



Research Article

Received: July 14, 2025

Accepted: August 29, 2025

Published: October 8, 2025

ISSN 2304-6295

Stress-strain state of the Tribo-Fatigue shaft-insert system under combined loading

Borovkov, Aleksei Ivanovich¹
 Karchevskaia, Anna Stanislavovna^{1*}
 Novokshenov, Aleksei Dmitrievich¹
 Sherbakov, Sergei Sergeevich^{2,3}
 Klimkovich, Nikita Mikhailovich^{2,3}
 Podgayskaya Daria Aleksandrovna^{2,3}

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; borovkov@spbstu.ru (B.A.I.); karchevskaya_as@spbstu.ru (K.A.S.); novoksh_ad@spbstu.ru (N.A.D.)

² Belarusian State University, Minsk, Belarus; sherbakovss@mail.ru (S.S.S.), nikita.klimkovitch@yandex.ru (K.N.M.), dapodgayskaya@gmail.com (P.D.A.)

³ Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

Correspondence:* email karchevskaya_as@spbstu.ru; contact phone +79876094524

Keywords:

Mechanics of deformable solids, tribo-fatigue system, stress-strain state, computational mechanics, finite element modeling, dangerous volume, contact mechanics

Abstract:

The object of research is a tribo-fatigue shaft-insert system, where the insert is made of MONICA structural material. The purpose of this work is to analyze the stress-strain state under different loading scenarios and to evaluate potentially hazardous volumes of the material. **Method.** The stress-strain state of the system is evaluated using finite element modeling techniques. The three-dimensional FE model includes a description of the contact interaction between shaft and insert and realizes four different loading modes: contact load, bending load, and their combinations at different bending force direction. **Results.** As a result of numerical modeling the maximum stresses diverge from the analytical estimates by no more than 11.3%. During the study of the stress-strain state of the system with an insert made of MONICA material, the maximum stresses and their localization were determined, and the “dangerous” volumes were estimated. It was found that the direction of the bending force significantly affects the stress distribution and the size of dangerous zones: their relative volume can reach several percent of the part volume. The obtained dependences can be used to predict the durability of tribo-fatigue systems.

1 Introduction

Современное машиностроение не перестает активно развиваться, что неизменно ведет к росту эксплуатационных нагрузок, а значит повышает и требования к долговечности и надежности оборудования. Ключевыми факторами в этом случае становятся сопротивление усталости и износу. В условиях высоких нагрузок вопросы оптимизации конструкций и материалов выходят на передний план.

В связи с этим, трибология находится в фазе активного развития, что выражается не только в постоянном расширении областей исследований, таких как износ, инженерия поверхностей, контактная усталость, но и в совершенствовании методов их анализа. Только за 2020-2021 гг. [1] значительное число работ посвящено изучению механизмов износа, моделированию трибологических систем, включая компьютерное моделирование, и созданию новых материалов с повышенной износостойкостью.

Karchevskaia, A.; Borovkov, A.; Novokshenov, A.; Sherbakov, S.; Klimkovich, N.

Stress-strain state of the Tribo-Fatigue shaft-insert system under combined loading;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 118 Article No 11803. doi: 10.4123/CUBS.118.3

Пара «колесо/рельс» является одним из наиболее интересных для трибологии объектов исследования. Есть множество исследований демонстрирующих, что сложность взаимодействия факторов нагружения и геометрии контактирующих тел, может значительно влиять на износ системы характер ее повреждений. Анализ формы контактной поверхности как фактора, определяющего долговечность соединений, проведен в [2], что дополнительно указывает на многообразие сценариев деградации в трибологических парах. В работах [3,4] внимание уделяется локальным видам повреждений, включая фреттинг-износ и контактную усталость, возникающим при различных сценариях нагружения. Режимы повреждений также зависят от геометрии контакта [5–7] и свойств материалов [8,9].

Разработка новых материалов, металлических сплавов, а также различные методы обработки поверхностей для систем, подверженных высоким нагрузкам, — еще одно перспективное направление в решении современных проблем трибологии, что подтверждается большим количеством исследований по рельсовым сталям и высокопрочным чугунам (ADI/CADI) [10–16]. Показано, что варьирование химического состава, режимов термообработки и локальных методов упрочнения позволяет существенно менять механизмы износа и сопротивление контактной усталости. Новые сплавы и чугуны исследуются не только в рамках традиционных экспериментальных испытаний, но и в численных постановках, где конечно-элементное моделирование позволяет воспроизводить контактные процессы и учитывать сложные сценарии нагружения [17–19].

В современной науке, численное моделирование имеет широкое распространение, как инструмент для прогнозирования износа и долговечности элементов, поскольку оно даёт возможность комплексно оценивать напряжённо-деформированное состояние и выявлять зоны зарождения повреждений в условиях трения и переменных нагрузок. В ряде работ показаны примеры численного моделирования контактного взаимодействия элементов и оценкой долговечности. Так, в [20–22] использованы конечно-элементные модели для изучения распределения контактных напряжений и оценки износа зубчатых передач, подшипников и других узлов, что демонстрирует применимость метода для анализа контактных систем. В частности, в [23] предложена модель, позволяющая связать распределение подповерхностных напряжений в скользящих контактах с реальным сроком службы деталей; показано, что именно глубинные максимумы напряжений определяют полезную долговечность и закономерности износа. А в работе [24] трение скольжения для высокоэнтропийного сплава $\text{CoCrFeNiMo}_{0.2}$ изучалось в широком диапазоне нагрузок и скоростей: численные расчёты позволили оценить чувствительность материала к изменению режимов нагружения и спрогнозировать переход от мягкого к жёсткому механизму износа.

Отдельное направление связано с переходом от традиционного анализа трибологических и усталостных процессов к комплексным подходам. В работе [25] отмечается необходимость интеграции трибологии и механики усталости в единую концепцию трибофатических исследований, что особенно важно для систем, работающих в условиях трения при циклических нагрузках. Также в исследовании вводится понятие *опасного объема*: в задачах трибофатики опасным объемом называется область деформации, где одновременно действуют контактные и вне-контактные нагрузки.

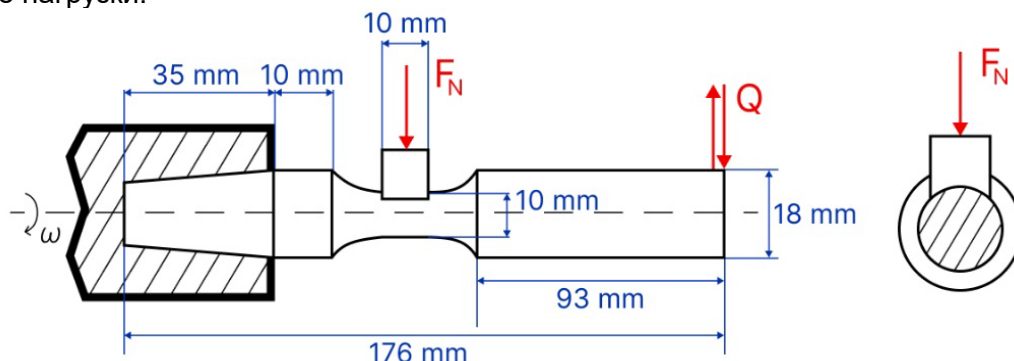


Fig. 1 – Basic scheme of a Tribo-Fatigue shaft-insert system for mechano-sliding fatigue testing

Данное исследование посвящено системе «вкладыш/вал» (Fig. 1), которая является примером простейшей трибофатической системы, предназначенной для испытаний на фрикционно-механическую усталость. То есть механической системы, воспринимающей и

транзитно передающей рабочую циклическую нагрузку и в которой одновременно реализуется процесс трения в любом его проявлении [26,27].

