

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-5-46-51>

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© **Лидия Леонидовна Смирнова, Александр Владимирович Зинин**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; e-mail: mai@mai.ru

*Статья поступила 17 декабря 2018 г. Поступила после доработки 15 января 2019 г.
Принята к публикации 25 февраля 2019 г.*

Отмечается, что значительная часть элементов машин и конструкций при эксплуатации наряду со стационарным усталостным нагружением подвержена совместному воздействию малоциклового и многоциклового усталости. Физическая природа разрушения в этих условиях зависит от соотношения параметров этих режимов и требует углубленного исследования. Преобладание в каждом конкретном случае одного из этих процессов и определяет характер накопления повреждений, приводящих к разрушению. При таких режимах с комбинацией предварительного циклического упругопластического деформирования и последующего усталостного нагружения процессу дальнейшего деформирования подвергается как бы «новый материал» с приобретенными после предварительной стадии нагружения новыми свойствами. Для последующей стадии нагружения эти новые свойства определяются уровнем уже накопленных ранее повреждений и структурными изменениями в материале. Поврежденность материала в этом случае рассматривается на основе известного положения о стадийности протекания пластической деформации в виде двух основных процессов — сдвигообразования, вызванного взаимодействием дислокаций, и деструктирования, определяемого нарушением сплошности металла. Выполненные на образцах из циклически упрочняющейся и циклически разупрочняющейся сталей экспериментальные исследования изменения долговечности при воздействии различных уровней предварительного упругопластического деформирования с варьированием числа циклов и амплитуд предварительной упругопластической деформации показали наличие дополнительных повреждений материала при такой комбинации режимов, которые приводят к изменению усталостной долговечности на последующей стадии основного многоциклового нагружения. Показано, что при наличии предварительных перегрузок имеет место корреляционная связь изменения усталостной долговечности с изменениями структурного состояния материала, которые вызваны накопленными повреждениями, причем такие изменения могут характеризоваться соотношением пластической и деструктивной деформаций в виде коэффициента добротности материала.

Ключевые слова: конструкционный материал; циклическое нагружение; усталость; комбинированные режимы нагружения; перегрузка; накопление повреждений; упругопластические деформации; структура материала; дислокации; деструкция.

STRUCTURAL FEATURES OF DAMAGES ACCUMULATION IN CONDITIONS OF COMBINED CYCLIC LOADING

© **Lidia L. Smirnova, Alexander V. Zinin**

Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe shosse d. 4, Moscow, 125993, Russia; e-mail: mai@mai.ru

Received December 17, 2018. Revised January 15, 2019. Accepted February 25, 2019.

A significant part of the elements of machines and structures along with stationary fatigue is subjected to combined impacts of low-cycle and multi-cycle fatigue loading in operation. The physical nature of their fracture in these conditions depends on the ratio of the mode parameters and entails the necessity of advanced research. The predominance of this or that process determines the nature of the damage accumulation which leads to the destruction. Under such conditions, i.e., preliminary cyclic elastoplastic deformation followed by subsequent fatigue loading, the material subjected to preliminary loading at the first stage can be considered the “new material” with the new properties acquired upon cyclic elastoplastic loading which then undergoes further fatigue loading at the second stage. Hence, at the second stage, the new properties of the material are determined by the level of structural changes and damages earlier accumulated in the material. In this case, the damage to the material is considered on the basis of the well-known statement about the staging character of plastic flow, two main processes, i.e., shear, caused by the interaction of dislocations, and destructuring, attributed to violation of the continuity or integrity of

the metal. Experimental studies of changes in the durability of cyclically hardened and cyclically softened steel specimens at different levels of preliminary elastoplastic deformation with varying number of cycles and amplitudes of preliminary elastoplastic strain showed the occurrence of an additional damage to the material when combination of loading modes leads to change in the fatigue durability at the subsequent stage of the basic multi-cycle loading. It is shown that correlation between changes in the fatigue durability and structural state of the material, caused by accumulated damage upon preliminary overloads, and, moreover, those changes can be characterized by the ratio of plastic and destructive strains as a Q-factor of the material.

Keywords: structural material; cyclic loading; fatigue; combined loading regimes; overload; accumulation of damages; elastic-plastic strains; material structure; dislocation; destruction.

