



ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 629.114.4

А.В. ШМЕЛЕВ, канд. техн. наук
заместитель генерального директора по научной работе¹
E-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

Э.В. ЛИСОВСКИЙ
заведующий сектором конечно-элементного анализа¹
E-mail: evlisovski@gmail.com

С.А. ШЛЯЖКО
младший научный сотрудник¹

П.С. ЛИТВИНЮК
младший научный сотрудник¹

А.С. ХАЦКЕВИЧ
ведущий инженер-конструктор группы расчетов²

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21.10.2019.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Приведены методические рекомендации по оценке усталостной долговечности элементов несущих конструкций машин при действии случайных процессов эксплуатационного нагружения на основе комплексного применения технологий компьютерного моделирования. Рассматриваются базовые этапы решения задач расчета динамической нагруженности, показателей напряженно-деформированного состояния и оценки усталостной долговечности карьерного самосвала при работе машины в типовых эксплуатационных условиях. Расчетные исследования реализованы с использованием комплекса программных средств моделирования многокомпонентных систем ADAMS, конечно-элементного анализа ANSYS и расчетной оценки усталостной долговечности nCODE Design Life.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, виртуальные испытания, метод конечных элементов, методика, несущие системы, карьерный самосвал, силовая нагруженность, напряженно-деформированное состояние, ресурс, усталостная долговечность, сварные соединения, ANSYS, ADAMS, nCODE

Введение. Одной из основных причин разрушения несущих конструкций карьерных самосвалов в процессе эксплуатации является достижение предельного состояния в результате накопления усталостных повреждений, вызванных воздействием высоких переменных нагрузок. Поломки силовых элементов карьерного самосвала влекут за собой

значительные материальные потери ввиду простоя машины, который, из-за сложности и больших габаритов конструкций, может занимать продолжительный отрезок времени. Поэтому на стадии разработки машины должны быть заложены проверенные конструктивные и технологические решения, обеспечивающие высокие показатели долговечности.

Одним из наиболее достоверных подходов к оценке ресурса силовых конструкций машины, применяемых с целью определения выполнения поставленных требований на стадии разработки, является проведение форсированных натурных испытаний. Такие испытания могут проводиться как для машины в целом на автополигоне, так и для отдельных конструкций в стендовых условиях. Последние проводят на специально разработанных установках, как правило, с применением серво-гидравлических нагружающих устройств, что позволяет достичь максимальной степени форсировки по времени накопления повреждений в характерных зонах конструкций. Это обеспечивается возможностью индивидуального подбора режима испытаний для каждой конструкции. Основным недостатком натурных испытаний является необходимость наличия опытного образца машины либо исследуемой конструкции, что приводит к значительным затратам времени и материальных средств на реализацию данного подхода, а также ограничивает число анализируемых вариантов решений. Поэтому в современной передовой практике разработки машин и компонентов натурные испытания, как правило, применяются для подтверждения свойств, заложенных на стадии конструирования. При этом по результатам таких испытаний могут производиться определенные корректировки конструкции или технологии изготовления без необходимости проведения повторных испытаний.

Практическая реализация концепции применения натурных испытаний исключительно для подтверждения требуемых свойств возможна при наличии апробированной методологии комплексного компьютерного моделирования процессов функционирования машины, позволяющей оценивать показатели динамики движения машины, напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, выполнять схематизацию случайно изменяющихся показателей нагруженности, а также суммирование накопленных усталостных повреждений с учетом относительной доли работы машины на каждом эксплуатационном режиме. Такая методология моделирования подразумевает наличие эффективных методов и средств выполнения расчетных оценок искомых показателей, включая итоговое значение ресурса при многорежимном нагружении конструкций. При этом под эффективностью подразумевается в первую очередь быстрота и достоверность получаемого результата. Учитывая, что методология моделирования должна применяться в повседневной практике проектирования промышленного предприятия, то несомненным требованием является также относительная простота применения.

Одним из базовых и наукоемких элементов данной методологии моделирования является методическая часть, дающая описание применяемых методов и средств моделирования, основных

этапов процесса моделирования, расчетных моделей, определения искомых показателей нагруженности конструкций, способов и условий передачи данных между этапами расчетов и т. п.

Основные результаты разработки методических рекомендаций к расчетной оценке усталостной долговечности несущих конструкций на основе комплексного компьютерного моделирования процессов нагружения и накопления повреждений, а также данные их практической апробации приводятся в данной работе. Базовые средства моделирования, используемые на разных стадиях расчетов, включают программные комплексы, обеспечивающие решение задач динамики, расчета показателей НДС, статистической обработки данных, моделирования систем управления, схематизации случайно изменяющихся нагрузок и суммирования усталостных повреждений.

В качестве объекта исследования рассматриваются несущие конструкции карьерного самосвала особо большой грузоподъемности. При этом наиболее опасными по критерию усталости считаются зоны сварных соединений конструкций. Поэтому в качестве примера оценка ресурса выполняется для наиболее нагруженных сварных соединений.

Реализованный в приведенных рекомендациях комплекс подходов и методов, используемых непосредственно для оценки усталостной долговечности, учитывает положения нормативных документов по оценке усталостной долговечности конструкций [1–2]. В качестве основного руководства по расчету усталостной долговечности сварных соединений, содержащего полный набор необходимых характеристик сопротивления усталости конструкционных сталей, а также требования к расчетным моделям, используется британский стандарт BS 7608:2014 [2].

Алгоритм расчетной оценки усталостной долговечности. Для определения необходимой последовательности действий и структурирования передаваемой информации при выполнении расчетной оценки усталостной долговечности несущих конструкций карьерных самосвалов при заданных условиях эксплуатации был разработан алгоритм, представленный на рисунке 1.

