

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность**

**Materials mechanics:
strength, durability, safety**

**К 85-летию
Института машиноведения
Российской академии наук**

**To the 85 anniversary
of the Mechanical Engineering
Research Institute of the Russian
Academy of Sciences**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-52-54>

РАЗВИТИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ В АКАДЕМИЧЕСКИХ И ОТРАСЛЕВЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

© **Николай Андреевич Махутов**

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4;
e-mail: kei51@mail.ru

EVOLUTION OF TECHNICAL DIAGNOSTICS IN THE ACADEMIC AND INDUSTRIAL LABORATORIES

© **Nikolay A. Makhutov**

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Maly Kharitonyevsky per., Moscow, 101990, Russia; e-mail: kei51@mail.ru

Приближается 300-летие Российской академии наук, созданной 8 февраля 1724 года по Указу Петра I. В этой связи следует отметить, что постепенно научные исследования и практические разработки разместились на таких ключевых базах развития науки и ее информационного обеспечения, как академические институты, отраслевые предприятия, учебные заведения (университеты) и научные издательства (периодика, монографии).

На этом трехвековом пути важными этапами стали рождение журнала «Заводская лаборатория» [1] и образование в 1938 году Института машиноведения в составе Отделения технических наук Академии СССР [2]. Почти девять десятилетий журнал «Заводская лаборатория» и академические лаборатории Института машиноведения тесно взаимодействуют по разработке и освещению комплексных проблем механических испытаний материалов, машин и конструкций. В современных условиях и в перспективе развития машиноведения и машиностроения на новые позиции выходит сочетание академических исследований фундаментальных закономерностей деформирования, повреждения и разрушения конструкционных материалов и машин новых поколений [3] со все возрастающими научно-технологическими запросами машиностроения и материаловедения как технической, материальной и производственной основы развития и безопасности страны [4].

Начиная с 30-х годов XX века результаты длительных научных исследований Института машиноведения, связанные с анализом и обоснованием прочности, ресурса, хладостойкости, термостойкости, износостойкости, живучести, надежности, безопасности и рисков, находили свое освещение на страницах журнала «Заводская лаборатория».

Разработчиками указанных проблем, авторами журнала, членами его редколлегии на протяжении многих лет были ведущие ученые Института — члены академии С. В. Серенсен, Ю. Н. Работнов, В. В. Болотин, И. А. Одинг, Н. Н. Давиденков, А. П. Гусенков, Н. А. Махутов, а также организаторы и члены научных школ — профессора и ведущие научные сотрудники Н. И. Пригоровский, М. М. Хрущов, В. П. Когаев, Р. М. Шендерович, И. А. Разумовский, А. Н. Романов, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Полилов, Ю. Н. Дроздов, Г. В. Москвитин, М. М. Гаденин, А. И. Тананов.

В начале XXI века на повестку дня вышли новые актуальные постановки задач комплексной диагностики материалов и мониторинга состояний машин по двум ключевым направлениям — экспериментальное определение расчетных характеристик физико-механических свойств конструкционных материалов на металлической, композитной, керамической основах на нано-микро-мезо-макроуровнях и расчетно-экспериментальное определение напряженно-деформированных, поврежденных и предельных состоя-

ний несущих элементов машин и конструкций при сложных проектных, запроектных и гипотетических условиях эксплуатационного нагружения [3].

В рамках первого направления основополагающими являются [3] стандартные, унифицированные и специальные испытания в лабораторных условиях соответствующих образцов конструкционных материалов для определения базовых характеристик их сопротивления упругому и упругопластическому деформированию и разрушению в заданных условиях по времени τ и числу циклов N нагружения. Это относится к стандартным характеристикам: модулю упругости E , показателю упрочнения m , пределу текучести σ_T , пределу прочности σ_B , пределу длительной прочности σ_d , пределу выносливости σ_{-1} , предельной пластичности e_K . Они определяются по диаграммам деформирования $\sigma - e$ на гладких образцах без концентрации напряжений ($\alpha_0 = 1$). Эти характеристики зависят от температур t , числа циклов нагружения N , скорости деформирования $\dot{e} = de/d\tau$ и нагружения $\dot{\sigma} = d\sigma/d\tau$:

$$\{\sigma, e\} = F\{\sigma_T, \sigma_B, m, e_K\} = F\{t, N, (\dot{e}, \dot{\sigma})\}. \quad (1)$$

Для решения задач по второму направлению расчетами и экспериментами устанавливаются номинальные $\sigma_H - e_H$ и локальные $\sigma_{maxk} - e_{maxk}$ напряженно-деформированные, поврежденные и предельные состояния вне зон и в зонах концентрации напряжений K_σ и деформаций K_e с учетом предельной пластичности e_K , эффектов абсолютных размеров F опасных сечений, объемности напряженного состояния с главными напряжениями $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$:

$$\begin{aligned} \{\sigma_{maxk}, e_{maxk}\} = \\ = F\{(\sigma_H, e_H), e_K, (\alpha_0, K_e, K_\sigma), F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)\}. \quad (2) \end{aligned}$$

Поскольку сопротивление деформациям и разрушению зависит от режимов нагружения ($\tau, N, t, \dot{e}, \dot{\sigma}$) по выражению (1), то и номинальные и локальные напряженно-деформированные и предельные состояния по (2) связаны с режимами нагружения.

