

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИКИ И ПРОВЕДЕНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А. Папировский*, С.В. Алексеев, А.В. Тарасов, А.И. Боровков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, 195251,
Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: papirovskiy@compmechlab.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматривается вопрос о моделировании усталостного разрушения материалов, применяемых в машиностроении. Описан процесс получения и получены в лаборатории усталостные характеристики стали 08ПС. Предложена методика проведения виртуальных испытаний на циклическую долговечность для транспортных средств. Проведены виртуальные испытания на циклическую долговечность при помощи метода конечных элементов на примере кузова внедорожного автомобиля.

Ключевые слова: циклическая долговечность, усталостное разрушение, предел выносливости, МКЭ, автомобилестроение

1. Введение

Прогнозирование усталостного разрушения конструкций и механизмов чрезвычайно важная область исследований при проектировании и создании современной техники в части обеспечения наработки необходимого ресурса и эксплуатационной безопасности.

Без исключения все машины и механизмы в процессе эксплуатации подвержены периодическим нагрузкам (автомобили, корабли, самолеты, двигатели, турбины) [1], которые вызывают флюктуирующие механические напряжения много меньшие предела прочности используемых материалов. Эти факторы влекут за собой развитие усталостного разрушения конструкции.

Усталостное разрушение конструкций как техническая проблема возникла еще в первой половине 19 века. Впервые явление усталостного разрушения материалов было описано Вильгельмом Альбертом [2], также разработана и описана первая испытательная машина. Ко второй половине века уже были предприняты первые попытки к качественному описанию концепций возникновения усталостного разрушения. В 1987 году Августом Веллером была сформулирована количественная концепция для описания усталостных разрушений в металлах, связывающая циклы нагрузок с возникающими переменными напряжениями. Было выделено существование предела усталостной прочности в качестве материальной характеристики [3]. Дальнейшее качественное развитие предмета связано с появлением возможности изучения структур на микроуровне, что и было осуществлено в первой половине 20-го века. Также важным событием для изучения усталостного разрушения является

открытие гипотезы о линейной повреждаемости материалов [4], разработанной Арвидом Палмгреном. Все дальнейшие исследования в этой области качественно дополняют и уточняют ранее накопленный вековой опыт.

Мировой истории известно немало случаев техногенных катастроф и чрезвычайных происшествий, причиной которых является развитие усталостного разрушения [5]. Первыми известными случаями являются поломки при эксплуатации железных дорог и строительстве мостов. Усталостное разрушение может возникать также и в конструкциях стратегической важности, например, катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС [6]. Таким образом, возникает объективная необходимость прогнозировать ресурс работы конструкций и механизмов, а также иметь эффективные методы и инструменты для проектирования тех из них, которые отвечают ресурсным требованиям.

Современная индустрия машиностроения претерпевает глобальные изменения в подходе к проектированию транспортных средств. Это обусловлено развитием численных методик и внедрением новых технологических процессов для обеспечения рынка продукцией нового технологического уровня [7]. В настоящей работе описывается процесс получения усталостных характеристик материалов, в лаборатории исследованы усталостные свойства стали 08ПС, а также предложена численная методика с использованием метода конечных элементов, позволяющая изучать циклическую долговечность транспортных средств.

2. Основные методы

Для проведения расчетов на циклическую долговечность необходимо иметь усталостные характеристики используемых материалов. Основной такой характеристикой для металлов является S-N кривая в логарифмических координатах [8]. Кривая отражает отношение между циклами нагрузки и напряжениями. Общий вид S-N кривой для металлов представлен на Рис. 1.

