

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-5-46-55>

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОБЩЕННЫХ КРИВЫХ СТАТИЧЕСКОГО И ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ПОВРЕЖДЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

© Николай Андреевич Махутов, Михаил Матвеевич Гаденин*

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; *e-mail: safety@imash.ru

*Статья поступила 26 августа 2022 г. Поступила после доработки 26 августа 2022 г.
Принята к публикации 29 августа 2022 г.*

Отмечено, что материалы на металлической, неметаллической, композитной основе при нагружении статической и циклической нагрузкой обладают индивидуальной диаграммой деформирования, связывающей напряжения и деформации. Эти диаграммы получают при стандартных испытаниях на растяжение, сжатие, кручение или изгиб лабораторных образцов с регистрацией в процессе нагружения усилий и деформаций их рабочих частей. Диаграмма при однократном статическом деформировании в координатах напряжение — деформация в этом случае охватывает как область упругих деформаций, так и участок упругопластического деформирования, когда происходит локализация деформаций в шейке нагружаемого образца вплоть до момента его разрушения при критическом уровне напряжений. Показано, что для описания диаграмм деформирования широко применяют линейную, мелко-линейную и степенную аппроксимации регистрируемой кривой деформирования. Прямые эксперименты, теория дислокаций и статистическая теория прочности подтверждают приоритетную возможность степенной аппроксимации рассматриваемых диаграмм. При этом для всех конструкционных материалов обобщенная диаграмма деформирования в относительных координатах описывается единым степенным уравнением с индивидуальным показателем упрочнения, который определяется экспериментально или расчетом по зависимостям, связывающим данные о модуле упругости материала, его пределах текучести, прочности и предельной пластичности. Диаграммы циклического упругопластического деформирования в виде петель пластического гистерезиса регистрируют по аналогии с диаграммами статического растяжения с осями напряжение — деформация в условных и истинных относительных величинах. Обобщенные диаграммы деформирования при однократном статическом и циклическом нагружении являются научной основой построения обобщенной кривой усталости на основе деформационного критерия разрушения для широкого диапазона числа циклов до разрушения. Эффективное решение проблем прочности и ресурса для наиболее сложных инженерных объектов типа атомных реакторов, летательных аппаратов и ракетно-космических систем может быть достигнуто путем введения в рассмотрение и соответствующие расчеты обобщенных диаграмм деформирования и разрушения. Их значение будет особенно возрастать при проектировании и реализации новых уникальных наукоемких объектов.

Ключевые слова: упругопластическое деформирование; обобщенная диаграмма деформирования; аппроксимация диаграмм; статическое и циклическое нагружение; прочность; долговечность; кривая усталости.

STUDY OF THE GENERALIZED CURVES OF THE STATIC AND CYCLIC DEFORMATION, DAMAGE AND FRACTURE

© Nikolay A. Makhutov, Mikhail M. Gadenin*

A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Maly Kharitonievskii per., Moscow, 101990, Russia; *e-mail: safety@imash.ru

Received August 26, 2022. Revised August 26, 2022. Accepted August 29, 2022.

Individual deformation diagrams of all materials on metal, non-metal, or composite base under static and cyclic load link stresses and strains. These diagrams are obtained in standard tensile, compression, torsion

or bending tests of laboratory samples with the registration of forces and deformations of their working parts upon loading. The diagram for a single static deformation in the stress-strain coordinates in this case covers both the region of elastic deformations and the region of elastic-plastic deformation, when deformations are localized in the neck of the loaded sample up to the moment of its destruction at a critical stress level. It is shown that linear, fractional-linear and power approximation of the obtained deformation curve are widely used in the description of the obtained deformation diagrams. Direct experiments, the theory of dislocations and the statistical theory of strength confirm the priority of power approximation of considered diagrams. At the same time for all construction materials the generalized deformation diagram in relative coordinates is described by a single power equation with the individual hardening parameter which is determined experimentally or theoretically using the dependences linking data on the module of elasticity, yield stresses, strength, and ultimate plasticity of the material. Diagrams of a cyclic elastoplastic deformation in the form of loops of plastic hysteresis are recorded by analogy with static tension diagrams with "stress – strain" axes of in conditional and true relative values. The generalized deformation diagrams for a single static and cyclic loading form a scientific basis for construction of the generalized fatigue curve on the basis of deformation fracture criterion for a wide range of cycles to failure. An effective solution to the problems of strength and service life for the most complex engineering objects such as nuclear reactors, aircraft, rocket and space systems can be achieved through introduction of generalized deformation and fracture diagrams into consideration and corresponding calculations. Their significance will especially increase in the design and implementation of new unique science-intensive facilities.

Keywords: elastoplastic deformation; generalized deformation diagram; approximation of diagrams; static and cyclic loading; strength; fatigue life-time; fatigue curve.

Введение

Первые систематические исследования проблемы циклической прочности и долговечности были начаты А. Велером в Германии во второй половине XIX в. К началу XX в. испытания И. Баушингера показали, что циклическое неупругое деформирование изменяет сопротивление переходу от упругих деформаций к пластическим. При симметричном цикле нагружения размах упругих напряжений в точке этого перехода составляет величину, примерно равную удвоенному пределу текучести при однократном статическом нагружении (принцип Мазинга).

В первые десятилетия XX в. (с 1926 г.), как в нашей стране (К. К. Симинский), так и за рубежом, такие исследования были связаны с интенсивным развитием железнодорожного транспорта с выраженной циклическостью нагружения его подвижного состава и рельсов при числах циклов $10^5 - 10^6$. В 40-е годы XX в. в связи с обоснованием прочности самолетов с ограниченным числом полетов (до 10^3) Н. И. Марин (ЦАГИ) впервые поставил самостоятельную проблему повторной статической прочности, когда циклическое разрушение сопровождалось признаками статического.