Выражения (1), (2) описывают условия возникновения трещин l . Их статическое ($dl/d\tau$) и циклическое (dl/dN) нагружения в соответствии с уравнениями линейной и нелинейной механики разрушения определяются коэффициентами интенсивности упругих напряжений K_I , а также коэффициентами интенсивности упругопластических напряжений $K_{I\sigma}$ и деформаций K_{Ie} . Эти коэффициенты находятся расчетом и экспериментом для заданных схем и видов нагружения с учетом номинальных напряжений σ_H и деформаций e_H . Предельные состояния в зонах трещин уста-

навливаются по окончательному разрушению по критическим коэффициентам интенсивности K_{Ic} , K_{Iec} , K_{Ioc} :

$$\begin{aligned} \{K_I, K_{Ie}, K_{I\sigma}\} = F\{l, (\sigma_H, e_H), m\} = \\ = F\{e_K, K_{Ic}, K_{Iec}, K_{Ioc}\}. \quad (3) \end{aligned}$$

Диаграммы разрушения связывают текущие размеры растущих трещин по (3) с уровнем номинальных напряжений σ_H , показателем сопротивления упругопластическим деформациям m и предельной пластичностью e_K . С учетом (1) и (2) развитие трещин зависит от параметров нагружения $\tau, N, t, \dot{e}, \dot{\sigma}$.

Объединение решений указанных выше двух научных и прикладных задач на основе (1) – (3) позволяет в количественной форме обосновать реальную применимость конструкционных материалов и эффективность безопасного функционирования машин и конструкций гражданского и оборонного назначений. В первую очередь это относится [3 – 5] к объектам атомной энергетики, авиационной и ракетно-космической технике.

Все расчетные параметры выражений (1) – (3) $\sigma_B, \sigma_T, e_K, m, \sigma_H, e_H, \sigma_{maxk}, e_{maxk}, \alpha_0, K_\sigma, K_e, K_I, K_{Ie}, K_{I\sigma}, l, K_{Ic}, K_{Iec}, K_{Ioc}$ подлежат определению расчетами и экспериментальными методами.

Традиционно мы продолжим освещать научно-методические разработки и результаты перспективных научных исследований в данной области в журнале «Заводская лаборатория. Диагностика материалов».

За период 2020 – 2023 гг. по инициативе редакционной коллегии на страницах журнала были опубликованы результаты новых исследований и научно-методических разработок Института машиноведения, сочетающих линейную и нелинейную механику деформирования и разрушения [5], двухпараметрический анализ трещиностойкости [6], высокотемпературную и двухчастотную повреждаемость [7], цифровую спекл-интерферометрическую [8] и акустико-эмиссионную диагностику [9], спектральную диагностику и мониторинг опасных состояний [10] материалов и несущих элементов машин.

Обобщенные публикации в журнале «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» интегрированы в многотомных изданиях [11 – 14], в значительной степени являющихся основой формируемых и развивающихся в нашей стране новых баз знаний и банков данных для решения актуальных и перспективных фундаментальных и прикладных задач комплексного анализа обоснования и повышения прочности и безопасности критически и стратегически важных объектов жизнеобеспечения [15] в условиях основного спектра угроз и вызовов.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 20-19-00769_П.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Махутов Н. А.** Развитие лабораторных исследований и диагностики материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1-1. С. 5 – 13. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-5-13
2. Кто есть кто в современном мире. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук / Много-томное издание. Выпуск VII. В 2-х томах. Том 2. — М.: Международный объединенный биографический центр, 2009. С. 270 – 387.
3. **Махутов Н. А.** Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Исследования и разработки проблем национальной безопасности / Научный руководитель чл.-корр. РАН Н. А. Махутов. — М.: МГОФ «Знание», 2022. — 524 с.
5. **Махутов Н. А.** Обобщенные закономерности повреждаемости и сплошности при оценках долговечности в условиях переменности режимов нагружения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 9. С. 61 – 65. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-9-61-65
6. **Матвиенко Ю. Г.** Двухпараметрический упругопластический критерий разрушения и скорректированная вязкость разрушения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 8. С. 59 – 69. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-8-59-69
7. **Гаденин М. М.** Исследование повреждаемости и долговечности при одно- и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 6. С. 44 – 52.
8. **Усов С. М., Разумовский И. А., Одинцев И. Н.** Исследование полей остаточных напряжений с использованием трещин-индикаторов и метода электронной спекл-интерферометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 9. С. 50 – 58. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58
9. **Матвиенко Ю. Г., Махутов Н. А., Васильев И. Е. и др.** Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1-1. С. 69 – 81. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-69-81
10. **Махутов Н. А.** Спектральный акусто-эмиссионный анализ процесса деформирования и повреждения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 10. С. 53 – 58. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-53-58
11. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности. Учебное пособие (Серия «Диагностика безопасности») / Под общ. ред. В. В. Клюева. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 187 с.
12. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность сложных человеко-машинных систем / Научный руководитель чл.-корр. РАН Н. А. Махутов. — М.: МГОФ «Знание», 2021. — 432 с.
13. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Наука и технологии комплексной безопасности: постановка проблем / Научный руководитель чл.-корр. РАН Н. А. Махутов. — М.: МГОФ «Знание», 2021. — 576 с.
14. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Наука и технологии комплексной безопасности: исследования и разработки / Научный руководитель чл.-корр. РАН Н. А. Махутов. — М.: МГОФ «Знание», 2021. — 876 с.
15. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / Отв. ред. В. В. Москвичев.