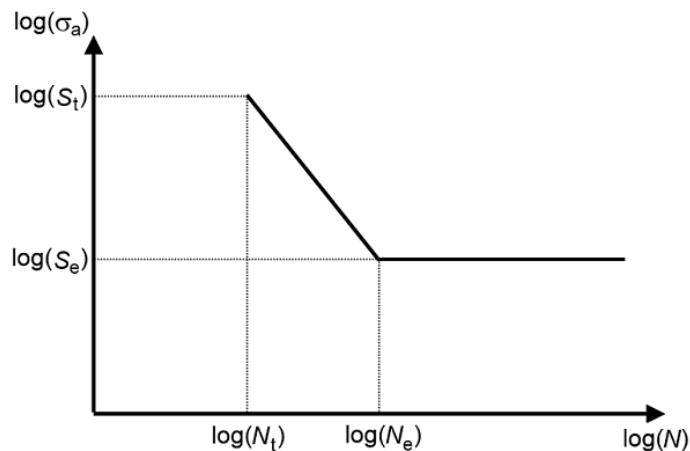


Рис. 1. Вид S-N кривой для металлов

Аналитически S-N кривая описывается следующим выражением:

$$\sigma_{0,N} = C N^{-\alpha}, \quad (1)$$

где $\sigma_{0,N}$ – напряжение при заданном цикле, C и α – коэффициенты, N – номер цикла.

Для получения S-N кривых необходимо провести серию лабораторных тестов на стандартных образцах и определить предел выносливости. Предел выносливости представляет собой наиболее высокое число циклов после достижения, которого образец не разрушается. Лабораторные тесты могут быть проведены на изгиб,

растяжение-сжатие, кручение. Серию испытания проводят при разных фиксированных нагрузках и при заранее определенной асимметрии цикла (Рис. 2).

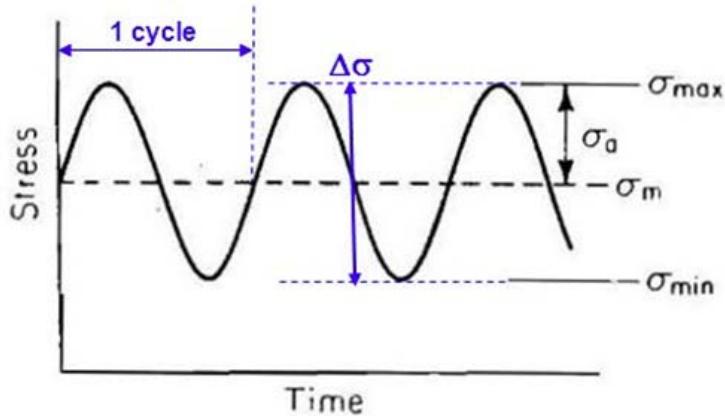


Рис. 2. Вид циклического нагружения с постоянной амплитудой

Элементарная циклографма характеризуется следующими выражениями [9]:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}, \quad (2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad (3)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}. \quad (4)$$

Здесь σ – напряжение, σ_{max} – максимальное напряжение за цикл, σ_{min} – минимальное напряжение за цикл, σ_a – амплитудное напряжение, σ_m – среднее напряжение.

Испытания проводят итерационно уменьшая нагрузку к каждому последующему эксперименту до определения предела выносливости [10]. На Рис. 3 представлены возможные виды асимметрии циклов нагружения. Различают пять классических видов асимметрии [11]: циклы сжатия, циклы сжатия из ненагруженного состояния, циклы растяжения и сжатия, циклы растяжения из ненагруженного состояния, циклы растяжения.