Развитие в 60 – 70-х годах XX в. энергетического теплового и атомного машиностроения и реактивной авиации сопровождалось исследованиями (С. В. Серенсен, Р. А. Дульнев, Л. Коффин, С. Мэнсон) термоусталости в диапазоне числа циклов $10^2 - 10^4$, когда долговечность связывали степенными зависимостями с относительно стабильным размахом термоциклических пластических деформаций [1 – 6]. Наблюдавшееся изменение по числу циклов диаграмм циклического деформирования в 70 – 80-е годы XX в. стало

предметом отечественных исследований малоциклового усталости (В. В. Москвитин, Р. М. Шнейдерович, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков) [1 – 5, 7 – 9]. В Институте машиноведения была исследована и показана связь циклических диаграмм деформирования и кривых малоциклового усталости вначале на основе силового, а затем — деформационного и энергетического критериев разрушения (С. В. Серенсен, Н. А. Махутов, А. Н. Романов) [1, 5, 9, 10]. Сводный анализ результатов выполненных отечественных и зарубежных исследований представлен в [1 – 3, 11]. Разработки ИМАШ по проблемам циклической прочности освещены в монографиях [1 – 5, 8 – 11]. Ряд статей по этой проблеме опубликован в журнале «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» [13 – 16].

Натурные тензо-, термо-, виброметрические испытания энергетического, нефтегазохимического, технологического оборудования, авиационной и ракетной техники, выполненные в конце XX и начале XXI вв. в академических институтах (ИМАШ, ИПМех, ИПМАШ), в отраслевых научно-исследовательских и конструкторских организациях (НИКИЭТ, ЦАГИ, ЦИАМ, ЦНИИМАШ, ЦКТИ, ЦНИИТМАШ, НИИХИММАШ, ВНИИ-МЕТМАШ, ВНИКТИ), показали, что реальное число циклов нагружения за весь срок эксплуатации соответствующего оборудования (от сотен секунд до 40 – 60 лет) может достигать величин $10^8 - 10^{12}$. Это обусловлено тем, что в процессе эксплуатации на основные режимы при частотах $10^{-5} - 10^1$ Гц силового и температурного нагружения, как правило, накладываются вибрации, пульсации давления и температур, аэрогидродинамические воздействия с частотами $10^2 - 10^4$ Гц. При этом если на основных штатных и аварий-

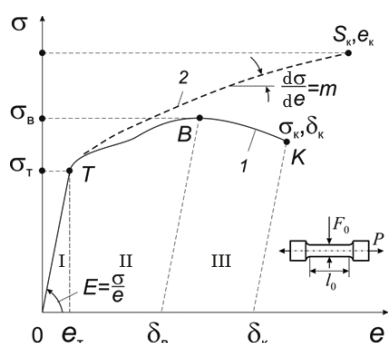


Рис. 1. Схема условной (1) и истинной (2) диаграмм растяжения металлического конструкционного материала

Fig. 1. Scheme of conditional (1) and true (2) diagrams of tension for metal construction material

ных режимах могут возникать значительные по величине неупругие деформации вплоть до разрушающих, то от наложенных на основные высокочастотных воздействий полные деформации будут заведомо неупругими [9, 15].

В этой связи для современных сложных и ответственных технических объектов раздельное использование классических представлений о предельных состояниях по силовым критериям цикличности при однократном ($N = 10^0$), повторно-статическом ($N < 10^3$), малоцикловом ($N \leq 10^4 - 10^5$), классически усталостном ($N \leq 10^6 - 10^7$) нагружениях и гигацикловом ($N \leq 10^8 - 10^{10}$) циклическом разрушении оказывается некорректным и идет не в запас прочности и безопасности. В таких случаях важно исследовать, развивать и использовать обобщенные на весь спектр воздействий выраженные в деформационных критериях кривые циклического деформирования и разрушения [9, 16, 17].

В работе приведены характеристика обобщенных кривых и соответствующие расчетные зависимости, полученные по результатам фундаментальных и прикладных исследований, проведенных в ИМАШ РАН и других указанных выше организациях.

Обобщенные кривые статического однократного деформирования

Каждому материалу (на металлической, неметаллической или композитной основе) при его нагружении статической и циклической нагрузкой свойственна индивидуальная диаграмма деформирования, связывающая напряжения и деформации. Эти диаграммы получают при стандартных испытаниях на растяжение, сжатие, кручение, изгиб лабораторных образцов с регистрацией усилий P и деформаций e в их рабочих зонах (рис. 1).

Исходную диаграмму деформирования в условных напряжениях (см. рис. 1, кривая 1) по-

лучают по графическим и цифровым регистрационным записям:

$$\sigma_0 = P/F_0, \quad e_0 = \Delta l/l_0,$$

где F_0, l_0 — начальные площадь сечения и длина рабочей зоны образца.

По этой диаграмме устанавливают основные стандартные характеристики механических свойств материала: условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ (с допуском на пластическую деформацию 0,2 %); условный предел прочности σ_B (временное сопротивление); относительное удлинение δ_K . Их включают в технические условия и стандарты на каждый материал, вид заготовок, термообработки. В ряде нормативных документов по испытаниям предусмотрено определение относительного поперечного сужения ψ_K в шейке образца при его статическом разрушении и модуля упругости E . При относительно небольших упругих и упругопластических деформациях ($e < 10^{-3} - 10^{-2}$), допускаемых в инженерных расчетах прочности, важной оказывается регистрация начального участка диаграммы растяжения.

Диаграмма деформирования в этом случае (см. рис. 1) охватывает область упругих деформаций I и начало в точке «Т» участка упругопластического деформирования в области II. В этой области от точки «В» с равномерным развитием деформаций σ_B происходит их локализация в шейке нагружаемого образца вплоть до конечной точки «К» с уровнем условных напряжений δ_K и общим удлинением δ_K . Сказанное выше обуславливает наличие огромного числа индивидуальных диаграмм растяжения и массива данных о численных значениях стандартных характеристик механических свойств для широкого спектра типов материалов и их состояний.

