

18. B. Maxfield, Essential Mathcad for Engineering, Science, and Math, (Elsevier Science, 2009), pp. 325–371.

D.I. Gladckih, E.V. Fominov, V.A. Lebedev, V.E. Gvindjiliya, A.A. Marchenko  
Don State Technical University,  
Rostov-on-Don, Russia, ya@dgladckih.ru

## **EVALUATION OF TRIBOLOGICAL PARAMETERS OF TURNING PROCESS 10GN2NMFA HEAT-RESISTANT STEEL**

### **Annotation**

This study is devoted to the evaluation of machined surface roughness and average cutting temperature during finishing longitudinal turning of workpieces made of heat-resistant high-alloy steel 10GN2NMFA without the use of cooling with T15K6 carbide plates. It was experimentally established that the dependence of the average temperature on the machining speed in the investigated range of cutting modes has an extreme character for each value of feed, and the values of the average roughness Ra during machining with sharpened tools were in the range of Ra 0.8-1.25 microns, which corresponds to the 7th class of roughness. In the course of evolutionary transformations in the cutting system, the smallest change in surface microrelief for each feed value was recorded at speeds characterized by minimum cutting temperatures. The average roughness by the end of the period of durability of inserts in all cases was within Ra 1.8-2.5 microns. Thus, at dry finishing of workpieces from heat-resistant steel 10GN2NMFA with surface roughness of 6 class the full resource of inserts up to critical wear can be used, for surfaces of 7 class of roughness the time of operation of inserts is reduced to 40-60% of the durability period. In this case, a turning surface of a given quality can be obtained without the use of additional finishing passes and operations.

*Keywords:* heat-resistant steel, longitudinal turning, cutting temperature, surface roughness

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-269

А.Ю. Рябикин, А.Д. Шестаков, Л.Д. Туптей, М.А. Скотникова, А.Д. Новокшенов  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия. ryabikin-98@mail.ru

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

### **Аннотация**

Проведены сравнительные триботехнические испытания износостойких равнотвердых сталей мартенситного класса Hardox 450, Quard 450 по сравнению с феррито-перлитной сталью 09Г2С. Износостойкость  $\varepsilon$  возростала в направлении 1,0 → 7,9 → 18,1 в сталях 09Г2С → Hardox 450 → Quard 450, соответственно. Построены графики колебаний моментов трения исследованных сталей во времени, проведено их сглаживание (усреднение) методом Ханна. Проведено преобразование

Фурье и рассчитаны амплитудно-частотные характеристики моментов трения. Показано, что уменьшение амплитуды синусоиды первой (главной) гармоники происходило в направлении  $3,40 \rightarrow 2,15 \rightarrow 1,40$  в сталях 09Г2С  $\rightarrow$  Hardox 450  $\rightarrow$  Quard 450, соответственно. В тех же сталях вторая гармоника формировалась с амплитудами синусоид в направлении  $1,50 \rightarrow 1,60 \rightarrow (0,85 \text{ и } 0,70)$ . Как оказалось, после испытания образцов из стали Quard 450, на поверхности которых были обнаружены следы мартенситного превращения, амплитудно-частотная характеристика обнаружила спектры двух возбуждающих сил (абразивного изнашивания и структурно-фазового (мартенситного) превращения), упрочняющего поверхность в контактной зоне и повышающего её износостойкость.

*Ключевые слова:* момент трения, сталь, фазовое превращение, окно Ханна, преобразование Фурье.

### **Введение**

Физическим моделированием фрикционной механической системы (ФМС) называют трибологические исследования физически подобных процессов на стандартных машинах трения, сохраняющих физическую природу явлений, но воспроизводящих их в меньших геометрических размерах. При физическом моделировании выявляется связь между выходными характеристиками трибосистемы, например моментом и коэффициентом трения, и какой-либо обобщенной величиной трибосопряжения, например, износом и износостойкостью.

Возбуждающие силы в ФМС во времени, имеют непрерывные периодические характеристики воздействия, например, частоты оборотов коленчатых валов или роторов двигателей, колебания от дисбаланса вращающихся колес. Всегда имеется спектр случайных вибраций, описание которых простыми непрерывными функциями затруднительно. Наиболее удобным для современных методов расчета является задание амплитудно-частотной характеристики спектра возбуждающих сил [1].