Исследуется система, где вал выполнен из конструкционной стали, а вкладыш выполнен из нового материала — чугуна МОНИКА, названного по имени его легирующих добавок (Mo, Ni, Cu). В работах [28–30] глубоко исследуются свойства материала — детально проанализированы механические свойства, включая предел прочности, относительное удлинение, вязкость разрушения и усталостной стойкости в сопоставлении с традиционными сталями и высокопрочными чугунными сплавами. Было показано, что данный материал демонстрирует заметно более высокую долговечность по сравнению с традиционными высокопрочными чугунами и отличается меньшей склонностью к хрупким усталостным разрушениям. Экспериментальные исследования выявили закономерности накопления повреждений, подтвердив более пластичный характер износа и меньшую интенсивность усталостного растрескивания. Более того, в отличие от большинства конструкционных материалов, при увеличении прочности он не теряет пластичности. Даже наоборот, при увеличении прочности, пластичность материала МОНИКА только растет.

Цель настоящей работы заключается в численном анализе напряженно-деформированного состояния системы «вал–вкладыш» из материала МОНИКА при различных режимах нагружения (контактное, изгибное и комбинированное), с определением локализации максимальных напряжений и оценкой объемов потенциального повреждения.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка и верификация трехмерной конечно-элементной модели системы «вал–вкладыш»;
- выполнение виртуальных испытаний для четырех сценариев нагружения;
- анализ распределения напряжений и выявление зон максимальных значений;
- определение опасных объемов для каждого расчетного случая.

2 Materials and Methods

2.1 Analytical approach

Для начальной аналитической оценки напряженно деформированного состояния системы «вкладыш-вал» использована классическая теория изгиба балок, основанная на гипотезе плоских сечений. Предполагается, что сечения, перпендикулярные оси балки, при деформации остаются плоскими и не изменяют своей формы. В этом случае нормальные напряжения в любом сечении определяются зависимостью:

$$\sigma(y) = \frac{My}{I}, \quad (1)$$

где M — изгибающий момент, y — расстояние от нейтральной оси, I — осевой момент инерции сечения.

Максимальные нормальные напряжения $\sigma_{\max}$ возникают на максимальном расстоянии $y_{\max}$ от нейтральной оси (в крайней точке сечения) и определяются по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W}, \quad (2)$$

$$W = \frac{I}{y_{\max}}, \quad (3)$$

где W — момент сопротивления сечения. Для круглого сечения:

$$W = \frac{\pi D^3}{32}, \quad (4)$$

где D — диаметр вала.

На основе этих зависимостей построены эпюры изгибающих моментов и нормальных напряжений для всех случаев нагружения (Fig. 2).

Karchevskaia, A.; Borovkov, A.; Novokshenov, A.; Sherbakov, S.; Klimkovich, N.

Stress-strain state of the Tribo-Fatigue shaft-insert system under combined loading;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 118 Article No 11803. doi: 10.4123/CUBS.118.3

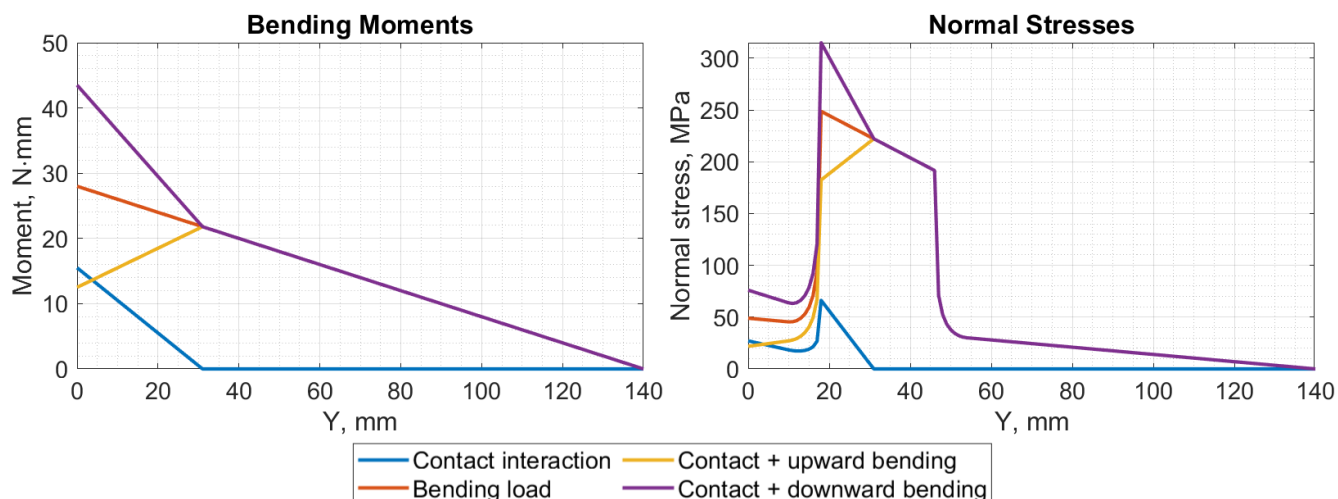


Fig. 2 – Bending moment and normal stress diagrams for all loading cases: (1) contact interaction; (2) bending load; (3) combined contact and upward bending; (4) combined contact and downward bending

Из полученных графиков видно, что максимальные напряжения для задач контактного взаимодействия, изгибного нагружения, а также их комбинации, где изгибная сила направлена вниз, максимальные напряжения возникают в сечении между областью контактного взаимодействия и зоной закрепления вала и равны 66,2 МПа, 248,7 МПа, 314,9 МПа соответственно. В случае приложения комбинации сил, когда изгибная сила направлена вверх, максимальное напряжение равно 222,2 МПа и возникает в центре контактной площадки.

2.2 Materials

Для аналитических расчетов и при сопоставлении с аналитическими решениями как вал, так и вкладыш принимались выполненными из стали. Однако, в основной части работы по анализу системы «вал–вкладыш» принималось, что вкладыш изготовлен из материала МОНИКА. Характеристики каждого материала приведены в (Table 1).