Данный алгоритм учитывает применение средств компьютерного моделирования для выполнения следующих основных операций:

- подготовки геометрических моделей конструкций (SpaceClaim);
- моделирования эксплуатационных режимов динамического нагружения и определения нагрузок, действующих на несущие конструкции (ADAMS);
- статистической обработки данных, описания и реализации алгоритмов управления движением машины (Matlab);
- расчета процессов изменения показателей НДС конструкций под действием эксплуатационных нагрузок (ANSYS);



Рисунок 1 — Алгоритм расчета долговечности несущих конструкций на основе комплексного компьютерного моделирования процессов
 Figure 1 — Algorithm for calculating the durability of load-bearing structures based on complex computer modeling of processes

- оценки ресурса по критерию многоциклового усталости (nCODE Design Life).

Схема обмена данными между используемыми программными средствами и их форматы приведены на рисунке 2.

Приведенный набор программных средств позволяет определить динамические нагрузки, действующие на несущие конструкции в заданных условиях эксплуатации, историю изменения НДС и выполнить оценку ресурса по критерию многоциклового усталости [3].

Рассмотрим более детально основные этапы процесса расчетной оценки усталостной долговечности на примере сварных соединений рамы карьерного самосвала.

Анализ условий эксплуатации автомобиля и формирование типового рабочего цикла (этап 1). Любая расчетная оценка долговечности конструкции соответствует определенным условиям эксплуатации, описываемым конкретными показателями нагруженности. Для несущих конструкций карьерного самосвала основные нагрузки формируются при движении по дорогам карьера в результате взаимодействия колес с неровностями дороги и вызванных этим взаимодействием динамических колебаний поддрессоренных и неподдрессоренных масс. Величина возникающих при этом нагрузок зависит от параметров микро- и макропрофиля дороги, скорости движения, массы перевозимого груза, упругих и демпфирующих характеристик подвески и шин, компоновочных параметров и т. п. Также определенное повреждающее действие вносят такие технологические режимы как загрузка и разгрузка.

Таким образом, для выполнения расчетной оценки долговечности конструкций необходимо сформировать набор нагрузочных режимов, характеризующих определенные условия эксплуатации. Данный набор нагрузочных режимов называется типовым рабочим циклом карьерного самосвала. Он описывает полный спектр регулярно повторяющихся в процессе эксплуатации режимов нагружения конструкций. Типовой рабочий цикл карьерного самосвала определяется в результате

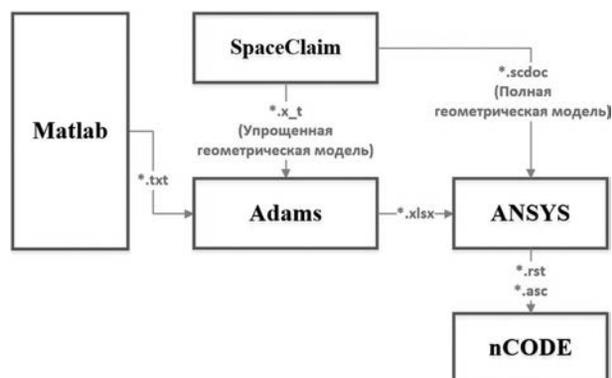


Рисунок 2 — Схема обмена данными между используемыми программными средствами
Figure 2 — Scheme of data exchange between used software tools

анализа технологического маршрута движения от места загрузки до разгрузки. В ходе такого анализа выделяются нагрузочные режимы, характеризующиеся постоянными или, наоборот, переменными параметрами нагруженности, либо их сочетанием. Например, выделяются режимы движения самосвала в груженом или снаряженном состоянии по прямой с определенной скоростью, повороты и развороты заданного радиуса и направления, возможные торможения с заданной начальной скоростью движения и т. п. Каждый нагрузочный режим в составе рабочего цикла машины описывается также длительностью действия, которая может выражаться как в абсолютных, так и относительных величинах.

На данном этапе производится обработка накопленных статистических данных по профилю дороги карьера. Профиль дороги делится на три составляющие — макропрофиль, микропрофиль и шероховатости. На основании научно-обоснованных данных было установлено, что влияние шероховатостей и макропрофиля дороги на силовую нагруженность карьерного самосвала не столь значительно в сравнении с влиянием микропрофиля. Поэтому при обработке статистических данных в Matlab применяются фильтры, позволяющие выделить только микропрофиль дороги. Далее на основании обработанных данных в пакете динамического моделирования ADAMS происходит построение участков дороги с учетом микропрофиля.

На рисунке 3 приведен условный типовой рабочий цикл карьерного самосвала, сгенерированный по результатам анализа маршрута движения карьерного самосвала в одном из карьеров и используемый в качестве примера для апробации применения предлагаемой методики.

Для уменьшения трудоемкости и длительности вычислений компьютерное моделирование целесообразно выполнять не для полной длины типового участка движения, а для типового участка базовой (минимальной) длины, обеспечивающей в результате моделирования полный набор силовых воздействий, характерных для данного режима нагружения. В результате такого представления каждый типовой участок движения в рабочем цикле самосвала будет представлен числом повторений типового участка базовой длины. При этом для каждого типового участка базовая длина может отличаться ввиду особенностей формирования репрезентативного набора нагрузок.

Например, длина типового прямолинейного участка движения со скоростью 15 км/ч в груженом состоянии по технологической дороге равна 600 м. Базовая длина для этого типового участка движения составляет 100 м, тогда данный типовой режим нагружения может быть представлен шестикратным повторением нагрузок, определенных на типовом участке базовой длины 100 м.