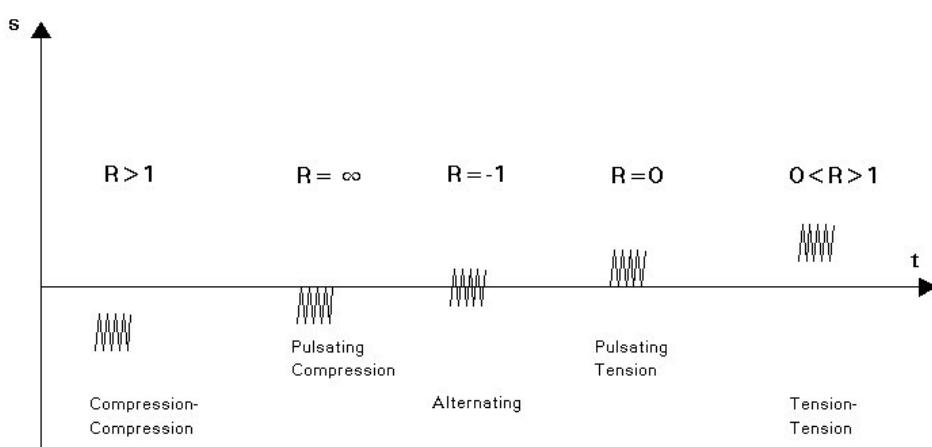


Рис 3. Разновидности асимметрии циклов

Асимметрия цикла R , определяется как отношение максимального напряжения и минимального в цикле и имеет следующий вид:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}. \quad (5)$$

Чаще всего большинство экспериментальных данных получено для циклов растяжения-сжатия $R = -1$. В таком случае средние напряжения $\sigma_m = 0$, что редко выполняется в реальных конструкциях. Существует несколько способов учесть влияние эффекта от среднего напряжения. Получение множества S-N кривых для различных значений R или использование законов, описывающих связь между средними напряжениями и амплитудными напряжениями для различных значений R . Существует достаточно много видов поправок для учета среднего напряжения, из которых можно выделить 3 основных [12]:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1, \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1, \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1. \quad (8)$$

Здесь σ_e – предел выносливости, σ_u – предел прочности на растяжение, σ_y – предел текучести на растяжение. Соотношения (6)-(8) носят названия поправок Гудмана (6), Гербера (7) и Содерберга (8).

Для построения коррекционных кривых на одной из осей откладываются средние напряжения, а на другой – амплитудные. На Рис. 4 проиллюстрированы переходные законы для S-N кривых.

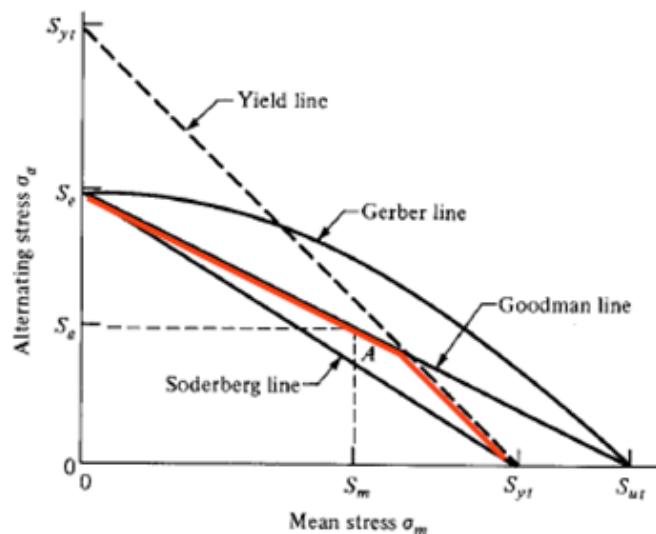


Рис. 4. Законы коррекции асимметрии цикла

В настоящей работе в дальнейшем используется метод Гудмана, ввиду его простоты и консервативности. Для аккумуляции усталостной повреждаемости используется правило Майнера-Палгрэма, представляющее собой гипотезу о линейной повреждаемости [13]:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n(\sigma)_i}{N(\sigma)_i} = D, \quad 1 \leq i \leq k, \quad (9)$$

где D – поврежденность, $n(\sigma)_i$ – циклы прикладываемой нагрузки, $N(\sigma)_i$ – циклы соответствующие пределу выносливости S-N кривой. Разрушение наступает при условии $D \geq 1$.

3. Материалы и лабораторные испытания

В кузове современного автомобиля используется порядка тысячи деталей, изготовленных из металла с применением разного технологического процесса [14]. Для

корректного анализа такой конструкции необходимо обладать всеми необходимыми свойствами материалов. Для выполнения работы были проведены лабораторные тесты используемых материалов, получены физико-механические и усталостные характеристики.