Table 1. Material characteristics

Материал	ν , 1	E , ГПа	$\sigma_{int}^{(*lim)}$, МПа
Сталь	0,3	200	68
МОНИКА	0,28	168	96,7

Где ν — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга, $\sigma_{int}^{(*lim)}$ — предельная интенсивность напряжений для определения опасных объемов.

2.3 Finite element modeling of insert-shaft system

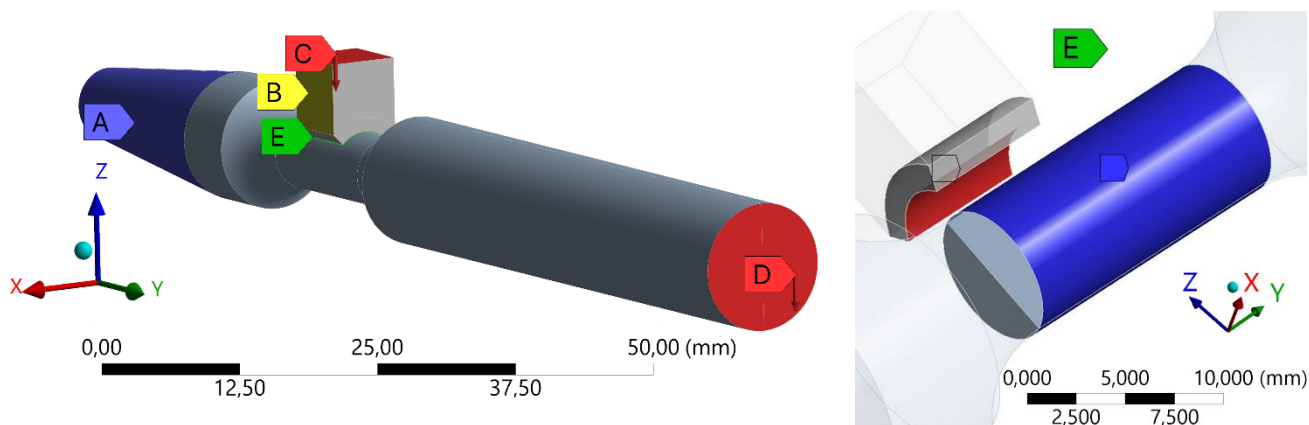


Fig. 3 – Insert-shaft system geometry, geometric conditions and contact surface geometry

Karchevskaia, A.; Borovkov, A.; Novokshenov, A.; Sherbakov, S.; Klimovich, N.

Stress-strain state of the Tribo-Fatigue shaft-insert system under combined loading;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 118 Article No 11803. doi: 10.4123/CUBS.118.3

Модель включала в себя объемные элементы и учитывала контактное взаимодействие между валом и вкладышем. Обе части системы моделировались в полном объеме без упрощений. Для построения конечно-элементной сетки применялись объемные гексаэдральные элементы первого порядка. Жесткая фиксация (A) наложена на коническую часть вала по всем степеням свободы. Контактная нагрузка (B) в виде нормальной силы $|F_n| = 500$ Н приложена к верхней поверхности вкладыша. Изгибающая сила (C) $|Q| = 200$ Н действует на свободный конец вала. Для боковых поверхностей вкладыша заданы ограничения нормальных перемещений (D), а также задано контактное взаимодействие между деталями (E). На (Fig. 3) изображены все граничные условия. Коэффициент трения принят равным $\mu=0,3$. Комбинации граничных условий для каждого расчетного случая показаны в (Table 2).

Table 2. Combination of boundary conditions for each loading case

Вид нагружения	Граничные условия
Контактное взаимодействие	$A + B + D + E$
Изгибное нагружение	$A + C + D + E$
Одновременные нагрузки контактного взаимодействия и изгибного нагружения вниз (вверх)	$A + B + C + D + E$

3 Results and Discussion

Графики нормальных напряжений конечно-элементной модели (Fig. 4) соответствуют аналитическому решению. Для задач контактного взаимодействия, изгибного нагружения и одновременного условия контактного взаимодействия и изгибного нагружения вниз пики нормальных напряжений в КЭ модели расположены аналогично аналитическому решению и равны 68,3 МПа, 276,7 МПа и 343,2 МПа соответственно.

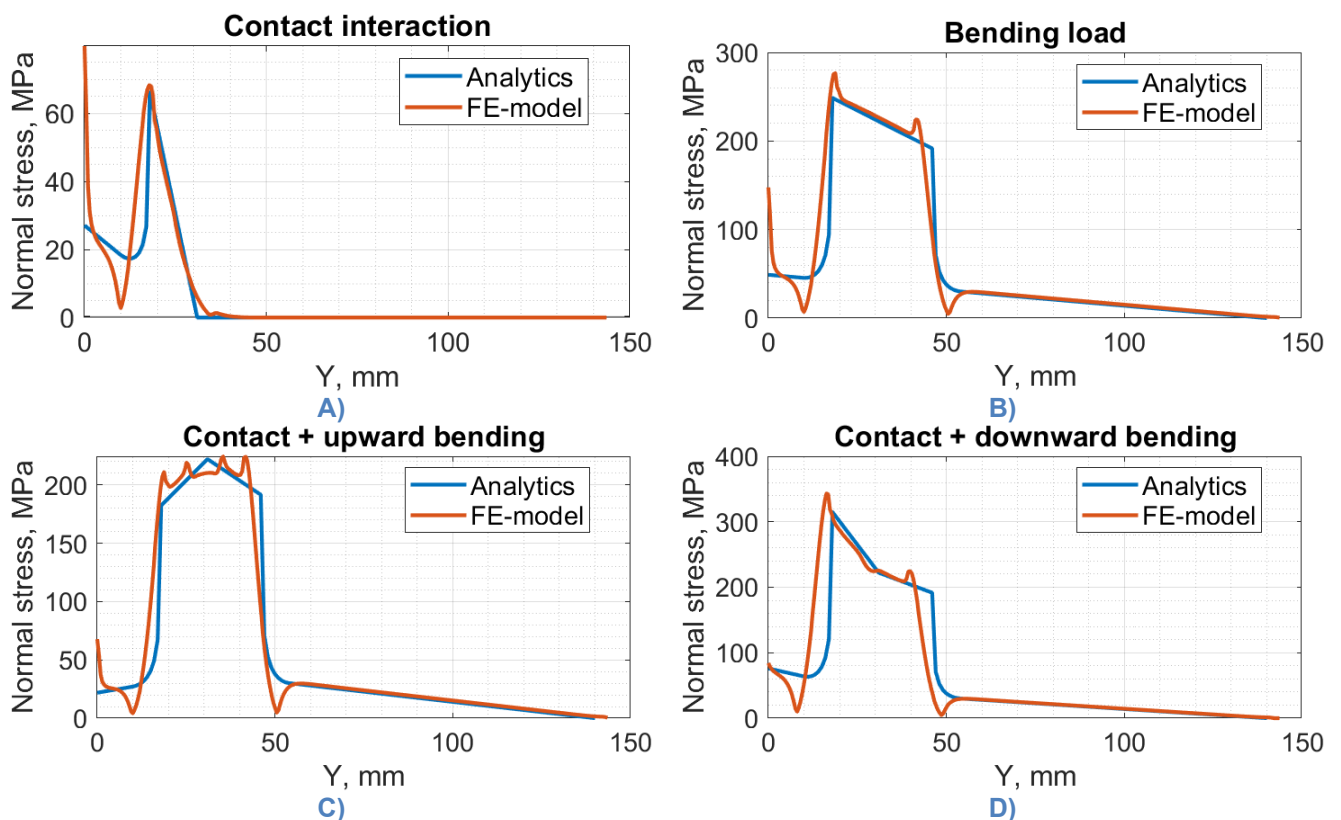


Fig. 4 – Comparison of normal stresses along the shaft axis in the FE model and in the analytical solution for the problem of A) contact interaction; B) bending loading; C, D) Simultaneous contact interaction and bending loading upward, downward