В ИМАШ разработана [1 – 5, 9, 11] обобщенная диаграмма деформирования в координатах истинные напряжения $\sigma = P/F$ — истинные деформации $e = dl/l$ при фиксации в процессе испытания текущего значения площади поперечного сечения F и длины рабочей части образца l .

Отличие диаграмм деформирования в условных $\sigma_0 - e_0$ (кривая 1) и истинных $\sigma - e$ (кривая 2) координатах отчетливо видно (см. рис. 1). В связи с уменьшением F ($F \leq F_0$) в процессе растяжения образца и локализацией пластических деформаций текущие величины напряжений и деформаций принимают значения $\sigma \geq \sigma_0; e \geq e_0$. Для небольших деформаций ($e \leq 10^{-2}$) отличие условной и истинной диаграмм невелико и можно принять $\sigma \approx \sigma_0$ и $e \approx e_0$. При таких уровнях деформаций широко применяют линейную, мелко-линейную и степенную аппроксимации начального участка на кривой деформирования. Прямые эксперименты, теория дислокаций и статистическая

теория прочности этого участка диаграммы подтверждают приоритетную возможность ее степенной аппроксимации.

При построении обобщенной кривой деформирования во всем диапазоне условных и истинных деформаций [5, 9, 11] степенная аппроксимация была распространена и экспериментально подтверждена на области деформирования I, II и III (см. рис. 1).

В точке «Т» на диаграмме происходит смена начальных упругих деформаций ($e \leq e_T$) на упругопластические ($e \geq e_T$) до стадии полного разрушения. Тогда на всей области деформирования из условия сохранения сплошности материала в процессе его нагружения истинные деформации e связаны с относительным сужением ψ площади поперечного сечения F логарифмической зависимостью до момента достижения значения предельной пластичности $\psi_K = (F_0 - F_K)/F_0$:

$$e = \ln \frac{1}{1 - \psi}; e_K = \ln \frac{1}{1 - \psi_K}. \quad (1)$$

При разрушении в точке «К» истинные напряжения достигают величины сопротивления материала отрыву S_K :

$$S_K = \frac{\sigma_K}{1 - \psi_K}. \quad (2)$$

Для конструкционных сталей можно использовать [5, 9] корреляционную связь

$$S_K = \sigma_B(1 + 1,4\psi_K). \quad (3)$$

При этом для обобщенной диаграммы деформирования в истинных координатах $\sigma - e$ для всех материалов предложено использовать относительные координаты

$$\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_T, \bar{e} = e/e_T, \quad (4)$$

где σ_T , e_T — предел текучести и деформация на уровне предела текучести ($e_T = \sigma_T/E$) в точке «Т».

На основе выражений (1) – (4) при степенной аппроксимации для обобщенной диаграммы деформирования можно записать унифицированное уравнение состояния в виде

$$\bar{\sigma} = \bar{e}^m, \quad (5)$$

где m — показатель упрочнения ($0 \leq m \leq 1$), определяемый экспериментально или расчетом.

На обобщенной диаграмме деформирования в относительных координатах $\bar{\sigma} - \bar{e}$ (рис. 2) были выделены три характерные области. В области I упругих деформаций

$$\bar{\sigma} = \bar{e} \leq 1, m = 1. \quad (6)$$

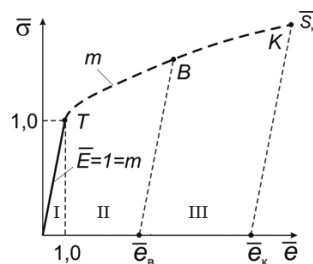


Рис. 2. Обобщенная кривая однократного статического деформирования в относительных истинных напряжениях и деформациях

Fig. 2. The generalized curve of a single static deformation in relative true stresses and strains

В областях II и III упругопластических деформаций

$$1 \leq \bar{\sigma} \leq \bar{e}, 1 \geq m \geq 0. \quad (7)$$

Все конструкционные металлические материалы в соответствии с (6) и (7) могут располагаться в диапазоне от идеально упругих ($m = 1$) до идеально упругопластических ($m = 0$). Для материалов на металлической основе $0,03 \leq m \leq 0,3$, для композиционных материалов $0,3 \leq m \leq 0,6$, для керамик $0,5 \leq m \leq 0,9$.

Если принять справедливым степенной закон деформирования (5) от точки «Т» до точки «К» (см. рис. 1 и 2), то можно определить величину показателя m :

$$m = \frac{\lg(S_K/\sigma_T)}{\lg(e_K/e_T)} = \frac{\lg \bar{S}_K}{\lg \bar{e}_K}, \quad (8)$$

где $\bar{S}_K$, $\bar{e}_K$ — относительные истинные напряжения и деформации.

Для обобщенной диаграммы деформирования при этом принципиально важно равенство

$$m = e_B, \quad (9)$$

где e_B — предельная равномерная деформация в точке «В» (см. рис. 1). Это равенство следует из анализа условия достижения максимума в точке «В» на диаграмме растяжения в условных координатах ($d\sigma/de = 0$) на основе совместного решения уравнений (1) и (5).

Предел текучести σ_T в точке «Т» пересечения линий упругого ($m = 1$) и упругопластического ($m \leq 1$) деформирования определяется на основе (5) как

$$\sigma_T = \left[\frac{\sigma_{0,2}}{(E \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} + \sigma_{0,2})^m} \right]^{1/(1-m)}, \bar{\sigma}_T = 1. \quad (10)$$

Таким образом, для всех конструкционных материалов обобщенная диаграмма деформирования в относительных координатах $\bar{\sigma} - \bar{e}$ по выражению (4) описывается единым степенным

уравнением (5), только с индивидуальным параметром m , который определяется экспериментально по (9) или расчетом по (8) при известных модуле упругости E , пределе текучести σ_T (или $\sigma_{0,2}$) по (10) и предельной пластической деформации e_K .