Испытания проводились при помощи испытательной машины Zwick-Roell HFP 100. Лабораторные образцы были выбраны в соответствии с [15]. Схематичный вид и размеры заготовки для усталостных испытаний материала сталь 08ПС представлен на Рис. 5.

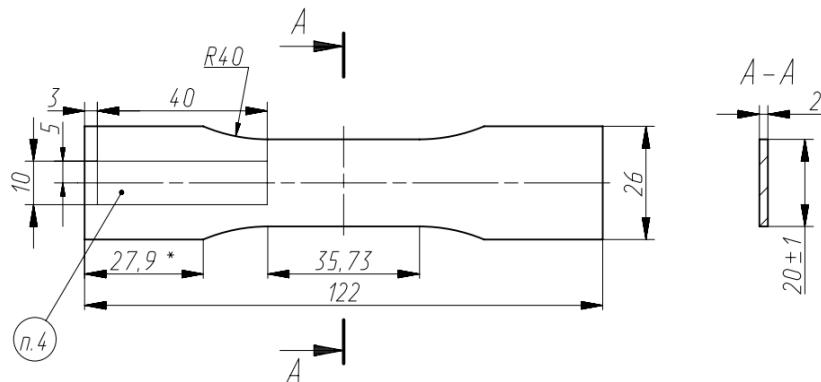


Рис. 5. Схематичный вид заготовки для усталостных лабораторных испытаний

После наработки выборки лабораторных испытаний определены: пределы выносливости материалов и S-N кривые. На Рис. 6 представлена S-N кривая для материала сталь 08ПС [16].

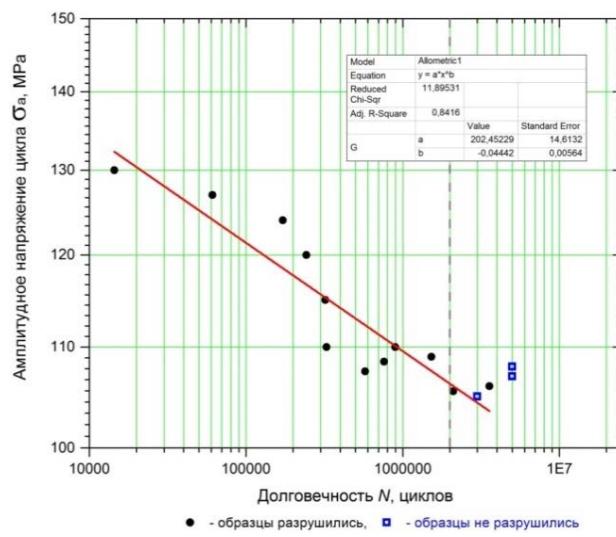


Рис. 6. S-N кривая для материала сталь 08ПС

4. Численный эксперимент

В автомобильной промышленности существует несколько типов натурных испытаний на циклическую долговечность, которые применяют в процессе разработки автомобиля, а также в качестве финальных испытаний перед подготовкой конструкции к серийному производству. Классическим типом испытаний являются испытания на специальном полигоне, на котором готовый автомобиль нарабатывает пробег, выполняя серии типовых маневров и сочетая различные эксплуатационные режимы. Этот вид испытаний является наиболее затратным и трудоемким. Наряду с классическим типом испытаний существуют методики ускоренных стендовых

испытаний, которые проводятся в лабораторных условиях. Стендовые испытания требуют значительно меньше времени, но также требуют изготовления кузова.

Чтобы сократить значительные финансовые затраты [17], а также сократить срок проектирования автомобиля, предлагается заменить натурные испытания виртуальными.

Численный эксперимент проводится при помощи метода конечных элементов (МКЭ) [18] в специализированном программном комплексе MSC Nastran [19]. Функциональная схема предлагаемой концепции разработки кузова автомобиля с учетом циклической долговечности и проведения виртуальных испытаний представлена на Рис. 7.