Для задачи одновременного контактного взаимодействия и изгибного нагружения вверх наибольшее значение напряжений смещено относительно аналитического максимума вправо и равно 224,6 МПа. Таким образом, решение конечно-элементной модели отличается от аналитического на 3,2%, 11,3%, 9,0% и 1,1% соответственно для каждой задачи.

После верификации стальной модели далее расчеты проводились с материалом МОНИКА. Для полноты исследования опасных объемов были увеличены нагрузки на систему: в задачах исследовались комбинации контактной нагрузки на вкладыш $|F_n| = 1000$ Н и изгибающей силы $|Q| = 200$ Н.

Ключевым результатом данной работы стало определение распределения напряжений и их максимумов в системе «вал–вкладыш» при различных сценариях нагружения, при условии, что вкладыш выполнен из материала МОНИКА. Полученные результаты виртуальных испытаний для различных случаев нагружения системы вал/вкладыш, где вкладыш изготовлен из конструкционного материала МОНИКА, представлены на рисунках (Fig. 5 – Fig. 8).

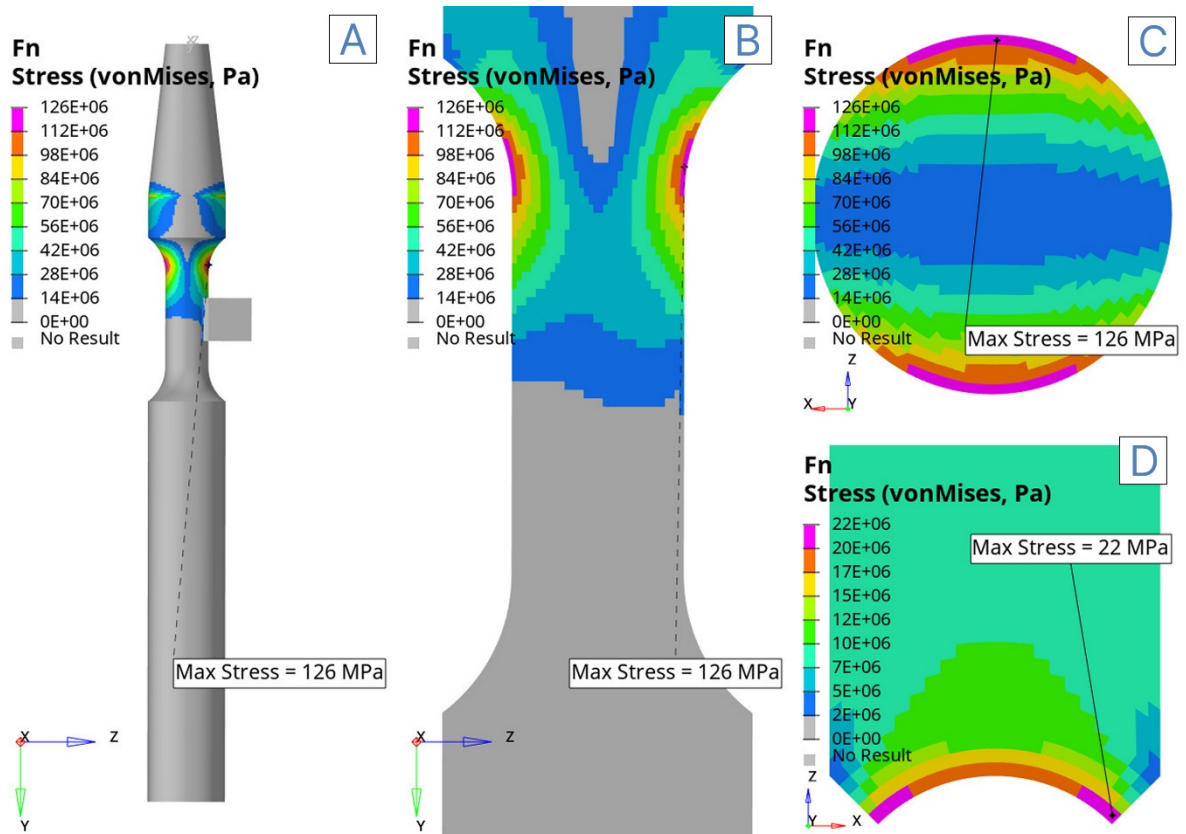


Fig. 5 — Von Mises stress intensity in the insert-shaft system (MONICA) in case of contact interaction: A) in the whole system; B) in the longitudinal section of the shaft; C) in the cross-section of the shaft at the point of maximum stress, D) in the cross-section of the insert at the point of maximum stress

Результаты моделирования показывают, что характер распределения напряжений в системе «вал–вкладыш» существенно зависит от сценария нагружения. При действии только нормальной силы (Fig. 5) максимальные напряжения достигают 126 МПа и локализуются в зоне контакта на поверхности вала. При чистом изгибе (Fig. 6) напряжения достигают 292 МПа, концентрируясь в переходной области сечения вала. Совместное действие контактной и изгибающей нагрузки (Fig. 7 и Fig. 8) приводит к формированию более высоких значений: при изгибе вверх максимальное напряжение составило 376 МПа, а при изгибе вниз — 268 МПа, при этом критические области также приходятся на контактную поверхность вала и зоны сопряжений. Таким образом, наибольший уровень напряжений возникает при действии сонаправленных контактной нагрузки и изгибающей силы, тогда как совместное нагружение в противоположных направлениях нагрузок приводит к перераспределению напряжений и снижению их пиковых значений по сравнению с чистым изгибом.