Из этого следует связь всех трех критериев статического разрушения [5, 9]:

деформационного как базового

$$\bar{e}_K = \frac{1}{e_T} \ln \frac{1}{1 - \psi_K}; \quad (11)$$

силового

$$\bar{S}_K = \bar{e}_K^m; \quad (12)$$

энергетического

$$\bar{\gamma}_K = \int_0^{\bar{e}_K} \bar{\sigma} d\bar{e} = \frac{1}{1+m} \bar{e}_K^{m+1}. \quad (13)$$

Новые технологии упрочнения сталей путем пластического деформирования, термо-, электрофизических обработок и легирования в основном приводят к увеличению предела текучести σ_T (или $\sigma_{0,2}$), отношения предела текучести к пределу прочности σ_T/σ_B . При этом, как правило, может наблюдаться снижение пластичности ψ_K .

В соответствии с выражениями (2) – (5), (8), (9), (11) показатель упрочнения m снижается за счет уменьшения предельной пластичности $\bar{e}_K$ и относительной устойчивости $\bar{S}_K$ по (2), (3). Снижение m при одинаковых напряжениях $\bar{\sigma}$ приводит к увеличению деформаций $\bar{e}$ и повышению опасности разрушения по деформационному критерию (11) и снижению предельной нагрузки по (12).

Обобщенные кривые деформирования и разрушения при циклическом нагружении

В соответствии с упомянутыми выше практическими требованиями и традиционными экспериментами на классическую усталость кривые циклической прочности получали, как правило, в условиях консольного или двухточечного изгиба силой тяжести вращаемого образца. Это обеспечивало симметричный синусоидальный цикл изменения напряжений с амплитудой $\sigma_a = \text{const}$. При величинах $\sigma_a \leq \sigma_T < \sigma_B$ число циклов до разрушения оказывалось в пределах $10^5 - 10^7$ и связь между σ_a и N описывалась степенным выражением

$$\sigma N^{m_\sigma} = C_{\sigma, N}, \quad (14)$$

где $C_{\sigma, N}$ — характеристика сопротивления данного материала усталости, зависящая в основном от предела прочности.

При числах циклов $N > 10^6$ влияние величины амплитуды напряжений σ_a на долговечность сказывалось незначительно. Это дало возможность ввести в стандарты на испытания и в инженерные расчеты понятие предела выносливости σ_{-1} при коэффициенте асимметрии цикла напряжений

$$r_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1. \quad (15)$$

При меньших числах циклов N ($10^4 < N < 10^5$) в условиях циклического растяжения-сжатия, изгиба или кручения тонких трубчатых образцов амплитуды напряжений оказывались выше предела текучести σ_T , приближаясь к пределу прочности σ_B . Эта область кривой усталости получила название малоциклового усталости. В диапазоне N от 10^0 до 10^3 амплитуда напряжений σ_a близка к пределу прочности σ_B , и эта область циклической прочности получила название повторно-статической прочности.

В последние годы в связи с запросами практики возникла необходимость в оценках циклической прочности на сверхвысоких базах по числу циклов N в интервале $10^8 - 10^{10}$. Эта область усталости была названа гигаусталостью, амплитуды напряжений σ_a в этом случае ниже классического предела выносливости σ_{-1} .

Таким образом, на кривой усталости ($10^0 \leq N \leq 10^{10}$) были выделены пять характерных областей (рис. 3). Для описания каждой из этих областей предлагалось использовать степенные уравнения типа (14) со своими показателями степени m_σ . Ниже приведены характеристики кривой для пяти областей нагружения:

0 — однократное статическое разрушение в исходном (нулевом) полуцикле

$$N = 10^0, \sigma_a = \sigma_B; \quad (16)$$

I — область повторно-статических (квазистатических) разрушений при

$$10^0 \leq N \leq 10^3, \sigma_a \approx \sigma_B, m_\sigma \approx 0; \quad (17)$$

II — область малоциклового разрушения, в которой

$$10^3 \leq N \leq 10^4, \sigma_a \geq \sigma_B, m_\sigma \leq 0,03; \quad (18)$$

III — область классических многоциклового усталостных разрушений при

$$10^4 \leq N \leq 10^6, \sigma_T \geq \sigma_a \geq \sigma_{-1}, m_\sigma \leq 0,1; \quad (19)$$

IV — область гигациклового усталостных разрушений, где

$$10^7 \leq N \leq 10^{10}, \sigma_a \leq \sigma_{-1}, m_\sigma \leq 0,06. \quad (20)$$

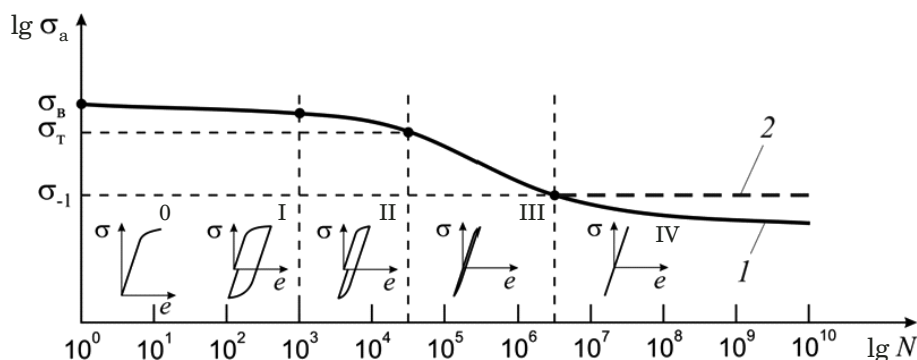


Рис. 3. Исходная кривая усталости в условных напряжениях при симметричном цикле мягкого нагружения ($\sigma_a = \text{const}$)

Fig. 3. An initial fatigue curve in conditional stresses at a symmetric cycle of soft loading ($\sigma_a = \text{const}$)