Введение

Повреждения значительной части эксплуатируемых машин и конструкций вызваны совместным проявлением двух процессов — малоцикло-вой и многоцикло-вой усталости [1 – 4]. Физическая природа разрушений в этих условиях остается малоизученной и зависит в значительной степени от того, в каком соотношении находятся указанные процессы. Преобладание одного из них и определяет характер разрушения в эксплуатации [3 – 7]. При таких нестационарных режимах циклического нагружения, связанных с изменением уровня напряжений или асимметрии цикла, деформированию подвергается как бы «новый» материал с приобретенными в процессе предварительного нагружения новыми свойствами, которые определяются уровнем накопленных усталостных повреждений и структурными изменениями в материале на предыдущей стадии [5, 8]. Анализ результатов проведенных в этой области исследований показал, что нагружения на предыдущих стадиях проявляются на последующих стадиях в изменении интенсивности микропластических деформаций и в ускорении или замедлении процесса повреждения металла [6, 7, 9]. Как свидетельствуют литературные данные, этот вопрос требует углубленного изучения. Между тем он представляется важным и для понимания поведения конструкционного материала при нестационарном циклическом деформировании.

Состояние проблемы

Совместное изучение механики поведения материала и структурных изменений при различных условиях его нагружения в пластической области позволило установить закономерности возникновения и накопления в металле повреждений, носящих характер деструкционного деформирования [6 – 10]. С учетом этих данных были развиты базовые положения о стадийности пластической деформации [11, 12], отражающие протекание двух основных процессов — сдвигообразования, вызванного взаимодействием дислокаций, и деструктирования, определяемого разрушением сплошности металла. В этой связи в [8] показано, что модель такого процесса цикли-

ческого пластического деформирования металла наглядно иллюстрируется диаграммами повреждаемости, построенными в координатах $S - \delta_S^{1/2}$, где S — истинное напряжение в каждом из следующих друг за другом полуволн; δ_S — соответствующая арифметическая сумма всех предшествующих пластических деформаций. На рис. 1 приведено схематическое изображение такой диаграммы. Она состоит из трех линейных отрезков (I, II и III) и показывает, что рассматриваемый процесс циклического деформирования имеет три стадии, для каждой из которых характерен свой механизм.

При анализе данного подхода было высказано предположение, что первая стадия циклического деформирования имеет резко выраженный упругопластический характер. «Продолжительность жизни» образца на этой стадии чаще всего составляет примерно 1 % от всей его жизни. Вторая стадия деформирования не является полностью пластической, и характеризующий ее отрезок соединяется с первым под некоторым углом. Представленная модель дает основание рассматривать величину δ_S как сумму пластической деформации δ_p и макроскопической деформации недислокационной природы. При этом компонента деформации недислокационной природы обусловлена согласно [8] деструкцией твердого тела (в данном случае — образца) и названа деструкционной деформацией δ_d .

Соотношение пластической δ_p и суммарной δ_S деформаций ($dS = \delta_p + \delta_d$, где δ_d — деструкционная деформация) характеризуется величиной $\eta = \delta_p/\delta_S$, названной коэффициентом добротности тела (материала). Начало второй стадии

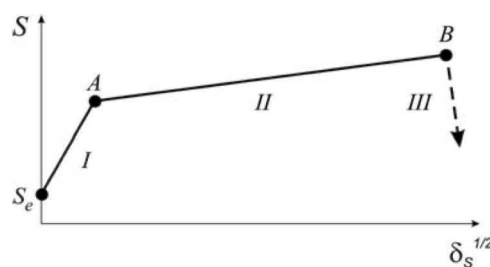


Рис. 1. Схема диаграммы повреждаемости в области малоцикло-вой усталости [8]

сопровождается образованием на поверхности образца разветвленной системы микротрещин. С увеличением числа циклов деформирования эти трещины становятся шире и большая часть амплитуды деформации в цикле приходится на их раскрытие и закрытие. Вторая стадия процесса деформирования — основная и наиболее продолжительная — составляет около 95 %.

В третьей стадии упругопластическая деструкционная деформация локализуется в зоне развития магистральной трещины. Она зарождается в поверхностном слое и далее распространяется внутрь по сечению образца, приводя к окончательному его разрушению.