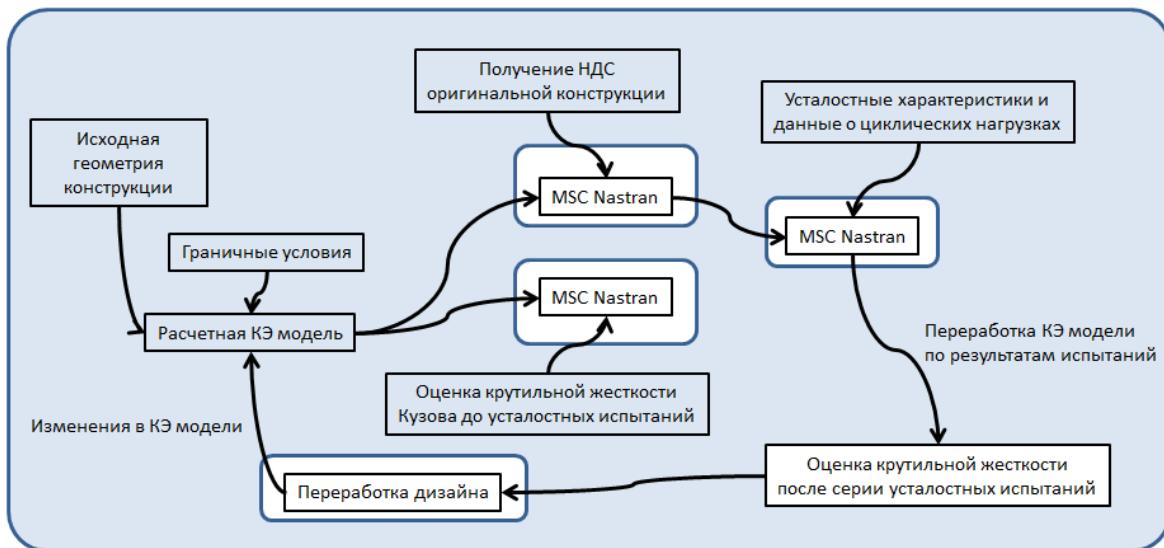


Рис. 7. Функциональная схема предлагаемой концепции разработки кузова автомобиля с учетом виртуальных усталостных испытаний

При разработке кузова автомобиля, существует ряд механических характеристик и требований, которыми должна обладать конструкция кузова. Одной из таких характеристик является крутильная жесткость кузова [20]. При наработке определенного ресурса и вследствие возникающих усталостных разрушений, его крутильная жесткость уменьшается, что делает эксплуатацию автомобиля небезопасной.

Циклические виртуальные испытания представляют собой последовательное выполнение ступеней нагружения с различной величиной прикладываемой нагрузки.

Крутильная жесткость автомобиля характеризуется следующим выражением [21]:

$$C = \frac{M_{ct}}{\varphi}, \quad (10)$$

$$M_{ct} = \frac{R_{ct}B_{n}}{4}, \quad (11)$$

где C – жесткость кузова на кручение, M_{ct} – статический момент для измерения жесткости кузова на кручение, φ – угол закручивания передней оси автомобиля, R_{ct} – статическая нагрузка на переднюю ось автомобиля, B_n – ширина колеи передних колес автомобиля.

Испытания состоят из 4 ступеней нагружения, которые зависят от величины статического момента. Ступени нагружения представлены в Таблице 1.

Таблица 1 Ступени нагружения

Ступень нагружения	Момент M_{ct} , Н·м	Количество циклов нагружения
1	$0.4M_{ct}$	50 000
2	$0.8M_{ct}$	100 000
3	$1.2M_{ct}$	100 000
4	$1.6M_{ct}$	50 000

Схема нагружения и граничные условия для виртуальных испытаний по определению жесткости представлены на Рис. 8.