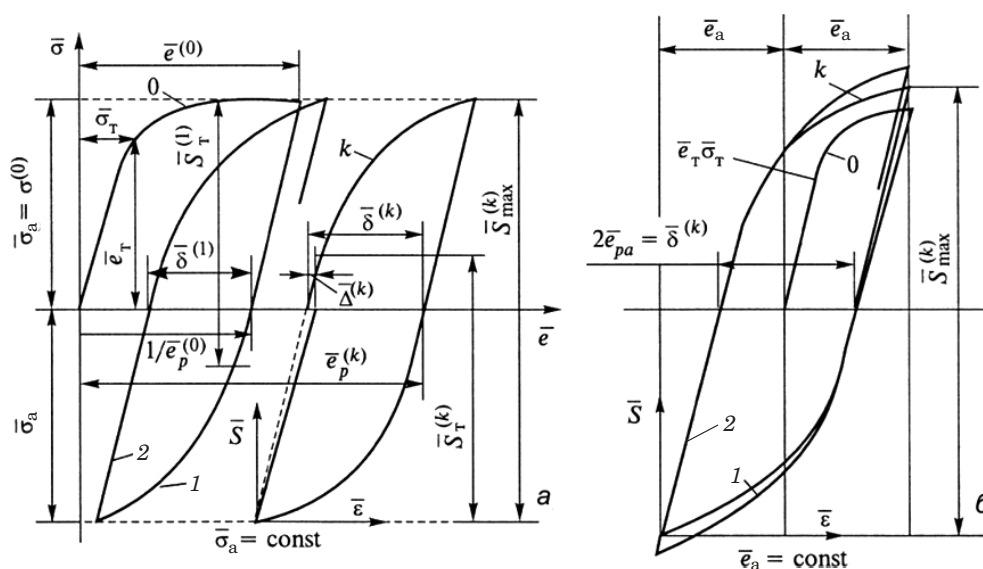


Рис. 4. Диаграммы циклического упругопластического деформирования при малоцикловом мягком (а) и жестком (б) режимах нагружения: 0, 1, 2 — номера полуциклов нагружения k

Fig. 4. Diagrams of cyclic elastoplastic deformations at the low cycle soft (a) and hard (b) modes of loading: 0, 1, 2 — numbers of half-cycles of loading k

Для области IV в практических расчетах по кривой классической усталости (см. рис. 3, пунктирная линия 2) при $N > 10^6$ принималось значение $\sigma_a = \sigma_{-1}$.

Однако в областях 0 – II амплитудные напряжения $\sigma_a \geq \sigma_r$, тогда в циклах возникают циклические упругопластические деформации $e_a \geq e_r$ (см. рис. 3). Это требует наряду с испытаниями при мягком нагружении ($\sigma_a = \text{const}$) проведения испытаний при жестком режиме нагружения ($e_a = \text{const}$) с постоянной амплитудой деформаций.

Исследование диаграмм циклического упругопластического деформирования — предмет систематических научных исследований [1 – 5, 7 – 11, 14 – 17, 19 – 22]. Такие диаграммы в виде петель пластического гистерезиса фиксировали на двухкоординатных самописцах в условных $\sigma_0 - e_0$ и истинных $\sigma - e$ координатах — по анало-

гии с диаграммой статического растяжения (см. рис. 1). Затем по выражению (4) для обобщенной кривой по (5) условные значения осей координат перестраивали в относительные величины для диаграмм с координатами $\bar{\sigma} - \bar{e}$. Пример обобщенных кривых циклического деформирования образцов из стали при мягком (а) и жестком (б) режимах нагружения показан на рис. 4.

При таких испытаниях регистрации и анализу по рис. 4, а подлежат:

параметры статического нагружения (см. рис. 1) $\bar{\sigma}_T, \bar{e}_T, \bar{\sigma}^{(0)}, \bar{e}^{(0)}, m(0)$ — в исходном ($k = 0$) полуцикле;

ширина петли пластического гистерезиса $\bar{\delta}^{(k)}$, односторонне накопленная пластическая деформация $\bar{e}_p^{(k)}$ и разность в ширине петель пластического гистерезиса соседних полуциклов $\bar{\Delta}^{(k)}$ — в первом ($k = 1$), втором ($k = 2$) и последующих полуциклах k ;

диаграмма циклического деформирования в координатах $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ для заданных полуциклов k , отсчитываемых от начала нагрузки в сторону растяжения или сжатия;

максимальные напряжения $\bar{S}_{\max}^{(k)}$ и соответствующие им деформации $\bar{\varepsilon}_{\max}^{(k)}$.

Для сталей повышенной прочности с $\sigma_T/\sigma_B > 0,55$ при мягком нагружении с увеличением k ширина петли возрастает по экспоненциальному закону, при этом одновременно происходит одностороннее накопление пластических деформаций $\bar{\varepsilon}_p^{(k)}$. При повышенных амплитудах напряжений $\bar{\sigma}_a$ это накопление приводит к квазистатическому разрушению по критерию (11):

$$\bar{\varepsilon}_p^{(k)} = \bar{\varepsilon}_k. \quad (21)$$

Для таких материалов при жестком нагружении максимальные напряжения $\bar{S}_{\max}^{(k)}$ снижаются, что дает основание считать их циклически разупрочняющимися.

Для низколегированных и аустенитных нежелезистых сталей умеренной прочности при $\sigma_T/\sigma_B = 0,35 - 0,45$ с накоплением числа полуциклов k напряжения $\bar{S}_{\max}^{(k)}$ могут увеличиваться (см. рис. 4, б). Такие стали относятся к типу циклически упрочняющихся.

Для сталей с промежуточными значениями $\sigma_T/\sigma_B = 0,45 - 0,55$ ширина петли пластического гистерезиса $\bar{\delta}^{(k)}$ и напряжения $\bar{S}_{\max}^{(k)}$ с ростом числа полуциклов нагружения k мало изменяются. Эти материалы относятся к типу циклически стабильных.