В развитие этих представлений было проведено [11] детальное исследование кинетики структурных изменений, происходящих во внутренних объемах циклически деформируемого материала. При этом методами электронной и оптической микроскопии показано, что в первой стадии в объеме образца возникают нарушения сплошности материала в виде обособленных микропор и микротрещин. При этом в соответствии с приведенной на рис. 1 диаграммой на первой стадии разрушения такого типа еще не влияют на механическое поведение материала в целом. На второй стадии отдельные микропоры и микротрещины сливаются в трещины по границам зерен, двойников, а также в полосах скольжения. С увеличением суммарной деформации размеры трещин становятся больше и их число растет. К концу второй стадии деформирования зарождается магистральная трещина, на третьей стадии образуется развитая сеть магистральных трещин.

Методические аспекты и результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования влияния предварительных малоцикловых перегрузок различного уровня на сопротивление последующему усталостному нагружению различных по циклическим свойствам материалов проводили на двух марках строительной стали: 10Г2С1 (повышенной прочности) и 14Х2ГМР (высокой прочности). Первая из них является циклически упрочняющимся, а вторая — циклически разупрочняющимся материалом.

Как показано ранее [10], одна и та же нагрузка повышенного уровня (перегрузка) вносит разную долю повреждаемости в зависимости от того, на какой стадии такая нагрузка прикладывается. Для выбора режимов предварительной «тренировки» материала определенным числом циклов упругопластической деформации необходимо было получить исходные характеристики малоциклового деформирования и разрушения при стационарном режиме, а также исходные ха-

рактеристики усталостного разрушения для обоих типов материала. Испытания при этом проводили при жестком (с постоянной амплитудой деформации) малоцикловом растяжении-сжатии и при чистом изгибе с вращением. Непрерывная регистрация деформаций и напряжений в процессе испытаний вплоть до разрушения позволила построить диаграммы повреждения исследуемых материалов при указанных типах малоциклового нагружения. В задаваемые параметры режима малоцикловых «тренировок», которые являлись первой ступенью исследуемого процесса двухступенчатого нагружения, входили уровень деформации при жестком нагружении (ϵ_a) и количество циклов «тренировки» на данном уровне ($N_{тр}$).

Диаграммы циклического деформирования (петли упругопластического гистерезиса), полученные в процессе эксперимента, перестраивали затем в рассмотренную выше диаграмму в координатах $S - \delta_S^{1/2}$. На рис. 2 представлены полученные в процессе описанных экспериментов диаграммы деформирования образцов в координатах $S - \delta_S^{1/2}$ с различным числом полных циклов сжатия и растяжения. Независимо от амплитуды деформирования для исследованных типов материалов эти диаграммы имеют три прямолинейных участка, каждый из которых характеризует отдельную стадию с характерным для нее механизмом развития деформаций. Арифметическое суммирование приложенных остаточных деформаций при циклическом деформировании по существу представляет собой путь пластического деформирования по числу циклов нагружения. В рассматриваемом симметричном цикле $\delta_S = 2N\delta_a$, где δ_a — амплитуда пластической деформации в цикле.

Первая стадия деформирования соответствует δ_p . Эта деформация имеет ярко выраженный пластический характер. На второй стадии величину δ_S можно рассматривать как сумму пластической деформации δ_p и макроскопической деформации δ_d , связанной с развитием микроразрушений образца. В выполненных экспериментальных исследованиях вторая стадия у всех образцов составила наиболее продолжительную часть их долговечности. Третья стадия характеризуется резким падением напряжения S . Деструкция, начавшая развиваться на второй стадии процесса деформирования и не влиявшая в целом на несущую способность сечения, на третьей стадии локализуется, что обуславливает снижение несущей способности [11]. Этот процесс развивается достаточно быстро и заканчивается окончательным разрушением образца.

Для исследуемых материалов третья стадия составляла около 0,1 % всей долговечности образца. На рис. 2 показана зависимость коэффициен-

та добротности материала $\eta = \delta_p / \delta_s$ от $\delta_s^{1/2}$. Она демонстрирует интенсивность убывания пластической компоненты в процессе циклического деформирования, что соответствует предположениям авторов работ [8, 11, 12].

Результаты исследований влияния перегрузок на долговечность материала как на стадии образования разрушения, так и на стадии развития трещин показывают [10, 13 – 16] изменение (по сравнению с регулярным нагружением) закономерностей накопления повреждений и, как следствие, изменение числа циклов до разрушения. При этом включение в такой комбинированный режим отдельных циклов упругопластической деформации как в начале нагружения, так и на других его стадиях может приводить (в зависимости от параметров режима и типа материала) либо к снижению сопротивления усталостному разрушению, либо к повышению усталостных характеристик [17] за счет дополнительного упрочнения материала, связанного, в том числе, с изменением его структуры под влиянием различных параметров и условий процесса деформирования.