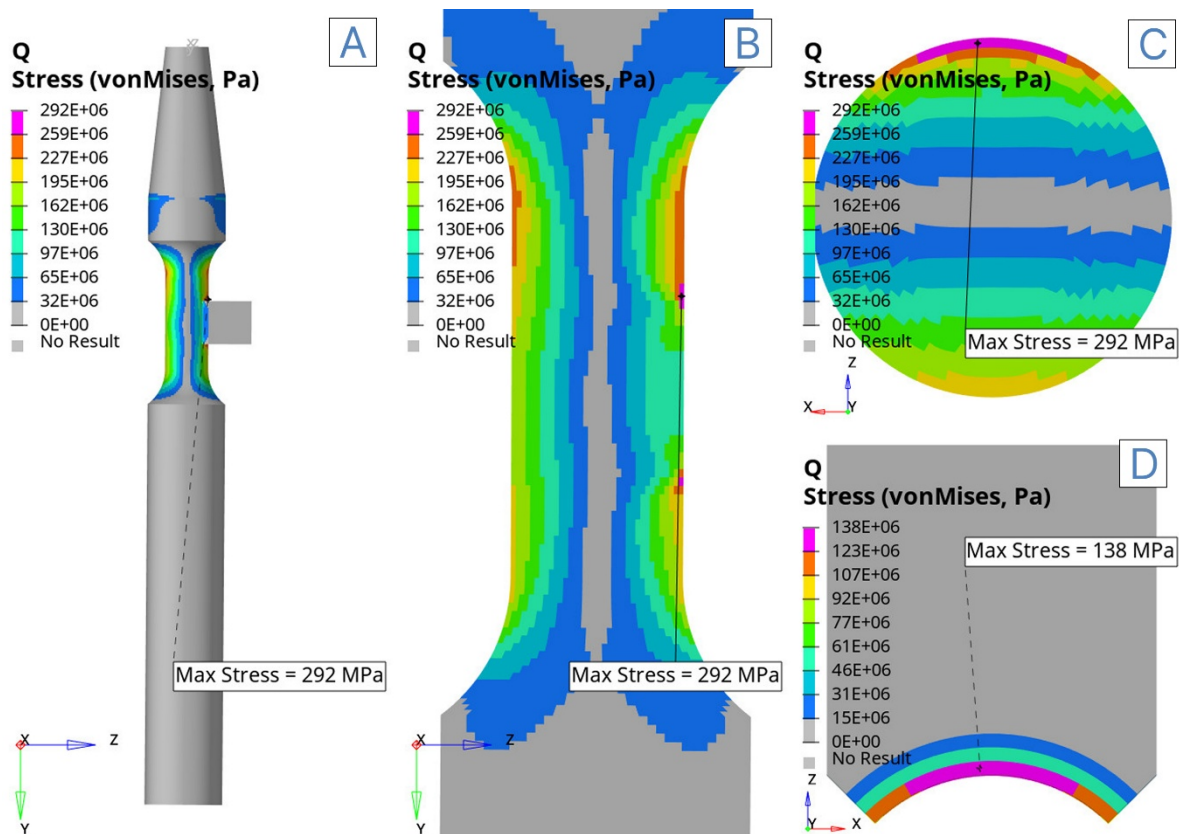


Fig. 6 — Von Mises stress intensity in the insert-shaft system (MONICA) in case of bending loading: A) in the whole system; B) in the longitudinal section of the shaft; C) in the cross-section of the shaft at the point of maximum stress, D) in the cross-section of the insert at the point of maximum stress

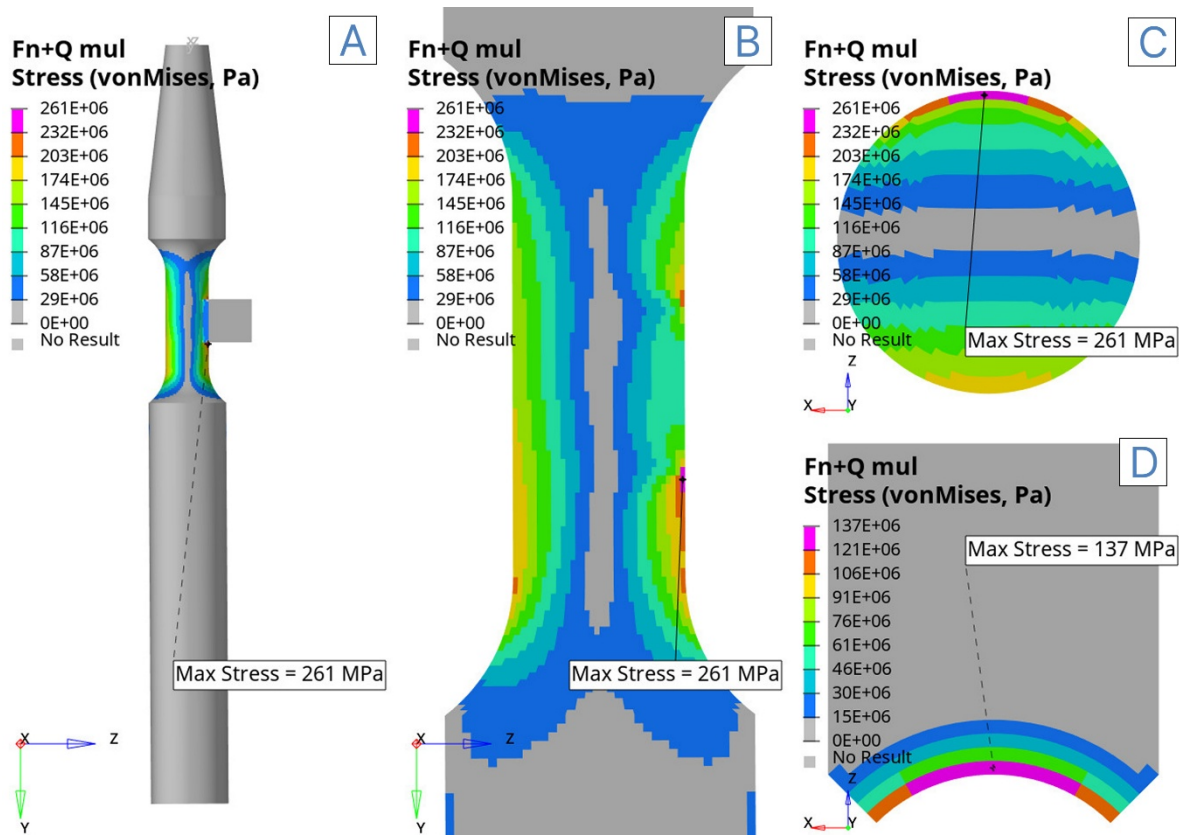


Fig. 7 — Von Mises stress intensity in the insert/shaft system under simultaneous contact interaction and upward bending load: A) in the whole system; B) in the longitudinal section of the shaft; C) in the transverse section of the shaft at the point of maximum stress; D) in the transverse section of the insert at the point of maximum stress.