При проектных штатных режимах нагружения, когда номинальные напряжения $\bar{\sigma}_n \leq \bar{\sigma}_T/n_T$ (n_T — запас прочности, $1,2 \leq n_T \leq 1,8$), в зонах конструктивной концентрации напряжений и деформаций, сварных швов и наплавов при действии термических напряжений локальные деформации в исходном нагружении ($k = 0$) могут оказаться в 3 – 5 раз больше $\bar{\varepsilon}_T$. В этом случае локальное циклическое деформирование в таких зонах приближается к жесткому ($\varepsilon_a = \text{const}$).

Обобщенная диаграмма циклического деформирования при мягком ($\bar{\sigma}_a = \text{const}$) и жестком ($\bar{\varepsilon}_a = \text{const}$) режимах нагружения в координатах $\bar{S}^{(k)} - \bar{\varepsilon}^{(k)}$ для заданного полуцикла k , как и при однократном нагружении ($k = 0$) в координатах $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$, описывается степенным выражением типа (5):

$$\bar{S}^{(k)} = \bar{\varepsilon}^{(k)} m(k), \quad (22)$$

при значении предела текучести (по принципу Мазинга) $\bar{S}_T = 2$ (рис. 5). В этом выражении $m(k)$ — показатель циклического упрочнения в конкретном полуцикле k , зависящий от $\bar{\sigma}^{(0)}$, $\bar{\varepsilon}^{(0)}$ в полуцикле $k = 0$ и от циклических свойств материала.

По данным экспериментов и с учетом выражения (8) получим

$$m(k) = \frac{\lg \bar{\varepsilon}^{(0)m}}{\lg \left[\bar{\varepsilon}^{(0)m} + \frac{A}{2} (\bar{\varepsilon}^{(0)} - 1) F(k) \right]}, \quad (23)$$

где A — характеристика материала, определяемая экспериментально или расчетом, связывающая ширину петли пластического гистерезиса в первом полуцикле нагружения ($k = 1$) с деформацией $\bar{\varepsilon}^{(0)}$ исходного полуцикла ($k = 0$) нагружения: $\bar{\sigma}^{(1)} = A(\bar{\varepsilon}^{(0)} - 1)$. Величина A растет с увеличением отношения σ_T/σ_B от 0,35 до 0,85 ($0,4 \leq A \leq 12$). Для названных выше сталей с отношением σ_T/σ_B до 0,65 можно принять $A = 0,4$.

Функция $F(k)$ в выражении (23) характеризует изменение ширины петли $\bar{\delta}^{(k)}$ по числу полуциклов нагружения ($k \geq 1$):

$$\bar{\delta}^{(k)} = \bar{\delta}^{(1)} F(k). \quad (24)$$

Для циклически стабильных, упрочняющихся и разупрочняющихся материалов функция $F(k)$, соответственно, имеет вид:

$$F(k) = 1; F(k) = 1/k^\alpha; F(k) = \exp \beta(k - 1), \quad (25)$$

где α , β — характеристики материала и условий нагружения в исходном полуцикле, определяемые экспериментально или расчетом по выражениям

$$\alpha = B(\bar{\sigma}^{(0)} - 1), \beta = C(\bar{\varepsilon}^{(0)} - 1), \quad (26)$$

где B и C — характеристики материала, зависящие от отношения σ_T/σ_B .

Согласно экспериментальным данным склонность к циклическому разупрочнению при $\sigma_T/\sigma_B > 0,5$ и упрочнению при $\sigma_T/\sigma_B < 0,5$ увеличивается. При этом

$$C = 1,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{1 - \sigma_T/\sigma_B} - 2 \right) = -3 \cdot 10^{-3} B. \quad (27)$$

Таким образом, выражения (22) – (27) позволяют построить обобщенную диаграмму циклического деформирования для неограниченного числа полуциклов нагружения k , условий исходного деформирования $\bar{\sigma}^{(0)} - \bar{\varepsilon}^{(0)}$ и сочетания базовых характеристик механических свойств материалов σ_T/σ_B .

Обобщенные диаграммы деформирования при однократном статическом по рис. 2 и уравнению (5) и циклическом по рис. 5 и уравнению (22) нагружениях являются научной основой построения обобщенной кривой усталости на основе деформационного критерия разрушения

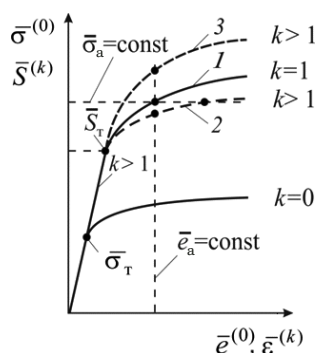


Рис. 5. Обобщенная диаграмма статического ($k = 0$) и циклического ($k > 0$) деформирования для циклически стабильного (1), циклически разупрочняющегося (2), циклически упрочняющегося (3) материалов

Fig. 5. The generalized diagram of static ($k = 0$) and cyclic ($k > 0$) deformations: 1 — cyclically stable, 2 — cyclically softened; 3 — cyclically hardening materials

[5, 9, 17] для диапазона числа циклов $10^0 \leq N \leq 10^{10}$ и более [11, 16].

Сложная по форме многопараметрическая кривая усталости в названном диапазоне числа циклов, построенная в силовых параметрах по выражению (14) для пяти показанных на рис. 3 областей (0 – IV), включает различные уровни упругих и упругопластических деформаций в соответствии с приведенными там же схемами диаграмм статического и циклического деформирования в координатах $\sigma - \epsilon$. Разделение деформаций в циклах на упругие $\bar{e}_e$ ($e \leq \bar{e}_\tau$, $\bar{\epsilon} \leq \bar{\epsilon}_\tau = 1$) и пластические $\bar{e}_p$ ($\bar{e} > 1$, $\bar{\epsilon} > 1$) по обобщенным диаграммам деформирования, приведенным на рис. 2 и описываемым выражением (5), а также — на рис. 5 и построенным по выражению (22) с использованием (14), дает возможность получить два определяющих выражения с соответствующими амплитудами деформаций:

$$\bar{e}_a = \bar{e}_{pa} + \bar{e}_{ea} = \frac{\bar{\delta}^{(k)}}{2} + \frac{\bar{S}^{(k)}}{2}; \quad (28)$$

$$\bar{e}_{pa} N^{m_p} = \bar{C}_p, \quad \bar{e}_{ea} N^{m_e} = \bar{C}_e, \quad (29)$$

где m_p , m_e , $\bar{C}_p$, $\bar{C}_e$ — характеристики сопротивления материала статическому и циклическому разрушению, определяемые экспериментально.