В настоящих исследованиях эффект повреждения материала предварительными «тренировками» оценивали на основе сопоставления исходных и вторичных кривых усталости, по изменению долговечности образцов из сталей 10Г2С1 (рис. 3, а, б) и 14ХЗГМР (рис. 3, в) при нагружении в условиях растяжения-сжатия и изгиба с вращением как без предварительных малоцикловых «тренировок» (исходные кривые усталости), так и с предварительным малоцикловым деформированием (кривые усталости с «тренировками») упругопластическими циклами (от 5 до 1500 циклов) и с размахами упругопластической деформации $2e_a$, равной 0,2 и 0,5 %.

Как видно из рис. 3, а, при растяжении-сжатии образцов циклически упрочняющейся стали 10Г2С1 предварительная «тренировка» пятью циклами с амплитудой упругопластической деформации 0,2 % (кривая 1) приводит к некоторому повышению сопротивления усталости по сравнению с исходной кривой 4 для нагружения без «тренировки». При этом предел усталости увеличивается приблизительно на 10 МПа (с 300 до 310 МПа). Предварительная «тренировка» пятью циклами с увеличенным размахом деформации до $2e_a = 0,5$ % приводит к снижению кривой усталости (кривая 2) относительно исходной и тем самым — к понижению ограниченного предела усталости приблизительно на 25 МПа. Увеличение числа циклов «тренировки» до 80 с тем же размахом упругопластической деформации $2e_a = 0,5$ % еще в большей степени понижает расположение вторичной кривой усталости (кривая 3).

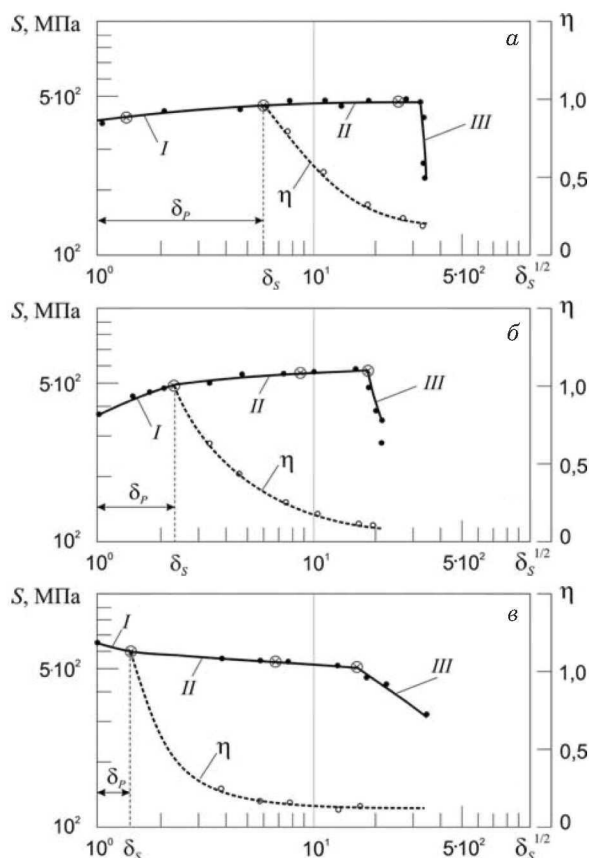


Рис. 2. Экспериментально полученные диаграммы в координатах $S - \delta_s^{1/2}$ и $\eta - \delta_s^{1/2}$ для жесткого циклического деформирования стали 10Г2С1 при e_a , равной 0,2 % (а) и 0,5 % (б) и стали 14Х2ГМР при $e_a = 0,5$ % (в)

При чистом изгибе с вращением образцов из стали 10Г2С1 наблюдалась (см. рис. 3, б) та же тенденция, что и при растяжении-сжатии. При чем «тренировка» 80 циклами с размахом деформации $2e_a = 0,2$ % также повышала долговечность (кривая 1) относительно исходной кривой усталости 2, а увеличение циклов «тренировки» до 1500 с тем же размахом деформации $2e_a = 0,2$ % снижало расположение кривой вторичной усталости (кривая 3).