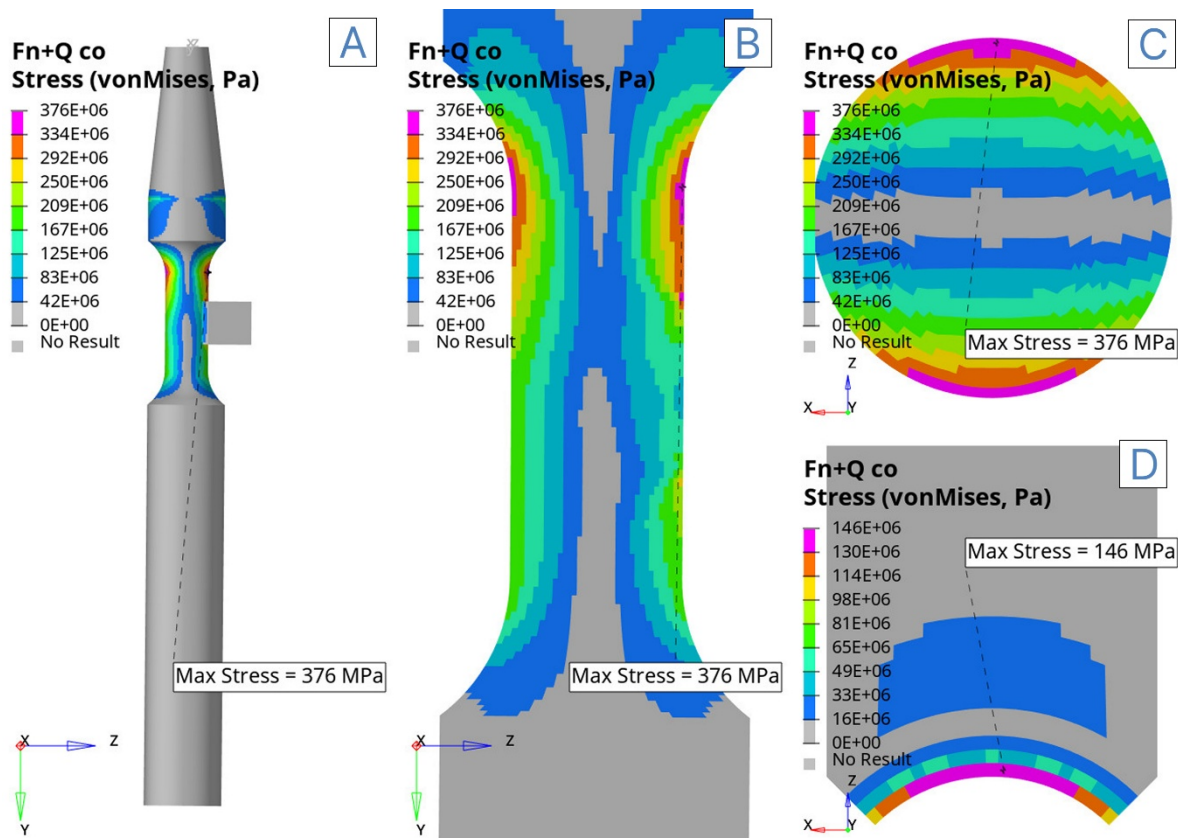


Fig. 8 — Von Mises stress intensity in the insert/shaft system under simultaneous contact interaction and downward bending load: A) in the whole system; B) in the longitudinal section of the shaft; C) in the transverse section of the shaft at the point of maximum stress; D) in the transverse section of the insert at the point of maximum stress.

В опасных объемах происходит накопление параметра повреждаемости материала, что при большом числе циклов нагружения приводит к его разрушению. Для рассматриваемой в рамках данной работы системы предельные интенсивности напряжений, по отсечению которых определяются опасные объемы, равны 96,7 МПа и 83,3 МПа для вкладыша и вала соответственно. На рисунках (Fig. 9) и (Fig. 10) представлены опасные объемы, полученные для каждого расчетного случая, возникающих в вале и вкладыше соответственно.

Для выбранных величин нагрузок ($F_n = 1000$ Н, $Q = \pm 200$ Н) опасные объемы возникают как в вале, так и во вкладыше. При изолированном контактом взаимодействии величина опасного объема составляет 0,2% от общего объема вала или 75 мм³. При наличии только изгибной нагрузки величина опасного объема составляет 3,4% от общего объема вала или 1216 мм³. Для задач с условием одновременного нагружения величина опасных объёмов в вале различается в зависимости от направления изгибной нагрузки. В частности, при изгибе вниз опасный объём составляет 5,6% от общего объёма системы (или 1976 мм³), тогда как при изгибе вверх это значение уменьшается до 2,8% (990 мм³).

Во вкладыше опасные объемы возникают во всех случаях, кроме задачи только контактного нагружения. Возникающие опасные объемы составляют 1,1%, 1,8% и 0,9% (12 мм³, 19 мм³ и 9 мм³) для остальных задач соответственно. Увеличение опасного объёма в случае контактного взаимодействия и изгиба вниз, относительно случая с одним только изгибным нагружением объясняется действием силы F_n , провоцирующей контактное взаимодействие и возникновение дополнительных напряжений, что приводит к большему накоплению повреждений.

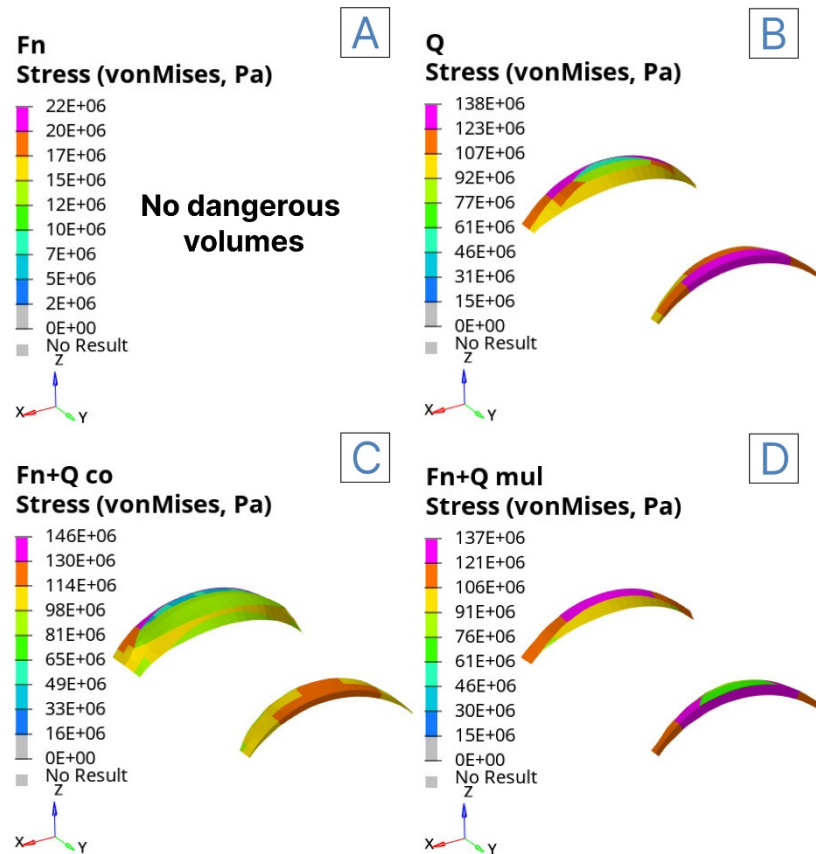


Fig. 9 — Dangerous volumes in insert for case A) contact interaction; B) bending load; C, D) Simultaneous contact interaction and bending load upwards, downwards