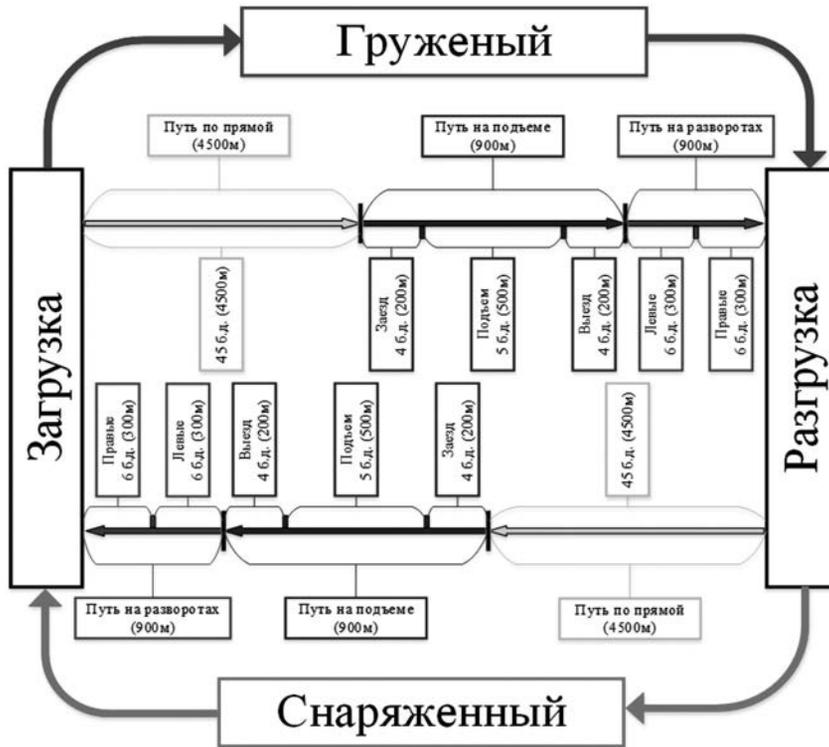


Рисунок 3 — Типовой рабочий цикл карьерного самосвала
 Figure 3 — Typical operating cycle of a mining dump truck

В результате анализа условий эксплуатации для рассматриваемого карьерного самосвала был сформирован типовой рабочий цикл, состоящий из 13 режимов нагружения с заданными параметрами повторяемости (таблица 1). На протяжении

всех режимов движения самосвал имел постоянную скорость 15 км/ч. Данный типовой рабочий цикл соответствует по величине накопленных усталостных повреждений в конструкциях эксплуатационному пробегу, равному 12 км. Ниже

Таблица 1 — Расчетные схемы рассматриваемых режимов нагружения
 Table 1 — Calculation schemes of considered loading regimes

Разворот влево	Разворот вправо	Движение прямо	Переходный процесс, заезд
Спуск	Переходный процесс, выезд	Разворот влево	Разворот вправо
Движение прямо	Переходный процесс, заезд	Подъем	Переходный процесс, выезд
Загрузка-разгрузка			

приведены краткие характеристики сформированных режимов нагружения:

- 1) снаряженный, разворот влево на 180 градусов (50 м по 6 раз);
- 2) снаряженный, разворот вправо на 180 градусов (50 м по 6 раз);
- 3) снаряженный, прямолинейное движение (100 м по 45 раз);
- 4) снаряженный, спуск:
 - а) Этап 1. Переходный процесс, заезд (50 м по 4 раза);
 - б) Этап 2. Спуск (100 м по 5 раз);
 - в) Этап 3. Переходный процесс, выезд (50 м по 4 раза);
- 5) груженный, разворот влево на 180 градусов (50 м по 6 раз);
- 6) груженный, разворот вправо на 180 градусов (50 м по 6 раз);
- 7) груженный, прямолинейное движение (100 м по 45 раз);
- 8) груженный, подъем:
 - а) Этап 1. Переходный процесс, заезд (50 м по 4 раза);
 - б) Этап 2. Подъем (100 м по 5 раз);
 - в) Этап 3. Переходный процесс, выезд (50 м по 4 раза);
- 9) загрузка-разгрузка (0 м по 1 разу).

Определение силовой динамической нагруженности конструкций (этап 2). Определение силовой динамической нагруженности конструкций выполняется путем моделирования движения или работы самосвала для каждого типового режима нагружения. Решение данной задачи выполняется в программном комплексе ADAMS с использованием компьютерной динамической модели самосвала (рисунок 4).

Такая модель должна достаточно детально описывать основные массо-инерционные, кинематические, упругие и демпфирующие характеристики реального объекта. Более подробная информация по разработке компьютерных динамических моделей и моделированию движения транспортных средств приведена в работе [4].

По результатам динамического моделирования определяются процессы изменения силовой нагруженности, представленной силами и моментами по трем осям локальных систем координат, расположенных в точках установки элементов подвески

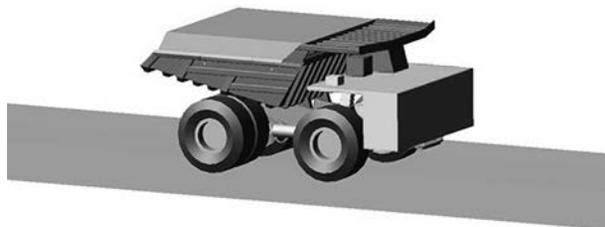


Рисунок 4 — Компьютерная динамическая модель карьерного самосвала

Figure 4 — Computer dynamic model of the mining dump truck

и кинематических пар, связывающих конструкции и узлы самосвала. Пример полученных расчетным путем процессов изменения сил и моментов, действующих в месте крепления переднего моста к раме при прямолинейном движении карьерного самосвала в груженом состоянии со скоростью 15 км/ч, приведен на рисунке 5.

На данном этапе выполняется подготовка и передача полного набора информации по силовой нагруженности конструкций, полученной по результатам динамического анализа, для расчета показателей НДС конструкций методом конечно-элементного моделирования. Нагрузки, представленные процессами изменения во времени сил и моментов, полученные в программном комплексе динамического анализа ADAMS, передаются в среду конечно-элементного моделирования ANSYS. При этом важно, чтобы места приложения точечных нагрузок в динамической и конечно-элементной модели совпадали в пространстве. Инерционные нагрузки, действующие на конструкции и системы, берутся относительно центров масс соответствующих объектов. В процессе передачи генерируются файлы в формате *.xlsx, содержащие все необходимые нагрузки.

Определение наиболее нагруженных зон конструкции (этап 3). На третьем этапе в среде программного комплекса ANSYS на основе трехмерной геометрической модели создается расчетная конечно-элементная модель несущей системы карьерного самосвала. Эта модель необходима для расчета показателей НДС и определения расположения наиболее нагруженных зон конструкций.