Показатель m_p для конструкционных сталей с $\sigma_b \leq 700$ МПа принимается постоянным и равным 0,5, а при увеличении σ_b до 1200 МПа он возрастает до 0,6. Учитывая зависимость $\bar{S}_k$ от характеристик прочности σ_b и пластичности ψ_k по (3) и линейную зависимость предела выносливости σ_{-1} от σ_b ($\sigma_{-1} \approx 0,45\sigma_b$), можно рассчитать сопротивление циклическому разрушению при долговечности $N = 10^0 - 10^{10}$ циклов (рис. 6). Для сталей с $\sigma_b \leq 700$ МПа показатель $m_e \approx 0,08$. При

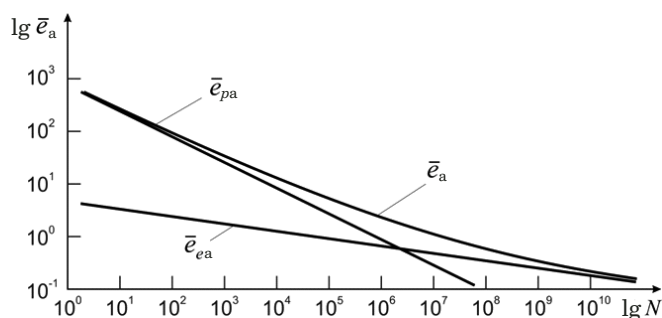


Рис. 6. Обобщенная кривая усталости, построенная по амплитудам относительных деформаций

Fig. 6. The generalized fatigue curve constructed using the amplitudes of relative strains

увеличении σ_b до 1200 МПа значение m_e снижается до 0,05.

Если принять, что однократное статическое разрушение происходит в первой четверти исходного цикла нагружения ($N = 1/4$) по рис. 4, то на основе (29) получим

$$\bar{C}_p = \bar{e}_k (1/4)^{m_p}, \quad \bar{C}_e = \bar{S}_k (1/4)^{m_e}. \quad (30)$$

Тогда с учетом (28) и (30) амплитуда полной деформации

$$\bar{e}_a = \frac{\bar{e}_k}{(4N)^{m_p}} + \frac{\bar{S}_k}{(4N)^{m_e}}. \quad (31)$$

Уравнение (31) является базовым для обобщенной кривой усталости. Оно учитывает предельную статическую пластичность материала $\bar{e}_k$ и предельную прочность $\bar{S}_k$ при однократном нагружении. Пролонгация обобщенной кривой усталости до долговечности $N = 10^{12}$ возможна только в качестве расчетной оценки на основе выражения (31) [16].

К настоящему времени наибольший объем экспериментальных данных накоплен [1, 16, 18, 19] для классической усталости (см. рис. 3, область III). Значительная база экспериментальных данных получена в области повторно статической (область I) и малоциклового (область II) усталости [1 – 11]. В силу длительности и методической сложности проведения испытаний на усталость для гигацикловой области объем выполненных экспериментов не велик [1, 13, 16 – 19]. Данные испытаний для одного конкретного материала в диапазоне долговечности $N = 10^0 - 10^{10}$ циклов пока отсутствуют. В этой связи в журнале «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» продолжится начатое в [16] обсуждение научно-методических основ анализа обобщенных диаграмм деформирования и разрушения.

Заключение

Современные и перспективные материалы, машины и конструкции будут создаваться, проектироваться и эксплуатироваться при все возрастающих требованиях к прочности и долговечности. При этом расширятся уровни эксплуатационной нагруженности и цикличности при штатных и аварийных режимах. Число циклов разнорежимного нагружения для ряда объектов может составлять от 10^0 до 10^{10} и даже 10^{12} , а возникающие разрушающие деформации — снижаться на два-три порядка от предельных при однократном нагружении. В этом случае число необходимых анализируемых вариантов может достигать сотен тысяч для наиболее сложных инженерных объектов типа атомных реакторов, летательных аппаратов и ракетно-космических систем [9, 11, 17, 19 – 22].

Решение этих проблем возможно путем введения в рассмотрение и соответствующие расчеты обобщенных диаграмм деформирования и разрушения. Их значение будет особо возрастать при проектировании и реализации новых уникальных наукоемких объектов. Основой таких решений будут результаты, получаемые по Программе фундаментальных академических научных исследований на период до 2030 г. [23].

ЛИТЕРАТУРА

1. Серенсен С. В. Избранные труды в 3-х томах. Том 1. — Прочность материалов и элементов конструкций при статическом нагружении. — 256 с. Том 2. — Усталость материалов и элементов конструкций. — 256 с. Том 3. — Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций. — 232 с. — Киев: Наукова думка, 1985.
2. Сопротивление деформированию и разрушению при малом числе циклов нагружения / Отв. ред. С. В. Серенсен. — М.: Наука, 1967. — 169 с.
3. Прочность при малом числе циклов нагружения. Вопросы механической усталости / Отв. ред. С. В. Серенсен. — М.: Наука, 1969. — 260 с.
4. Шнейдерович Р. М. Прочность при статическом и повторно-статическом нагружениях. — М.: Машиностроение, 1968. — 343 с.
5. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
6. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. — М.: Машиностроение, 1974. — 444 с.
7. Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций. — М.: Наука, 1981. — 344 с.
8. Гусенков А. П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1979. — 296 с.
9. Махутов Н. А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
10. Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1988. — 280 с.
11. Прочность при малоцикловом нагружении. Серия монографий из 9 книг / Под ред. С. В. Серенсена, Н. А. Махутова, М. М. Гаденина. — М.: Наука, 1975 – 2006.
12. Миллер К. Ползучесть и разрушение. — М.: Металлургия, 1986. — 120 с.