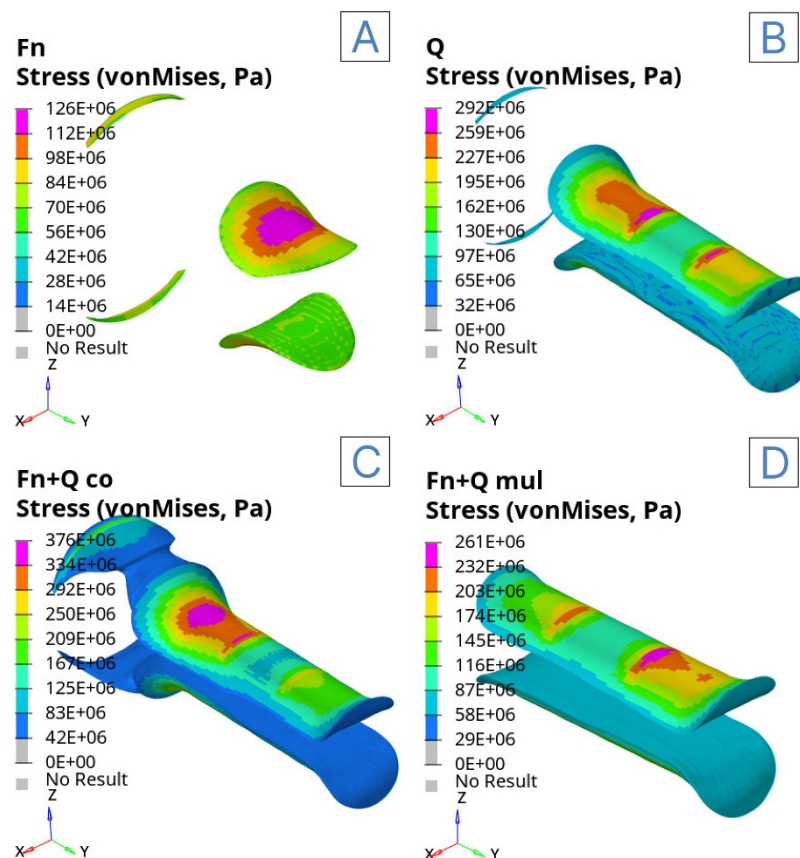


Fig. 10 — Dangerous volumes in the shaft for case A) contact interaction; B) bending load; C, D) Simultaneous contact interaction and bending load upwards, downwards

4 Conclusions

Таким образом, в данной работе разработана и верифицирована трёхмерная конечно-элементная модель трибофатической системы «вал–вкладыш», которая описывает напряженно-деформированное состояние при различных вариантах внешнего нагружения: контактное взаимодействие, изгибное нагружение, комбинированные сонаправленные и комбинированные противоположенные нагрузки. Верификация расчетных данных показала расхождение с аналитическим решением на 3,2%, 11,3%, 9,0% и 1,1% соответственно для каждой задачи, что является подтверждением достаточной точности модели.

В результате проведенного численного анализа системы вал/вкладыш, где вкладыш изготовлен из материала МОНИКА, были получены значения напряжений, возникающих в рассматриваемой системе, а также исследованы величины опасных объемов для каждого расчетного случая. Показано, что направление изгибной составляющей играет решающую роль как в величине, так и в распределении напряжений. Если изгибающая сила действует в том же направлении, что и контактная нагрузка, то максимальные значения сосредоточены на одной стороне контактной поверхности; изменение направления изгиба влияет на максимумы напряжений, что, в свою очередь, влияет на размер и форму потенциально опасных областей. Относительный объем таких зон при определенных сочетаниях усилий может достигать нескольких процентов материала детали, что значительно выше, чем в случаях раздельного нагружения.

Разработанная конечно-элементная модель позволяет установить зависимости для прогнозирования эксплуатационных характеристик системы «вкладыш-вал» с целью дальнейшей интеграции с прогностическими моделями на основе искусственного интеллекта. Такой подход открывает практический потенциал для оптимизации геометрии и несущей способности узлов трения, работающих в сложных условиях нагружения.

5 Acknowledgements

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 23-РБ-09-27 от 15.12.2023, а также при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T24СПБГ-003).

References

- 1 Meng, Y., Xu, J., Ma, L., Jin, Z., Prakash, B., Ma, T. and Wang, W. (2022, October 1) A Review of Advances in Tribology in 2020–2021. Friction, Tsinghua University, 1443–1595. <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>.
- 2 Liu, X. and Wang, P. (2021) Investigation of the Generation Mechanism of Rail Corrugation Based on Friction Induced Torsional Vibration. *Wear*, Elsevier Ltd, **468–469**. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203593>.
- 3 Hu, Y., Guo, L.C., Maiorino, M., Liu, J.P., Ding, H.H., Lewis, R., Meli, E., Rindi, A., Liu, Q.Y. and Wang, W.J. (2020) Comparison of Wear and Rolling Contact Fatigue Behaviours of Bainitic and Pearlitic Rails under Various Rolling-Sliding Conditions. *Wear*, Elsevier Ltd, **460–461**. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203455>.
- 4 Espinosa, H.D., Patanella, A. and Fischer, M. (2000) A Novel Dynamic Friction Experiment Using a Modified Kolsky Bar Apparatus. *Experimental Mechanics*, Sage Sci Press, **40**, 138–153. <https://doi.org/10.1007/BF02325039>.
- 5 Ciavarella, M., Papangelo, A. and Barber, J.R. (2020) Effect of Wear on the Evolution of Contact Pressure at a Bimaterial Sliding Interface. *Tribology Letters*, Springer, **68**. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-1269-1>.
- 6 Zhang, T., McHugh, P.E. and Leen, S.B. (2011) Computational Study on the Effect of Contact Geometry on Fretting Behaviour. *Wear*, **271**, 1462–1480. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.017>.
- 7 Lorenz, S.J., Sadeghi, F., Trivedi, H.K., Kirsch, M.S. and Wang, C. (2021) Effects of Grain Refinement on Rolling Contact Fatigue in Bearing Contacts. *Journal of Tribology*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), **143**. <https://doi.org/10.1115/1.4052279>.