Ввиду высокой сложности и больших габаритов несущих конструкций карьерных самосвалов на этом этапе создаются упрощенные конечно-элементные модели с относительно большими размерами конечных элементов. Для упрощения процедуры генерации сетки применяются элементы тетраэдрической формы второго порядка. Размер грани элемента может составлять 20–60 мм. Это позволяет решить задачу локализации наиболее нагруженных зон конструкций при минимальном времени подготовки модели и вычислений. Пример упрощенной конечно-элементной модели рамы карьерного самосвала приведен на рисунке 6.

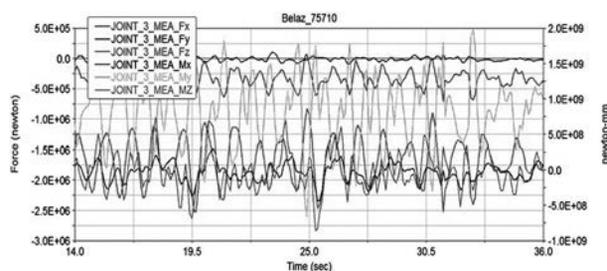


Рисунок 5 — Процессы изменения сил и моментов в одном из шарниров динамической модели карьерного самосвала
Figure 5 — Processes of changing forces and moments in one of the joints of the dynamic model of the mining dump truck

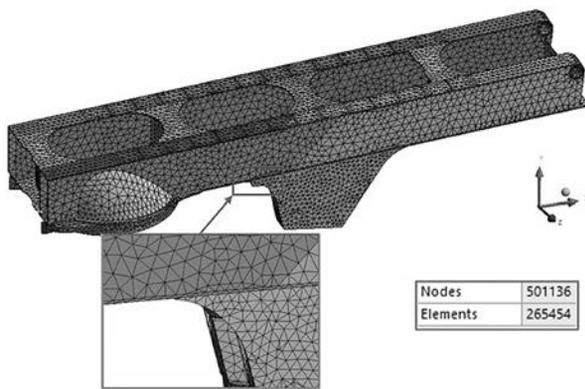


Рисунок 6 — Конечно-элементная модель рамы карьерного самосвала

Figure 6 — Finite element model of the mining dump truck frame

Задача расчета НДС конструкций решается в линейной квазистатической постановке с автоматической компенсацией неуравновешенных составляющих сил инерции (Inertia Relief). В качестве исходных данных по нагруженности конструкций используются процессы нагружения, определенные по результатам динамического анализа в точках расположения кинематических связей. Учитывая постановку решаемой задачи, также к центрам масс конструкций прикладываются динамические воздействия, возникающие в результате действия инерционных сил.

В рассматриваемом примере прикладываемые к конечно-элементной модели в ANSYS нагрузки, вычисленные в программном комплексе ADAMS, представлены процессами изменения во времени сил и моментов. Частота следования ординат процессов должна обеспечивать максимально полное описание амплитуд переменных нагрузок. Поэтому с учетом особенностей динамики колебаний карьерного самосвала и его систем на рассматриваемых нагрузочных режимах была выбрана частота следования ординат равная 10 Гц. Это значение позволяет с достаточной точностью описать амплитуды нагрузок, действующих на раму самосвала, а также обеспечить приемлемую трудоемкость и длительность вычислений.

По результатам расчета показателей НДС конструкций для каждого режима нагружения выполняется определение расположения наиболее нагруженных и потенциально опасных по критерию усталости зон. На рисунке 7 приведен пример локализации наиболее нагруженных зон рамы самосвала.

Расчет показателей напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных зон конструкции (этап 4). Для выполнения расчетной оценки усталостной долговечности сварных соединений по результатам расчета показателей прочности с использованием метода конечных элементов необходимо выполнение некоторых требований к формированию геометрических и конечно-элементных моделей. Реализация таких требований для всей конструкции приведет к значительному

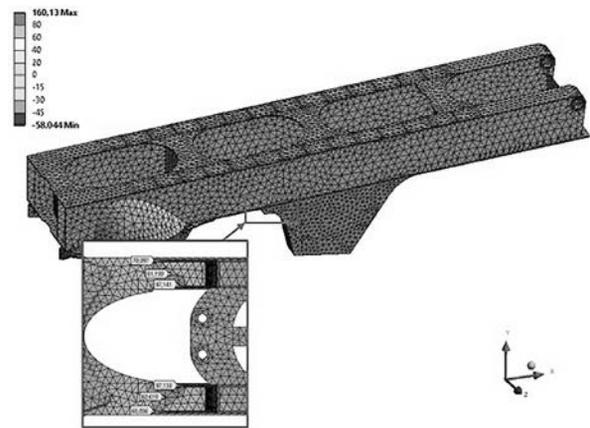


Рисунок 7 — Картина распределения растягивающих напряжений для упрощенной модели рамы самосвала
Figure 7 — Pattern of distribution of tensile stresses for a simplified model of the dump truck frame

усложнению процесса подготовки моделей, а также высокой длительности расчетов, либо необходимости их выполнения на суперкомпьютерном оборудовании. Последнее ведет также к необходимости наличия соответствующих лицензий на расчетное программное обеспечение. Поэтому с целью упрощения процедуры расчетов детализация моделей выполняется только для зон с повышенными показателями нагруженности, выявленных на предыдущем этапе работы.

Уточненный расчет показателей прочности для наиболее нагруженных зон конструкций в программном комплексе ANSYS наиболее эффективно выполняется с применением технологии подмоделей. При этом детально моделируется только фрагмент исследуемой конструкции, а нагрузки, действующие на него, передаются в виде узловых перемещений из результатов упрощенной модели.

Согласно рекомендациям норматива по расчетной оценке усталостной долговечности конструкций BS 7608-2014 [2], сетка конечных элементов в зонах около сварных соединений должна состоять из структурированных гексаэдрических элементов определенного размера (рисунок 8).