Результаты экспериментов на образцах из циклически разупрочняющейся стали 14ХЗГМР с расширением числа ступеней циклов предварительной «тренировки» показали (см. рис. 3, в), что вторичные кривые усталости как для «тренировки» пятью циклами с $2e_a = 0,2$ % (кривая 1), так и для «тренировки» 100 циклами с тем же размахом деформации $2e_a = 0,2$ % (кривая 2), а также пятью и 80 циклами с $2e_a = 0,5$ % (кривые 3 и 4 соответственно) имеют тенденцию к снижению долговечности относительно исходной кривой усталости (кривая 5). Причем максимальное снижение имело место при предварительном нагружении 100 циклами с $2e_a = 0,2$ % и составило

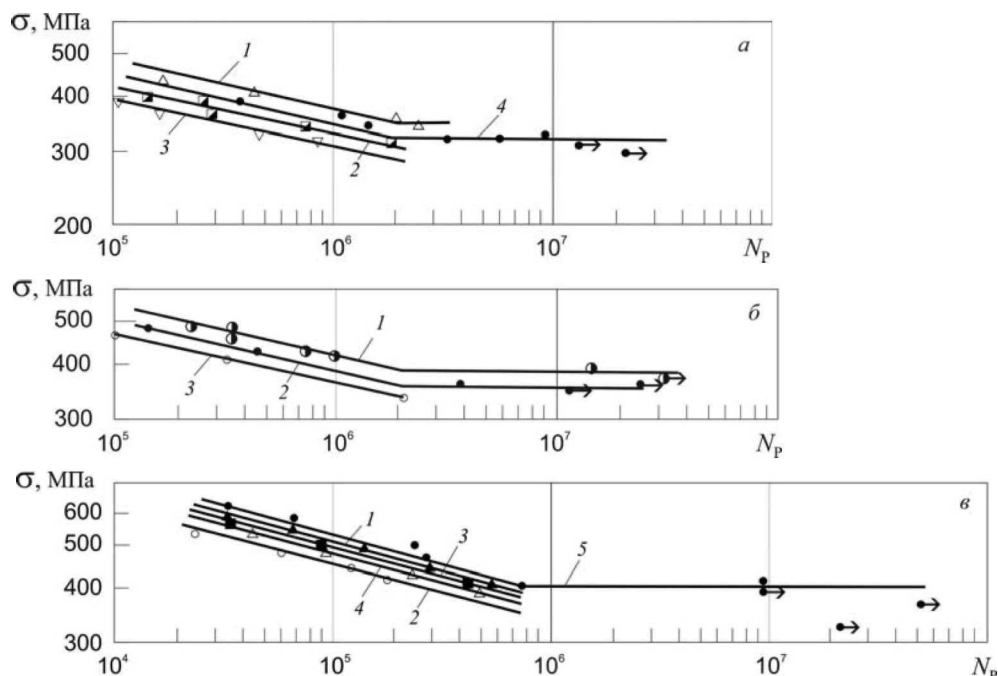


Рис. 3. Исходные и вторичные кривые усталости при нагружении с «тренировками» сталей 10Г2С1 при растяжении-сжатии (а) и изгибе с вращением (б), а также стали 14Х2ГМР (в)

около 55 МПа по отношению к кривой для «нетренированного» материала.

Заключение

Как следует из анализа представленных на рис. 3, а – в результатов испытаний на усталость образцов из сталей 10Г2С1 и 14Х2ГМР с предварительными «тренировками» упругопластическими циклами нагружения, долговечность материала при таких комбинированных режимах изменяется в отличие от исходной кривой усталости — при нагружении без предварительной «тренировки». При этом долговечность циклически упрочняющейся стали 10Г2С1 повышается при «тренировке» относительно малым числом циклов ($n = 5$) и размахе упругопластической деформации $2\epsilon_a = 0,2\%$. С увеличением этих параметров повреждаемость материала предварительным циклическим упругопластическим деформированием усиливается, вследствие чего соответствующие кривые усталости показывают снижение долговечности и ограниченных пределов выносливости. Циклически разупрочняющаяся сталь 14Х2ГМР при всех условиях, всех уровнях предварительного деформирования и числа циклов «тренировки» проявляет эффект повышенной повреждаемости материала этими циклами, обуславливающей уменьшение долговечности и снижение уровня ограниченного предела выносливости, в отличие от «нетренированного» материала.