- 8 Tournay, H., Shu, X., Keylin, A. and Cakdi, S. (2022) Investigation of Wheel and Rail Rolling Contact Fatigue Using a Full-Scale Simulator (DOT/FRA/ORD-22/13). Washington, D.C. <https://railroads.dot.gov/elibrary/investigation-wheel-and-rail-rolling-contact-fatigue-using-full-scale-simulator>.
- 9 Bogdanovich, A., Yelovoy, O., Sosnovskiy, L., Komissarov, V. and Tyurin, S. (2015) Local Damages during Rolling and Mechano-Rolling Fatigue for the Mechanical System Shaft - Roller (0.45 Carbon Steel - 25XGT Steel, 20XH3A Steel - 20XH3A Steel). *Acta Mechanica et Automatica*, Bialystok University of Technology, **9**, 259–264. <https://doi.org/10.1515/ama-2015-0041>.
- 10 Wang, B., Barber, G.C., Qiu, F., Zou, Q. and Yang, H. (2020) A Review: Phase Transformation and Wear Mechanisms of Single-Step and Dual-Step Austempered Ductile Irons. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier Editora Ltda, **9**, 1054–1069. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.074>.
- 11 Nan, R., Fu, H., Yang, P., Lin, J. and Guo, X. (2020) Microstructure Evolution and Wear Resistance of Cu-Bearing Carbide Austempered Ductile Iron after Austempering. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Springer, **29**, 2440–2459. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04788-9>.
- 12 Zammit, A., Abela, S., Betts, J.C., Michalczewski, R., Kalbarczyk, M. and Grech, M. (2019) Scuffing and Rolling Contact Fatigue Resistance of Discrete Laser Spot Hardened Austempered Ductile Iron. *Wear*, Elsevier Ltd, **422–423**, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.061>.
- 13 Zhang, H., Wu, Y., Li, Q. and Hong, X. (2018) Mechanical Properties and Rolling-Sliding Wear Performance of Dual Phase Austempered Ductile Iron as Potential Metro Wheel Material. *Wear*, Elsevier Ltd, **406–407**, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.04.005>.
- 14 Panneerselvam, S., Putatunda, S.K., Gundlach, R. and Boileau, J. (2017) Influence of Inter-critical Austempering on the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI). *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier Ltd, **694**, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.096>.
- 15 Zhang, S.Y., Spiragin, M., Ding, H.H., Wu, Q., Guo, J., Liu, Q.Y. and Wang, W.J. (2022) Rail Rolling Contact Fatigue Formation and Evolution with Surface Defects. *International Journal of Fatigue*, Elsevier Ltd, **158**. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106762>.
- 16 Wu, Y.H., Yang, H.J., Guo, R.P., Wang, X.J., Shi, X.H., Liaw, P.K. and Qiao, J.W. (2020) Tribological Behavior of Boronized Al_{0.1}CoCrFeNi High-Entropy Alloys under Dry and Lubricated Conditions. *Wear*, Elsevier Ltd, **460–461**. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203452>.
- 17 Abdullah, M.U., Khan, Z.A., Kruhoeffer, W. and Blass, T. (2020) A 3D Finite Element Model of Rolling Contact Fatigue for Evolved Material Response and Residual Stress Estimation. *Tribology Letters*, Springer, **68**. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01359-w>.
- 18 Bendikiene, R., Ciuplys, A., Cesnavicius, R., Jutas, A., Bahdanovich, A., Marmysh, D., Nasan, A., Shemet, L. and Sherbakov, S. (2021) Influence of Austempering Temperatures on the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron. *Metals*, MDPI AG, **11**. <https://doi.org/10.3390/met11060967>.
- 19 Borgström, H. (2021, April 1) Influence of Strain Rate, Temperature and Chemical Composition on High Silicon Ductile Iron. *Minerals*, MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/min11040391>.
- 20 Zhang, B., Liu, H., Zhu, C. and Ge, Y. (2021) Simulation of the Fatigue-Wear Coupling Mechanism of an Aviation Gear. *Friction*, Tsinghua University, **9**, 1616–1634. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0447-3>.
- 21 Sun, S., Li, L., Yue, Z., Yang, W., He, K. and Li, S. (2020) Fretting Fatigue Failure Behavior of Nickel-Based Single Crystal Superalloy Dovetail Specimen in Contact with Powder Metallurgy Pads at High Temperature. *Tribology International*, Elsevier Ltd, **142**. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105986>.
- 22 Zhou, C., Xing, M., Hu, B. and Shi, Z. (2020) A Modified Wear Model Considering Contact Temperature for Spur Gears in Mixed Elastohydrodynamic Lubrication. *Tribology Letters*, Springer, **68**. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01350-5>.
- 23 Fereidouni, H., Akbarzadeh, S. and Khonsari, M.M. (2020) The Relation Between Subsurface Stresses and Useful Wear Life in Sliding Contacts. *Tribology Letters*, Springer, **68**. <https://doi.org/10.1007/s11249-019-1246-8>.
- 24 Deng, G., Tieu, A.K., Lan, X., Su, L., Wang, L., Zhu, Q. and Zhu, H. (2020) Effects of Normal Load and Velocity on the Dry Sliding Tribological Behaviour of CoCrFeNiMo_{0.2} High Entropy Alloy. *Tribology International*, Elsevier Ltd, **144**. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106116>.



- 25 Bogdanovich, A. V., Sosnovskiy, L.A., Sherbakov, S.S. and Khonsari, M.M. (2021) From Fatigue and Tribology to Tribo-Fatigue. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, Inderscience Publishers, **14**, 164. <https://doi.org/10.1504/ijmsi.2021.10050854>.
- 26 Sosnovskiy, L.A. (2005) TRIBO-FATIGUE Wear-Fatigue Damage and Its Prediction Foundations of Engineering Mechanics. R.S. Sosnovskaya, Ed., 1st ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-27027-0>.
- 27 Sosnovskiy, L.A., Bogdanovich, A. V., Yelovoy, O.M., Tyurin, S.A., Komissarov, V. V. and Sherbakov, S.S. (2014) Methods and Main Results of Tribo-Fatigue Tests. *International Journal of Fatigue*, Elsevier Ltd, **66**, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.04.006>.
- 28 Bendikiene, R., Bahdanovich, A., Cesnavicius, R., Ciuplys, A., Grigas, V., Jutas, A., Marmysh, D., Nasan, A., Shemet, L., Sherbakov, S. and Sosnovskiy, L. (2020) Tribo-Fatigue Behavior of Austempered Ductile Iron Monica as New Structural Material for Rail-Wheel System. *Medziagotyra, Kauno Technologijos Universitetas*, **26**, 432–437. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.26.4.25384>.
- 29 Bahdanovich, A., Sherbakov, S., Lis, I., Bendikiene, R., Cesnavicius, R. and Grigas, V. (2021) Some Regularities of Life Time and Damage for the New Structural Material Monica during Sliding Friction and Mechano-Sliding Fatigue. *Solid State Phenomena*, Trans Tech Publications Ltd, 90–96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.320.90>.
- 30 Sosnovskiy, L.A. and Sherbakov, S.S. (2023) New Cast Iron Monica Loses Its Brittleness with Increasing Strength. *Int. J. Materials and Structural Integrity*, **15**, 24–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1504/IJMSI.2023.135888>.