Выбор величины размера конечных элементов на данном этапе определен условием наличия не менее двух элементов по толщине листа материала. Так как усталостные разрушения в первую очередь происходят в зонах расположения сварных соединений, то для сокращения времени подготовки и расчета подмодели остальные элементы конструкции целесообразно разбивать

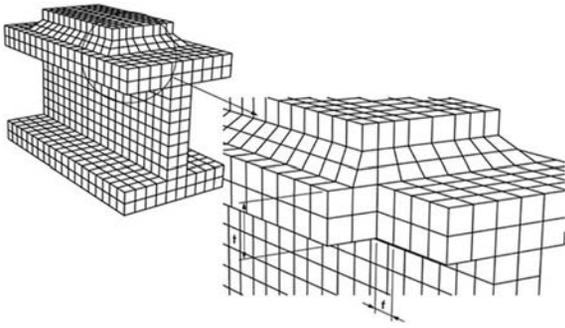


Рисунок 8 — Гексаэдрическая конечно-элементная модель с обозначением размера элементов основания сварного шва f и толщины пластины t [2]

Figure 8 — Hexahedral finite element model indicating the size of the weld base elements f and the thickness of the plate t [2]

более крупными элементами тетраэдрической формы (рисунок 9).

Результаты расчетов показателей прочности для подмодели рамы карьерного самосвала, содержащие информацию об изменении напряжений для каждого узла модели во времени, записываются в файл формата *.rst. Частота вывода результатов прочностного расчета равна частоте значений действующих нагрузок — 10 Гц.

На рисунке 10 приведен пример результатов расчета растягивающих напряжений, вычисленных с использованием детализированной подмодели рамы.

Использование подмоделей позволяет относительно просто обеспечить требования BS 7608-2014 к расчету градиентов и значений локальных мак-

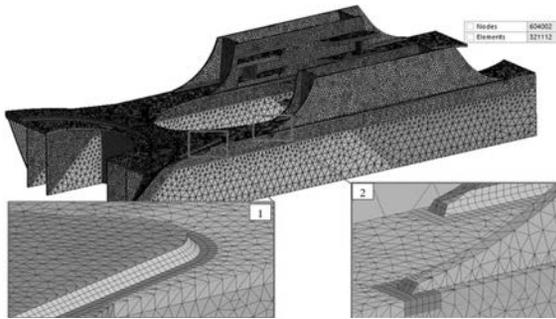


Рисунок 9 — Конечно-элементная подмодель фрагмента рамы карьерного самосвала

Figure 9 — Finite element submodel of the mining dump truck frame part

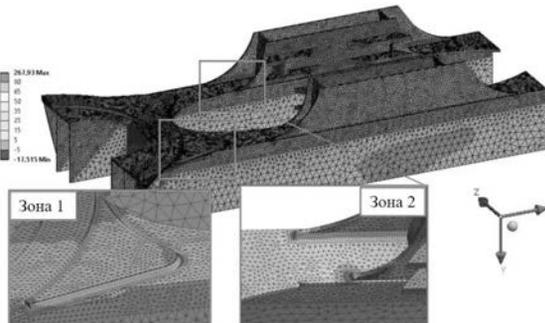


Рисунок 10 — Картина распределения растягивающих напряжений в области сварных соединений фрагмента рамы карьерного самосвала

Figure 10 — Pattern of distribution of tensile stresses in the area of welded joints of the mining dump truck frame part

симумов напряжений с заданной точностью. Сравнение картин распределения НДС и расположения локальных максимумов для одного и того же фрагмента конструкции и момента нагружения, полученные по упрощенной модели и с использованием подмодели рамы, приведены в таблице 2.

Расчетная оценка усталостной долговечности (этап 5). Расчетная оценка усталостной долговечности конструкции выполняется на основании результатов расчета показателей прочности, рассчитанных для всех нагрузочных режимов, описывающих типовой рабочий цикл карьерного самосвала. Таким образом, в ходе данного этапа работы определяется число повторений типowego рабочего цикла самосвала до достижения в рассматриваемых зонах предельного состояния по критерию усталости. Зная число километров пробега, соответствующее типовому рабочему циклу, вычисленные значения циклической долговечности могут быть выражены числом километров пробега. С учетом представления нагрузочных режимов в виде числа повторений движения карьерного самосвала по типовому участку базовой длины или повторений базовой рабочей операции при расчетной оценке долговечности должны быть заданы числа таких повторений.

При описании типowego рабочего цикла также необходимо указать характеристики продолжительности нагрузочных режимов. Как правило, это делается заданием удельных показателей, например, процентов, соответствующих пробегу самосвала на конкретном режиме по отношению к общей протяженности типowego маршрута движения. Режимы нагружения, которые не связаны с движением (загрузка, разгрузка и т. п.), описываются числом повторений в рамках типowego рабочего цикла машины.

Помимо информации по нагруженности на данном этапе расчета задаются характеристики сопротивления усталости элементов конструкций. При этом для расчета сварных соединений важным является возможность задания различных свойств различным типам сварных соединений, а также учесть особенности характера нагружения каждого сварного соединения (направление вектора главных напряжений).

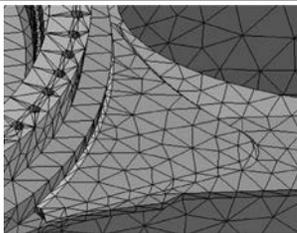
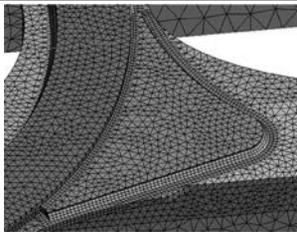
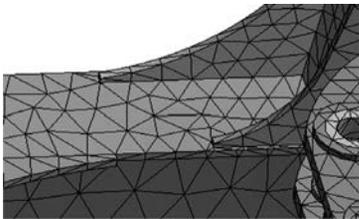
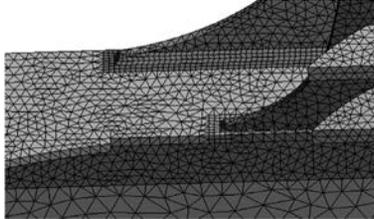
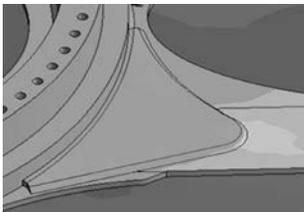
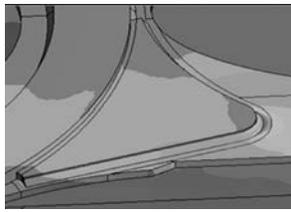
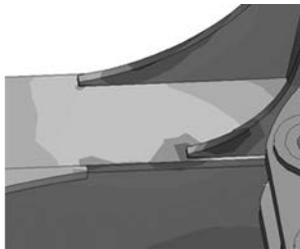
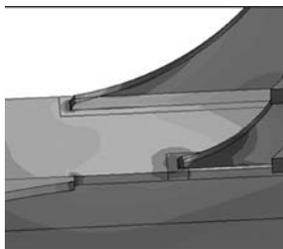
Ниже приведен пример расчета усталостной долговечности несущих конструкций с применением программного комплекса nCODE Design Life.