Анализ полученных экспериментальных данных об изменении усталостной повреждаемости материала при наличии предварительного «тренировочного» циклического упругопластического деформирования (см. рис. 2, а – в) с позиций учета влияния на него изменения структурного состояния материала показывает, что отмеченные выше эффекты для циклически упрочняющегося материала (сталь 10Г2С1) коррелируют с величиной деформации предварительной «тренировки» и с присутствующей в данном случае деструкционной составляющей деформации на II стадии диаграммы деформирования в координатах $S - \delta_S^{1/2}$ (см. рис. 2, а, б). Для циклически разупрочняющегося материала (сталь 14Х2ГМР) предварительная малоцикловая «тренировка» как на I стадии деформирования, так и на последующих II и III стадиях (см. рис. 2, в) независимо от величины амплитуды предварительной деформации уменьшает долговечность и ограниченный предел выносливости.

Таким образом, интенсивность процесса изменения сопротивления материала усталостному разрушению при наличии предварительного малоциклового нагружения определяется типом материала, амплитудой деформации и количеством циклов предварительной «тренировки», влияющих на уровень накопленной поврежденности. При этом имеет место корреляционная связь этого процесса с изменениями структурного состояния материала при наличии перегрузок. Указанное обстоятельство следует учитывать при назна-

чении технологических операций, связанных с предварительным циклическим деформированием материала конструкции повышенными уровнями нагрузок, путем выбора экспериментально обоснованного допустимого уровня режима нагружения и числа циклов «тренировки» в зависимости от уровня вносимой ими поврежденности, типа материала и условий эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кобаев В. П.** Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. — М.: Машиностроение, 1993. — 364 с.
2. **Степнов М. Н., Агамиров Л. В., Зинин А. В., Махутов Н. А., Гаденин М. М., Кузьмин А. Е.** Научные школы. Прочность машин и конструкций при переменных нагрузках. — М.: МАТИ, 2001. — 216 с.
3. **Махутов Н. А., Гаденин М. М., Москвичев В. В. и др.** Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций. Серия «Исследования прочности, ресурса и безопасности летательных аппаратов». — Новосибирск: Наука, 2017. — 600 с.
4. **Махутов Н. А., Рачук В. С., Гаденин М. М. и др.** Прочность и ресурс ЖРД. Серия «Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей» — М.: Наука, 2011. — 525 с.
5. **Махутов Н. А.** Конструкционная прочность, ресурс и технологическая безопасность. В двух частях. Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. — Новосибирск: Наука, 2005. — 494 с.
6. **Романов А. Н.** Разрушение при малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1988. — 278 с.
7. **Романов А. М., Филимонова Н. И.** Накопление повреждений при циклическом нагружении с учетом структурных и деформированных неоднородностей / Сборник материалов Международной научной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения». — Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. — 156 с.
8. **Ровинский Б. М., Рыбакова Л. М.** Напряжения, деформации и структурные изменения в техническом железе при циклической пластической деформации / Изв. АН СССР. Металлы. 1965. № 3. С. 101.
9. **Гурьев А. В., Козуб В. В.** К вопросу о влиянии предварительного циклического нагружения на интенсивность накопления усталостных повреждений в стали / Материаловедение и прочность материалов / Труды Волгоградского политехнического института. 1971. Т. 3.
10. **Романов А. Н., Смирнова Л. Л., Меренкова Р. Ф.** Влияние малоцикловых нагрузок на усталость конструкционных материалов / МитОМ. 1979. № 4. С. 34.
11. **Ровинский Б. М., Рыбакова Л. М., Меренкова Р. Ф.** Диаграмма напряжений-деформаций и структурные изменения в металле при малоцикловой усталости / Доклады III совещания по механическим вопросам усталости. — М.: Наука, 1969. С. 41.
12. **Рыбакова Л. М.** Деструкция металла при объемном и поверхностном пластическом деформировании / МитОМ. 1980. № 8. С. 17.
13. **Смирнова Л. Л., Лебединский С. Г.** Влияние технологических перегрузок на ресурс фильтра авиационных гидросистем / Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. 31 марта 2016. Ч. 1. — Смоленск, 2016. С. 71.
14. **Лебединский С. Г., Смирнова Л. Л., Москвитин Г. В.** Влияние растягивающих перегрузок на скорость роста усталостных трещин в сплавах АК4-1 и ВТ3 / Материалы XVIII Международного семинара, 24–25 июня 2011 г. — Подольск: МГОУ, 2011.
15. **Смирнова Л. Л.** Скорость развития усталостных трещин в условиях перегрузок / Объединенный научный журнал. — М.: Агентство научной печати. 2013. № 3–4.
16. **Степнов М. Н., Зинин А. В.** Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. — М.: Инновационное машиностроение, 2016. — 392 с.
17. **Махутов Н. А., Фролов К. В., Гаденин М. М. и др.** Научные основы повышения малоцикловой прочности. — М.: Наука, 2006. — 623 с.