чев. — Новосибирск: Наука, 2021. — 796 с.
DOI: 10.7868/978-5-02-038832-1

REFERENCES

1. **Makhutov N. A.** Evolution of laboratory researches and diagnostics of materials / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2022. Vol. 88. N 1-1. P. 5 – 13 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-5-13
2. Who is who in the modern world. The A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences / Multivolume edition. Issue VII. In 2 volumes. Volume 2. — Moscow: International joint biographic center, 2009. P. 270 – 387 [in Russian].
3. **Makhutov N. A.** Strength and safety. Fundamental and applied researches. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
4. Safety of Russia. Legal, social and economic and scientific-technical aspects. Studies and developments of problems of national safety / Scientific supervisor — the member correspondent of the Russian Academy of Sciences N. A. Makhutov. — Moscow: MGOF “Znanie”, 2022. — 524 p. [in Russian].
5. **Makhutov N. A.** The generalized regularities of damageability and integrity in estimations of the endurance in conditions of variability of loading regimes / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2019. Vol. 85. N 9. P. 61 – 65 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-9-61-65
6. **Matvienko Yu. G.** Two-parameter elastic-plastic fracture criterion and corrected fracture toughness / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2022. Vol. 88. N 8. P. 59 – 69 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-8-59-69
7. **Gadenin M. M.** Damage and Life-Time Research of the Structures in Conditions of Singleand Two-Frequency Loading Modes Using Strain and Energy Approaches / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2017. Vol. 83. N 6. P. 44 – 52 [in Russian].
8. **Usov S. M., Razumovsky I. A., Odintsev I. A.** Study of inhomogeneous fields of residual stresses using step-by-step enlarged crack method in combination with electronic speckle pattern interferometry (ESPI) / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2021. Vol. 87. N 9. P. 50 – 58 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58
9. **Matvienko Yu. G., Makhutov N. A., Vasil'ev I. E., et al.** Evaluation of the residual strength of composite products based on the structural-phenomenological concept of damage and acoustic-emission diagnostics / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2022. Vol. 88. N 1-1. P. 69 – 81 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-69-81
10. **Makhutov N. A.** Acoustic-emission analysis of the processes of deformation and damage / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2018. Vol. 84. N 10. P. 53 – 58 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-53-58
11. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Technical diagnostics of a remaining life-time and safety. Tutorial / Under a general edition of V. V. Klyuev. — Moscow: The publishing house “Spektr”, 2011. — 187 p. (The series “Safety diagnostics”) [in Russian].
12. Safety of Russia. Legal, social and economic and scientific-technical aspects. Safety of complex human-machine systems / Scientific supervisor — the member correspondent of the Russian Academy of Sciences N. A. Makhutov. — Moscow: MGOF “Znanie”, 2021. — 432 p. [in Russian].
13. Safety of Russia. Legal, social and economic and scientific-technical aspects. Science and technologies of complex safety: statement of problems / Scientific supervisor — the member correspondent of the Russian Academy of Sciences N. A. Makhutov. — Moscow: MGOF “Znanie”, 2021. — 576 p. [in Russian].
14. Safety of Russia. Legal, social and economic and scientific-technical aspects. Science and technologies of complex safety: researches and developments / Scientific supervisor — the member correspondent of the Russian Academy of Sciences N. A. Makhutov. — Moscow: MGOF “Znanie”, 2021. — 876 p. [in Russian].
15. Applied problems of a structural integrity and fracture mechanics of technical systems / Responsible editor V. V. Moskvichev. — Novosibirsk: Nauka, 2021. — 796 p. [in Russian]. DOI: 10.7868/978-5-02-038832-1