На начальной стадии расчета осуществляется экспорт результатов моделирования из ANSYS, содержащих все необходимые данные по изменению НДС конструкции для рассматриваемых нагрузочных режимов. Все необходимые данные передаются посредством файлов формата *.rst. Таким образом, каждый нагрузочный режим в базе данных модели будет представлен своим файлом формата *.rst.

Следующая стадия включает выбор варианта расчета или же, согласно терминологии программного комплекса Design Life, дерева расчета.

Таблица 2 — Сравнение концентраторов напряжений в упрощенной модели и детализированной подмодели для одного и того же шага нагружения

Table 2 — Comparison of stress concentrators in a simplified model and a detailed submodel for the same loading step

Зона	Упрощенная модель	Детализированная подмодель
1		
2		
1		
2		

С этой целью в программном комплексе созданы шаблоны расчетов, позволяющие автоматически сформировать основные расчетные блоки и связи, описывающие требования к обмениваемым между ними данным. В случае классического расчета многоциклового усталости на основе показателей напряжений в качестве нагрузочных характеристик используется стандартный шаблон SN Fatigue.

Одной из важных стадий подготовки модели к расчету долговечности является задание рассматриваемым элементам конструкций характеристик сопротивления усталости. Для моделей, созданных в ANSYS, усталостные свойства присваиваются для групп Named Selection, сгенерированных на стадии подготовки конечно-элементной модели. Каждая такая группа объединяет все фрагменты конструкции с одинаковыми характеристиками усталости.

Необходимые усталостные свойства выбираются и присваиваются из встроенной базы материалов. При этом имеется возможность описать свои параметры для имеющихся типовых моделей материалов. Как уже было указано выше, модели были подготовлены, исходя из рекомендаций норматива BS7608-2014, поэтому для описания свойств свар-

ных соединений конструкций используются данные по кривым усталости этого нормативного документа. Анализируемый фрагмент конструкции содержит следующие классы сварных соединений (классификация норматива BS7608-2014 [2]): Steel Weld BS7608-2014 ClassD, Steel Weld BS7608-2014 ClassE.

Процессы нагружения, полученные по результатам моделирования движения карьерного самосвала для каждого режима нагружения, имеют случайный характер чередования амплитуд. Для возможности оценки повреждающего действия с применением методов суммирования повреждений необходимо выполнить схематизацию случайно изменяющихся показателей нагруженности с целью приведения его к регулярному составу, пригодному для дальнейшей оценки повреждающего действия. Эта задача сводится к расчету эквивалентного по повреждающему действию набора амплитуд с постоянными параметрами асимметрии нагружения. Для схематизации случайных процессов нагружения наиболее распространенным, теоретически и экспериментально обоснованным на сегодняшний день является метод «дождя» [5–7]. Данный метод в используемом шаблоне SN Fatigue используется по умолчанию.

Следующим важным этапом подготовки к расчету усталости является выбор метода суммирования повреждений и задания значений длительности или повторяемости действующих нагрузок в рамках типового режима нагружения. Наиболее универсальным и часто используемым на практике является линейное правило суммирования повреждений Майнера [8]:

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = 1,$$

где N_i — число циклов по кривой усталости, соответствующее амплитуде нагрузки σ_{ai} ; n_i — количество циклов нагружения с амплитудой нагрузки σ_{ai} ; r — общее число циклов нагружения.

Непосредственно правило суммирования повреждений Майнера используется в описываемом расчете. Это правило с учетом представления нагрузочных режимов в виде числа повторений движения карьерного самосвала по типовому участку базовой длины или повторений базовой рабочей операции можно записать в виде:

$$\sum_{j=1}^k \left(l_j \sum_{i=1}^r \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \right) = 1,$$

где k — количество рассматриваемых режимов нагружения; l_j — число повторений движения карьерного самосвала по типовому участку базовой длины или число повторений базовой рабочей операции; n_{ij} — количество циклов нагружения с амплитудой нагрузки σ_{ai} для j -го режима нагружения; N_{ij} — число циклов по кривой усталости, соответствующее амплитуде нагрузки σ_{ai} j -го режима нагружения.

Учет количества рассматриваемых режимов нагружения k и числа повторений движения карьерного самосвала по типовому участку базовой длины или число повторений базовой рабочей операции l осуществляется в настройках решателя StressLife Analysis. Представлению работы машины в виде типового рабочего в используемом шаблоне SN Fatigue соответствует способ описания нагрузки — Duty Cycle. В рабочем поле Edditor View задаются режимы нагружения в виде блоков нагружения с пошаговой историей нагружения с помощью инструмента Time Step Load Provider. Значения чисел повторений базовой рабочей операции l каждого нагрузочного режима указывается в колонке Repeat Count, как это показано на рисунке 11.

