node of a mechanical system using Fourier analysis is given. The possible directions of development of local defects in the nodes of the system and the consequences of them are shown, and attention is also focused on the proposed methods for eliminating these defects in the manufacture of parts.

Keywords: Fourier series, local defect, vibration diagnostics, electron microscopy

REFERENCES

1. Bezyazichny V. F. Estimated forecasting of the influence of technological processing conditions on the operational properties of machine parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2018, no. 3 (81), pp. 14–21. (In Russian).
2. Valetov V. A., Ivanov A. Yu. Microgeometry of parts surfaces and their functional properties. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2010, vol. 53, no. 8, pp. 7–11. (In Russian).
3. Goryacheva I. G. Modeling the influence of surface microgeometry on the characteristics of contact interaction and friction force. (Conference proceedings) VMSPPS-2017. Moscow, Print Publ., 2017, pp. 217–220. (In Russian).
4. Medelyaev I. A. Scientific substantiation of technical decisions on the management of wear in conditions of a limited layer. *Vestnik mashinostroeniya*, 2008, no. 11, pp. 37–42. (In Russian).
5. Shindo D., Oikawa T. *Analytical electron microscopy for materials science*. Springer, 2002, 156 p.
6. Gromakovskiy D. G. Investigation of damage to friction surfaces, assessment of the kinetic characteristics of their state and prediction of wear resistance. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 2 (28), pp. 105–110. (In Russian).
7. Medelyaev I. A. The principle of deformation in friction machines and mechanisms and ways to reduce them. *Vestnik mashinostroeniya*, 2018, no. 11, pp. 48–52. (In Russian).
8. Ershov D. Y., Zlotnikov E. G., Koboyankwe L. E. Analysis of causes and mathematical description of process of manufacturing errors and local defects in mechanical system nodes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, no. 87, vol. 8, p. 82015.

AUTHORS

Ershov Dmitry, Ph. D., associate professor of the department of higher mathematics and mechanics, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation; associate professor of the department of mechanical engineering, Saint-Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilyevsky island, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation, tel.: +7 (921) 598-24-62, e-mail: fetcat@mail.ru.

Lukyanenko Irina, Ph. D., associate professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (921) 890-47-68, e-mail: irina.n.lukyanenko@gmail.com.

Smirnov Aleksandr, D. Sc., head of the department of higher mathematics and mechanics, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (812) 371-91-73, e-mail: alosm@mail.ru.