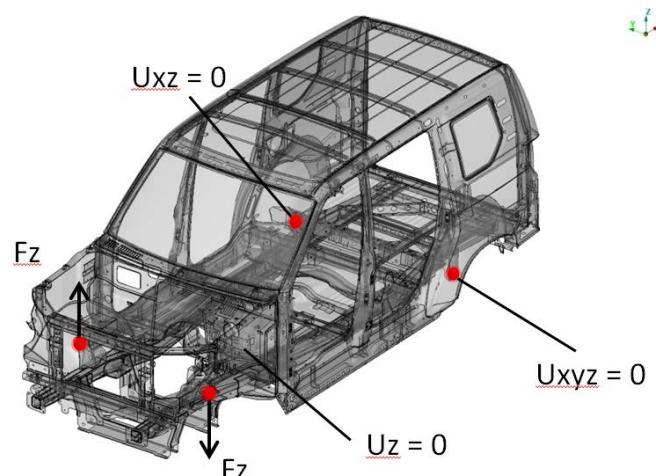


Рис. 8. Схема нагружения и граничные условия для определения крутильной жесткости кузова

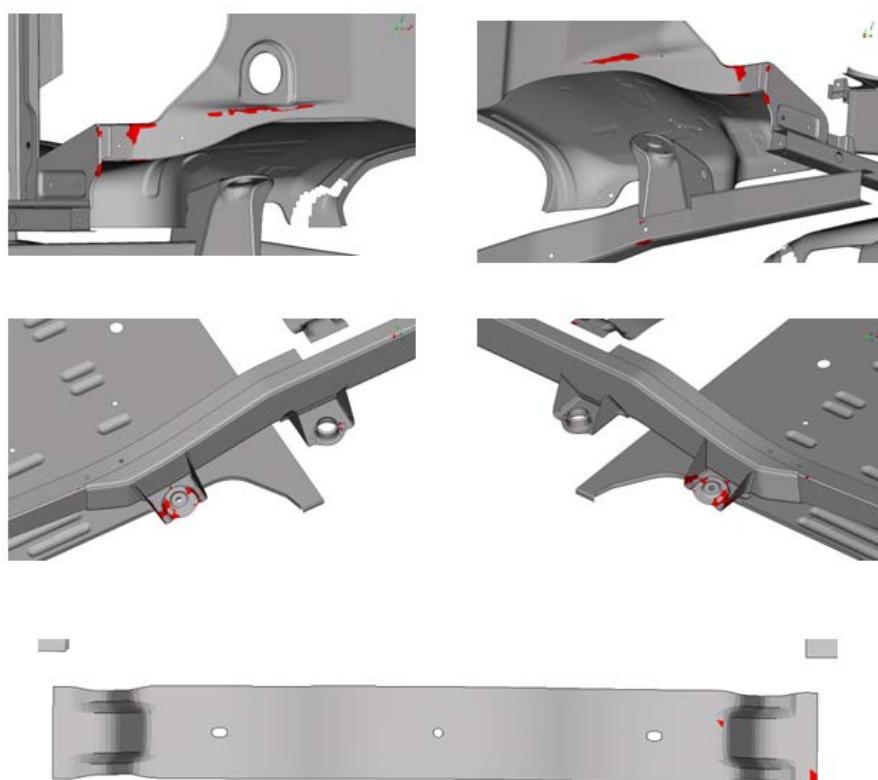


Рис. 9. Детали кузова автомобиля имеющие усталостное разрушение

После определения крутильной жесткости формируется виртуальное испытание на циклическую долговечность. Граничные условия и схема нагружения для циклических испытаний отличаются лишь тем, что прикладываемая нагрузка изменяется и соответствует асимметрии цикла $R = -1$.

В качестве результатов показано поле распределения параметра повреждаемости D (9). Результаты представлены на Рис. 9. Зоны усталостного разрушения согласуются с опытной инженерной оценкой.

После проведения испытаний необходимо переработать исходную конечно-элементную (КЭ) модель для определения крутильной жесткости. В деталях и элементах кузова осуществляется выборка элементов, в которых развилось усталостное разрушение. Такие элементы удаляются, и формируется КЭ модель для нового испытания по определению крутильной жесткости. Необходимо вычислить падение жесткости, которое характеризуется следующим выражением:

$$P = 100 - 100 \frac{C_1}{C_2}, \quad (12)$$

где P – падение крутильной жесткости, C_1 – крутильная жесткость до усталостных испытаний, C_2 - крутильная жесткость после усталостных испытаний.