Таким образом, в результате расчета для каждой зоны конструкции будет определено количество повторений типового рабочего цикла карьерного самосвала, представленного комплексом выделенных режимов нагружения, до наступления предельного состояния. Зная количество повторений типового рабочего цикла карьерного самосвала до наступления предельного состояния конкретной конструкции и длину пути, соответствующую типовому рабочему циклу, путем перемножения этих

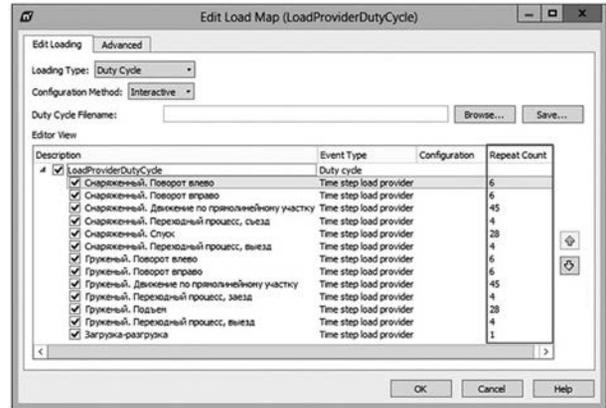


Рисунок 11 — Задание количества режимов нагружения для рассматриваемого типового рабочего цикла самосвала
Figure 11 — Setting the number of loading modes for the considered typical working cycle of the dump truck

значений находится число километров пробега до наступления предельного состояния.

После задания всех исходных данных в автоматическом режиме выполняется расчет количества повторений типового рабочего цикла карьерного самосвала до наступления предельного состояния в каждой рассматриваемой зоне конструкции. Результаты расчета представляются для каждого узла, расположенного на поверхности модели. Узлы с наименьшими значениями повторений типового рабочего цикла соответствуют расположению наиболее опасных по критерию многоциклового усталости зон конструкции.

Пример представления результатов расчета числа повторений типового рабочего цикла для рассматриваемого фрагмента рамы карьерного самосвала приведен на рисунке 12.

По результатам расчета установлено, что число повторений типового рабочего цикла карьерного самосвала до наступления предельного состояния в исследуемых зонах (см. рисунок 12, выноски 1–4) варьируется в пределах от 1665 до 5669. Это соответствует числу километров пробега в рассматриваемых условиях 19883–67700.

Сопоставление расчетных данных с результатами эксплуатации рассматриваемого опытного

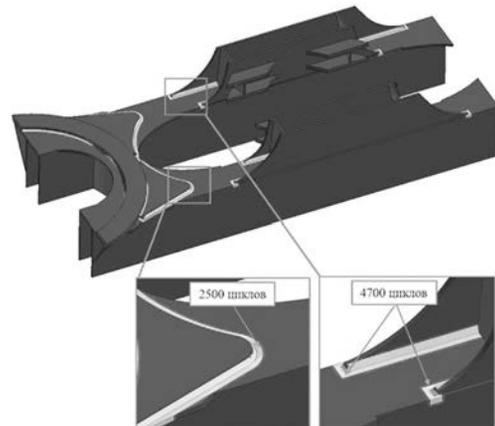


Рисунок 12 — Результаты расчета усталостной долговечности
Figure 12 — Results of fatigue life calculation

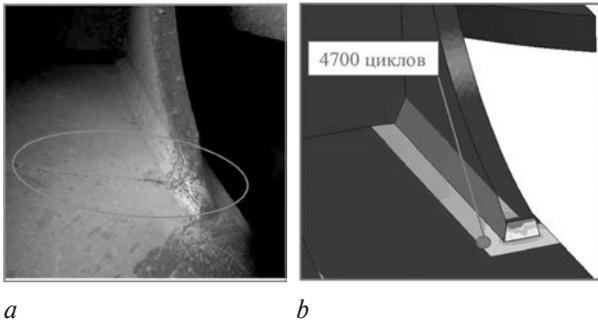


Рисунок 13 — Разрушение сварного соединения кронштейна с рамой:
 а — натурный образец; б — расчетная оценка долговечности
 Figure 13 — Destruction of the welded joint of the bracket with
 the frame: а — full-scale specimen; б — estimated durability

образца карьерного самосвала показывает хорошее соответствие по локализации наиболее опасных по критерию усталости зон конструкции. Для оценки соответствия по числу километров пробега до наступления предельного состояния необходима фактическая информация по условиям эксплуатационного нагружения. На рисунке 13 приведено фото эксплуатационного разрушения у основания кронштейна рамы и результаты расчетной оценки долговечности.

Заключение. Разработанные и приведенные в настоящей работе методические рекомендации позволяют реализовать системный подход к оценке усталостной долговечности несущих конструкций машин на базе комплексного компьютерного моделирования процессов, включая этапы:

- анализа условий эксплуатации и формирования типового режима эксплуатации машины;
- определения динамической нагруженности конструкций для заданных режимов нагружения с учетом особенностей микропрофиля дороги;
- расчета процессов изменения показателей напряженно-деформированного состояния несущих конструкций машины при действии вычисленных динамических нагрузок;
- расчетную оценку усталостной долговечности конструкций с учетом наличия различных характеристик сопротивления у различных деталей и элементов конструкций (вызвано применением различных материалов, технологий обработки, особенностями геометрии элементов конструкций, различными типами сварных соединений, особенностями их нагружения и т. п.).

Приведено краткое описание процесса и результаты практической апробации предлагаемых рекомендаций, выполненные на примере расчетной оценки усталостной долговечности сварных соединений фрагмента рамы карьерного самосвала. В ходе основных вычислений применялись следующие программные средства:

- SpaceClaim — подготовка и редактирование геометрических моделей конструкций;
- ADAMS — моделирование эксплуатационных режимов нагружения и определения нагрузок, действующих на несущие конструкции машины;

- Matlab — статистическая обработка данных, описание и реализация алгоритмов управления движением машины;
- ANSYS — расчет процессов изменения напряженно-деформированного состояния конструкций под действием эксплуатационных нагрузок;
- nCODE Design Life — оценка ресурса конструкций по критерию многоциклового усталости.

Практическая апробация методики, заключающаяся в сопоставлении расчетных данных и с данными разрушения опытного образца конструкции в эксплуатации, показала хорошие результаты по локализации наиболее опасных зон конструкций. Сопоставление фактической наработки не выполнялось ввиду применения упрощенного типового рабочего цикла карьерного самосвала. Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных по ресурсу необходимо наличие достаточного объема статистически обработанных данных по нагрузочным режимам в эксплуатации, что запланировано в продолжение работы по данной тематике.