REFERENCES

1. **Kogaev V. P.** Strength calculations at variable in time stresses. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. — 364 p. [in Russian].
2. **Stepnov M. N., Agamirov L. V., Zinin A. V., Makhutov N. A., Gadenin M. M., Kuzmin A. E.** Scientific schools. The strength of machines and structures at variable loads. — Moscow: MATI, 2001. — 216 p. [in Russian].
3. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Moskvichov V. V., et al.** Local criteria of strength, resource and survivability of aviation structures. The series "Researches of strength, resource and safety of aircrafts". — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 600 p. [in Russian].
4. **Makhutov N. A., Rachuk V. S., Gadenin M. M., et al.** Strength and resource of liquid-fuel rocket engines. The series "Researches of rocket engines stresses and strength". — Moscow: Nauka, 2011. — 525 p. [in Russian].
5. **Makhutov N. A.** Structural strength, resource and engineering safety. In 2 parts. Part 1. Strength and resource criteria. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 494 p. [in Russian].
6. **Romanov A. N.** Fracture under low-cycle loading. — Moscow: Nauka, 1988. — 278 p. [in Russian].
7. **Romanov A. M., Filimonova N. I.** Accumulation of damage under cyclic loading, taking into account structural and deformed inhomogeneities / The collection of materials of the International scientific conference "Machines, technologies and materials for modern engineering". — Moscow – Izhevsk: Institute of Computer Science, 2018. — 156 p. [in Russian].
8. **Rovinskii B. M., Rybakova L. M.** Stress, strain and structural changes in iron at cyclic plastic strain / Izv. AN SSSR. Metallurgy. 1965. N 3. P 101. [in Russian].
9. **Gur'ev A. V., Kozub V. V.** On the question of the effect of preliminary cyclic loading on the intensity of fatigue damage accumulation in steel. Materials technology and strength of materials / Tr. Volgograd. Politekh. Inst. 1971. Vol. 3. [in Russian].
10. **Romanov A. M., Smirnova L. L., Merenkova R. F.** Effect of low-cycle loads on fatigue of structural materials / MitOM. 1979. N 4. P 34. [in Russian].
11. **Rovinskii B. M., Rybakova L. M., Merenkova R. F.** The stress-strain diagram and structural changes in a metal at low-cycle fatigue / Report at the 3rd meeting on the mechanical problems of fatigue. — Moscow: Nauka, 1969. P. 41 [in Russian].
12. **Rybakova L. M.** Degradation of a metal at volumetric and superficial plastic deformation / MitOM. 1980. N 8. P 17 [in Russian].
13. **Smirnova L. L., Lebedinsky S. G.** The impact of technological overload on the filter life of aviation hydraulic systems / Collection of scientific papers on the materials of the International Scientific and Practical Conference. March 31, 2016. Part 1. — Smolensk, 2016. P. 71 [in Russian].
14. **Lebedinsky S. G., Smirnova L. L., Moskvitin G. V.** The effect of tensile overloads on the growth rate of fatigue cracks in alloys AK4-1 and VT3 / Materials of the XVIII International Seminar on June 24–25, 2011. — Podolsk: MGOU, 2011 [in Russian].
15. **Smirnova L. L.** The rate of fatigue cracks growth under overload conditions / Ob"ed. Nauch. Zh. — Moscow: Agentstvo Nauch. Pechati. 2013. N 3–4. P 11 [in Russian].
16. **Stepnov M. N., Zinin A. V.** Prediction of fatigue resistance characteristics of materials and structural parts. — Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2016. — 392 p. [in Russian].
17. **Makhutov N. A., Frolov K. V., Gadenin M. M., et al.** Scientific bases of low cycle strength increase. — Moscow: Nauka, 2006. — 623 p. [in Russian].