В инженерной практике для внедорожных автомобилей допускается падение жесткости на 25 %, для легковых автомобилей принято значение 15 %.

В рассматриваемой задаче падение жесткости составило 16 %, что является допустимым для автомобилей внедорожного класса.

5. Заключение

В заключение стоит отметить, что в ходе работы получены усталостные характеристики стали 08ПС и предложена методика проведения виртуальных испытаний на циклическую долговечность при помощи метода конечных элементов. Методика апробирована и может быть успешно применена на практике в процессе разработки транспортных средств.

Литература

- [1] Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*. 2003;25(8): 679–702.
- [2] Schutz W. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 1996;54(2): 263–300.
- [3] Smith RA, Hillmansen S. A brief historical overview of the fatigue of railway axles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2004;218(4): 267–277.
- [4] Eskandari H, Kim HS. A theory for mathematical framework and fatigue damage function for S-N plane. In: Wei Z, Nikbin K, McKeighan PC, Harlow GD. (Eds.) *Fatigue and Fracture Test Planning, Test Data Acquisitions and Analysis*. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017. p.299–336.
- [5] Murray WM. (ed.) *Fatigue and Fracture of Metals*. NY: Wiley; 1952.
- [6] Сашурин АД. Истоки и причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС: возможное развитие ситуации. *Гидротехническое строительство*. 2012;1: 37-43.
- [7] Боровков АИ, Рябов ЮА, Марусева ВМ. *Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения*. Санкт-Петербург; 2017.
- [8] Работнов ЮН. *Сопротивление материалов*. Москва: Физматгиз; 1963.
- [9] Suresh S. *Fatigue of Materials*. Cambridge University Press; 2004.
- [10] Дарков АВ, Шапиро ГС. *Сопротивление материалов*. Москва: Высшая школа; 1975.

- [11] Liu X, Sun C, Hong Y. Effects of stress ratio on high-cycle and very-high-cycle fatigue behavior of a Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Engineering: A.* 2015;622: 228–235.
- [12] Lee Y, Barkey M, Kang HT. *Metal Fatigue Analysis Handbook*. Butterworth-Heinemann; 2012.
- [13] Morgado T. Failure of steel coupling used in railway transport. In: Makhlof ASH, Aliofkhazraei M. (eds.) *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*. Amsterdam: Elsevier; 2016.
- [14] Mallen DE. *Fundamentals of automobile body structure design*. Pennsylvania, USA: SAE International; 2010.
- [15] Межгосударственный стандарт. ГОСТ 25502-79. *Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость*. Москва: Стандартинформ; 2005.
- [16] Сорокин ВГ, Гервасьев МА. *Стали и сплавы. Марочник: справочное издание*. Москва: Интермет Инжиниринг; 2001.
- [17] Alekseev S, Tarasov A, Borovkov A, Aleshin M, Klyavin O. Validation of EuroNCAP frontal impact of frame off-road vehicle: road traffic accident simulation. *Materials Physics and Mechanics*. 2017;34(1): 59–69.
- [18] Зенкевич О. *Метод конечных элементов в технике*. Москва: Мир; 1975.
- [19] MSC Software Corporation. Available from: <https://www.mscsoftware.com> [Accessed 18th November 2019].
- [20] Patrikeev A, Tarasov A, Borovkov A, Aleshin M, Klyavin O. NVH analysis of offroad vehicle frame. Evaluation of mutual influence of body-frame system components. *Materials Physics and Mechanics*. 2017;34(1): 70–75.
- [21] Danielsson O, González Cocaña A. *Influence of body stiffness on vehicle dynamics characteristics in passenger cars. Master's Thesis In Automotive Engineering*. Chalmers University of Technology Goteborg; 2015.