Таким образом, развитие приведенных выше методических средств компьютерного моделирования процессов нагружения и накопления повреждений позволяет реализовать концепцию применения натуральных испытаний только для подтверждения требуемых свойств конструкций, либо определения величины финальной корректировки. Все основные свойства конструкций и систем машины должны быть заложены на стадии проектирования путем проведения всесторонних и многостадийных вычислений, оптимизационных расчетов и виртуальных испытаний. Кроме того, разработка достоверных цифровых моделей карьерного самосвала и его систем позволяет создать цифровой двойник самосвала. Это позволит минимизировать простой машины в результате возможности оценки остаточного ресурса конструкций в режиме реального времени, обслуживания по фактическому состоянию и оперативному проведению необходимых мероприятий по предупреждению поломок.

Список литературы

1. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость: ГОСТ 25.502-79. — Взамен ГОСТ 23026-78 и ГОСТ 2860-65; введ. 01.01.81. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 25 с.
2. Guide to fatigue design and assessment of steel products: BS 7608:2014+A1:2015: enter 31.03.2014. — The British Standards Institution, 2014. — 152 p. — Mode of access: <https://ru.scribd.com/document/433725049/BS-7608-2014-Guide-to-Fatigue-Design-and-Assessment-of-Steel-Products>.
3. Шмелев, А.В. Совершенствование методов схематизации случайных процессов нагружения и расчета усталостной долговечности несущих конструкций грузовых автомобилей: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / А.В. Шмелев. — Минск, 2010.
4. Скорости автомобиля, соответствующие резонансным колебаниям автомобиля (галлопированию) при переезде единичной неровности / Р.Э. Шейбак [и др.] // Актуаль-

- ные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2017. — Вып. 6. — С. 128–133.
5. Почтенный, Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин / Е.К. Почтенный. — Минск: Наука и техника, 1983. — 246 с.
 6. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на многоцикловую усталость деталей машин, элементов конструкций и полуфабрикатов: методич. указания. — Ч. I. — 2-я ред. — Минск, ИНДМАШ АН БССР, 1980. — 27 с.
 7. Степнов, М.Н. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / М.Н. Степнов. — М.: МАТИ, 2003. — 119 с.
 8. Miner, M.A. Cumulative damage in fatigue / M.A. Miner // J. appl. Mech. — 1945. — Vol. 12, No. 3. — Pp. A159–A164.

SHMIALIOU Aliaksei V., Ph.D. in Eng.

Deputy Director General for Research¹

E-mail: shmeliou.alexsei@gmail.com

LISOUSKI Eduard V.

Head of the Division of Finite Element Analysis¹

E-mail: evlisovski@gmail.com

SHLIAZHKA Siarhei A.

Junior Researcher¹

LITVINIUK Pavel S.

Junior Researcher¹

HACKEVICH Aliaksandr S.

Leading Design Engineer of the Calculation Group²

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

Received 21 October 2019.

CALCULATED ESTIMATION OF FATIGUE LIFE OF BEARING STRUCTURES OF A MINING DUMP TRUCK BASED ON COMPLEX COMPUTER MODELING OF LOADING AND DAMAGE ACCUMULATION PROCESSES

Methodological recommendations are presented for evaluating the fatigue life of machine load-bearing elements under the action of random processes of operational loading based on the integrated application of computer modeling technologies. The basic stages are considered for solving the problems of calculating dynamic loading, stress-strain state indicators, and evaluating the fatigue life of a mining dump truck when the machine is operating under typical operating conditions. Computational studies are implemented using a set of software tools for modeling multi-component ADAMS systems, finite element analysis ANSYS, and calculated fatigue life estimation nCODE Design Life.

Keywords: computer simulation, virtual tests, finite element method, method, bearing systems, mining dump truck, force loading, stress-strain state, lifetime, fatigue life, welded joints, ANSYS, ADAMS, nCODE

References

1. State Standard 25.502-79. *Rascheti i ispytaniya na prochnost v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metody ispytaniy na ustalost* [Calculations and strength tests in mechanical engineering. Methods of mechanical testing of metals. Fatigue test methods]. Moscow, Standartov Publ., 1986. 25 p.
2. BS 7608:2014+A1:2015. *Guide to fatigue design and assessment of steel products*. The British Standards Institution, 2014. 152 p.
3. Shmialiou A.V. *Sovershenstvovanie metodov skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya i rascheta ustalostnoy dolgovechnosti nesushchikh konstruktsiy gruzovykh avtomobiley*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of methods for schematization of random loading processes and calculation of fatigue life of load-bearing structures of trucks. Ph. D. Thesis]. Minsk, 2010.
4. Sheybak R.E., Vygonny A.G., Shmialiou A.V., Kalesnikovich A.N. *Skorosti avtomobilya, soovetstvuyushchie rezonansnym kolebaniyam avtomobilya (galopirovaniyu) pri pereezde edinichnoy nerovnosti* [Vehicle speeds, relevant to resonance oscillations of the vehicle (galloping) individual asperity crossing]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical issues of mechanical engineering], 2017, iss. 6, pp. 128–133.
5. Pochtenny E.K. *Prognozirovanie dolgovechnosti i diagnostika ustalosti detaley mashin* [Durability prediction and fatigue diagnostics of machine parts]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 246 p.
6. Methodical Instructions. Part 1, 2nd Revision. *Rascheti i ispytaniya na prochnost v mashinostroenii. Metody ispytaniy na mnogotsiklovuyu ustalost detaley mashin, elementov konstruktsiy i polufabrikatov* [Calculations and strength tests in mechanical engineering. Test methods for multi-cycle fatigue of machine parts, structural elements and semi-finished products]. Minsk, Institut problem nadezhnosti i dolgovechnosti mashin Akademii nauk BSSR Publ., 1980. 27 p.
7. Stepnov M.N. *Raschetnye metody otsenki kharakteristik soprotivleniya ustalosti materialov i elementov konstruktsiy* [Computational methods for evaluating fatigue resistance characteristics of materials and structural elements]. Moscow, Moskovskiy aviatsionnyy tekhnologicheskii institut Publ., 2003. 119 p.
8. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, vol. 12, no. 3, pp. A159–A164.