13. Ботвина Л. Р., Жаркова Н. А., Тютин М. Р. и др. Развитие пластических зон и поврежденности при различных видах нагружения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 5. С. 46 – 55.
14. Казанцев А. Г., Овчинников А. В., Силаев А. А. и др. Анализ напряженного состояния и скорости роста дефектов в осях подвижного состава / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 3. С. 45 – 52.
15. Гаденин М. М. Особенности кинетики диаграмм циклического упругопластического деформирования при наличии в циклах выдержек и наложении на них переменных напряжений / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 12. С. 46 – 53.
DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-12-46-53
16. Махутов Н. А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70. № 4. С. 37 – 41.
17. Махутов Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.
18. Коссов В. С., Волохов Г. М., Овчинников М. Н. и др. Расчетная оценка сопротивления усталости железнодорожного колеса при контактом взаимодействии с рельсом / Вестник машиностроения. 2020. № 10. С. 3 – 8.
19. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / Отв. ред. В. В. Москвитин. — Новосибирск: Наука, 2021. — 796 с.
DOI: 10.7868/978-5-02-038832-1
20. Проблемы прочности и безопасности водо-водяных энергетических реакторов. — М.: Наука, 2008. — 446 с. (Сер. «Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов».)
21. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций. — Новосибирск: Наука, 2017. — 600 с. (Сер. «Исследования прочности, ресурса и безопасности летательных аппаратов».)
22. Напряженно-деформированные состояния ЖРД. — М.: Наука, 2013. — 646 с. (Сер. «Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей».)
23. Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 – 2030 гг.). Распоряжение Правительства от 31.12.2020 г. № 3684-р. <http://static.government.ru/media/files/skz00DEvyFOIBtXobzPA3zTyC71cRAOi.pdf> (дата обращения 25.08.2022)

REFERENCES

1. Serensen S. V. The selected works in 3 volumes. Vol. 1. Strength of materials and parts of structures at a static loading. — 256 p. Vol. 2. Fatigue of materials and parts of structures. Vol. 3. Quasistatic and fatigue fracture of materials and parts of structures. — Kiev: Naukova Dumka, 1985. — 232 p. [in Russian].
2. Resistance to deformation and fracture at low cycles of loading / Responsible editor S. V. Serensen. — Moscow: Nauka, 1967. — 169 p. [in Russian].
3. Strength at low number of cycles of loading. The problems of mechanical fatigue / Responsible editor S. V. Serensen. — Moscow: Nauka, 1969. — 260 p. [in Russian].
4. Shneiderovich R. M. Strength at static and repeated static loadings. — Moscow: Mashinostroenie, 1968. — 343 p. [in Russian].
5. Makhutov N. A. Deformation criteria of fracture and computation of parts of structures on strength. — Moscow: Mashinostroenie, 1981. — 272 p. [in Russian].
6. Manson S. Temperature stresses and low cycle fatigue. — Moscow: Mashinostroenie, 1974. — 444 p. [in Russian].
7. Moskvitin V. V. Cyclic loadings of structures parts. — Moscow: Nauka, 1981. — 344 p. [in Russian].
8. Gusenkov A. P. Strength at an isothermal and not isothermal low cycle loading. — Moscow: Nauka, 1979. — 296 p. [in Russian].

9. **Makhutov N. A.** Strength and safety. Fundamental and applied researches. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
10. **Romanov A. N.** Fracture at a low cycle loading. — Moscow: Nauka, 1988. — 280 p. [in Russian].
11. Strength at a low cycle loading. A series of monographs from 9 books / Ed. by S. V. Serensen, N. A. Makhutov, M. M. Gadenin. — Moscow: Nauka, 1975 – 2006 [in Russian].
12. **Miller K.** Creep and fracture. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 120 p. [in Russian].
13. **Botvina L. R., Zharkova N. A., Tyutin M. R., et al.** Evolution of plastic zones and damage at different types of a loading / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2013. Vol. 79. N 5. P. 46 – 55 [in Russian].
14. **Kazantsev A. G., Ovchinnikov A. V., Silayev A. A., et al.** The analysis of a stress state and growth rate of defects in axes of a railway vehicles / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2013. Vol. 79. N 3. P. 45 – 52 [in Russian].
15. **Gadenin M. M.** Features of the kinetics of cyclic elastoplastic deformation diagrams at dwells in cycles and superimposition of variable stresses on them / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2020. Vol. 86. N 12. P. 46 – 53 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-12-46-53
16. **Makhutov N. A.** Fatigue of metals in a wide range of number of cycles / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2004. Vol. 70. N 4. P. 37 – 41 [in Russian].
17. **Makhutov N. A.** Safety and risks: system researches and workings out. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 724 p. [in Russian].
18. **Kossov V. S., Volokhov G. M., Ovechnikov M. N., et al.** Computation estimation of resistance to fatigue of a railway wheel at contact interaction with a rail / *Vestn. Mashinostr.* 2020. N 10. P. 3 – 8 [in Russian].
19. 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
20. Problems of strength and safety of water-moderated power reactors. — Moscow: Nauka, 2008. — 446 p. (“Researches of Stresses and Strength of Nuclear Reactors” series.) [in Russian].
21. Local criteria of strength, life-time and survivability of aviation structures. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 600 p. (“Researches of Strength, Life-time and Safety of Aircraft” series.) [in Russian].
22. Stress-strain states of a liquid-fuel rocket engine. — Moscow: Nauka, 2013. — 646 p. (“Researches of Stresses and Strength of Rocket Engines” series.) [in Russian].
23. The program of fundamental scientific researches in the Russian Federation for the long-term period (2021 – 2030). The order of the Government from 31.12.2020. N 3684-p. <http://static.government.ru/media/files/skzO0DEvyFOIBtXobzPA3zTyC71cRAOi.pdf> (accessed 25.08.2022) [in Russian].