DEVELOPMENT OF NUMERICAL METHODS AND VIRTUAL TESTS FOR CYCLIC DURABILITY BY FINITE ELEMENT METHOD

A. Papirovskiy^{*}, S. Alekseev, A. Tarasov, A. Borovkov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya 29, 195251, St. Petersburg, Russia

*e-mail: papirovskiy@compmechlab.ru

Abstract. This paper deals with the issue of fatigue failure of materials. The process of generation of fatigue properties for the steel 08PS is described and obtained in the laboratory. The technique of conducting virtual tests for cyclic durability for vehicles is proposed. Virtual tests for cyclic durability by using the finite element method on the example of an off-road car body are performed.

Keywords: cyclic durability, fatigue failure, endurance limit, FEM, automotive industry

References

- [1] Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*. 2003;25(8): 679–702.
- [2] Schutz W. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 1996;54(2): 263–300.
- [3] Smith RA, Hillmansen S. A brief historical overview of the fatigue of railway axles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2004;218(4): 267–277.
- [4] Eskandari H, Kim HS. A theory for mathematical framework and fatigue damage function for S-N plane. In: Wei Z, Nikbin K, McKeighan PC, Harlow GD. (eds.) *Fatigue and Fracture Test Planning, Test Data Acquisitions and Analysis*. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017. p.299–336.
- [5] Murray WM. (ed.) *Fatigue and Fracture of Metals*. NY: Wiley; 1952.
- [6] Sashurin AD. Origins and Causes of the Accident at the Sayano-Shushenskaya HPP: Possible Development of the Situation. *Hydraulic Engineering Construction*. 2012;1: 37-43.
- [7] Borovkov A, Ryabov Y, Maruseva V. *The new paradigm of digital design and modeling of globally competitive new generation product*. Saint-Petersburg; 2017. (In Russian).
- [8] Rabotnov US. *Resistance of materials*. Moscow: Fizmatgiz; 1963.
- [9] Suresh S. *Fatigue of Materials*. Cambridge University Press; 2004.
- [10] Darkov AV, Shapiro HS. *Resistance of materials*. Moscow: Higher school; 1975.
- [11] Liu X, Sun C, Hong Y. Effects of stress ratio on high-cycle and very-high-cycle fatigue behavior of a Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;622: 228–235.
- [12] Lee Y, Barkey M, Kang HT. *Metal Fatigue Analysis Handbook*. Butterworth-Heinemann; 2012.
- [13] Morgado T. Failure of steel coupling used in railway transport. In: Makhlof ASH, Aliofkhazraei M. (eds.) *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*. Amsterdam: Elsevier; 2016.
- [14] Mallen DE. *Fundamentals of automobile body structure design*. Pennsylvania, USA: SAE International; 2010.
- [15] GOST 25502-79. *Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing*. Moscow: Standartinform; 2005.

- [16] Sorokin BG, Gervas'ev MA. *Steel and alloys. Marochnik : reference book.* Moscow: Intemet Engineering; 2001.
- [17] Alekseev S, Tarasov A, Borovkov A, Aleshin M, Klyavin O. Validation of EuroNCAP frontal impact of frame off-road vehicle: road traffic accident simulation. *Materials Physics and Mechanics.* 2017;34(1): 59–69.
- [18] Zenkevich O. *Finite element method in the technique.* Moscow: Mir; 1975.
- [19] MSC Software Corporation. Available from: <https://www.mscsoftware.com> [Accessed 18th November 2019].
- [20] Patrikeev A, Tarasov A, Borovkov A, Aleshin M, Klyavin O. NVH analysis of offroad vehicle frame. Evaluation of mutual influence of body-frame system components. *Materials Physics and Mechanics.* 2017;34(1): 70–75.
- [21] Danielsson O, González Cocaña A. *Influence of body stiffness on vehicle dynamics characteristics in passenger cars. Master's Thesis In Automotive Engineering.* Chalmers University of Technology Goteborg; 2015.