Повышение износостойкости металлов и сплавов является одной из основных задач современного материаловедения и машиностроения. Разрушение поверхности при трении и изнашивании выводит из строя большое количество машин и конструкций, поэтому крайне важно анализировать взаимодействия поверхностей материалов во время этих процессов, а также работать над расширением методов этого анализа. Многочисленные исследования показывают, что в зоне контактного взаимодействия происходит множество процессов: трение, износ, адгезия, деформация, разрушение. На эти процессы влияют различные характеристики материалов и условия трения: физико-механические, химические, тепловые свойства, контактные напряжения, смазочный материал, геометрия резания и т.д. Обработка и выявление взаимосвязей и зависимостей между столь большим количеством параметров невозможна без использования современного автоматизированного оборудования, а также инновационных методов анализа больших массивов данных [2-8].

Поэтому целью данной работы являлось разработка физической модели фрикционной механической системы для выявления связи между моментом трения и износостойкостью пар трения по схеме «Стальной ролик – Абразивный ролик» с помощью компьютерной программы машинного обучения на языке Python.

## Методы и материалы

В качестве исходных данных для анализа были выбраны результаты триботехнических испытаний 3-х сталей: двух равнотвердых износостойких сталей мартенситного класса Hardox 450, Quard 450 и феррито-перлитной стали 09Г2С. В таблице 1 представлен химический состав исследуемых сталей.

Таблица 1 – Химический состав исследованных сталей

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Mo	B
<b>Hardox 450</b>	0.102	0.175	<b>0.655</b>	0.01	0.004	<b>0.921</b>	<b>0.056</b>	<b>0.036</b>	<0,001
<b>Quard 450</b>	0.086	0.248	<b>1.15</b>	0.02	0.004	<b>0.083</b>	<b>0.026</b>	<b>0.004</b>	<0,001
<b>09Г2С</b>	0.099	0.518	1.31	0.021	0.008	0.075	0.003	0.017	<0,001

Триботехнические испытания проводились на стандартной Машине трения СМЦ-2 (Рис. 1, а) в течении 2,5 часов на образцах в виде «роликов» (Рис. 2, а) по схеме «Стальной ролик – Абразивный ролик» (Рис. 2, б), в соответствии с методикой МНОЦ «BaltTribo-Polytechnic» СПбПУ. Верхний абразивный ролик под нагрузкой 45 Н был неподвижен, нижний ролик из исследованных сталей вращался с частотой 500 об/мин.

Измерение микротвёрдости листового металла по методу Виккерса проводили на автоматическом твердомере FUTURE-TECH (Япония), (Рис. 1, б), в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76 при нагрузке 50 г.

В качестве программного обеспечения для анализа данных использовалась авторская программа на языке Python, а также набор библиотек.

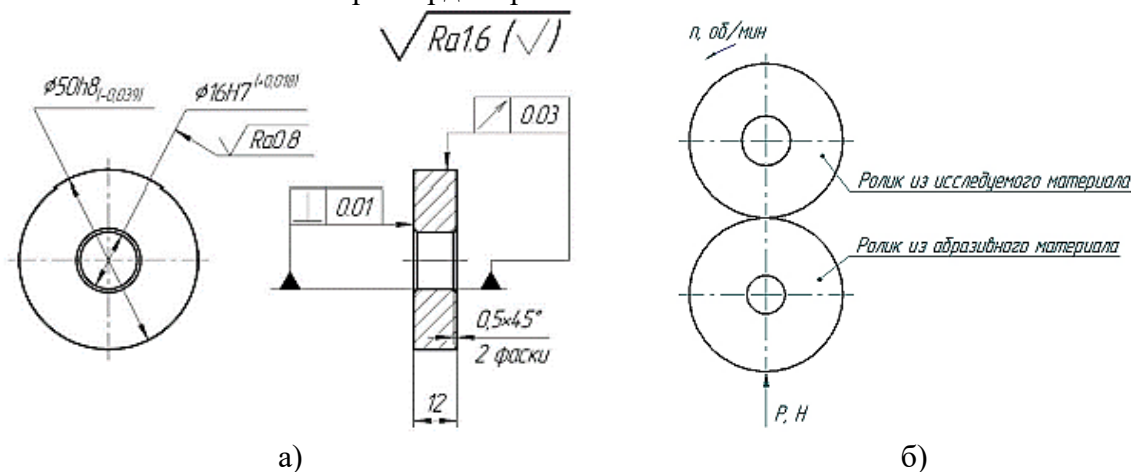


а)



б)

Рисунок 1 – Оборудование для испытания: а) машина трения СМЦ-2; б) автоматический микротвердомер FUTURE-TECH FM-300



а)

б)

Рисунок 2 – Образцы для проведения испытаний: а) чертеж; б) схема «стальной ролик – абразивный ролик»

## Результаты и обсуждение

В ходе проведенных исследований оценивали твердость, момент (Мтр) и коэффициент трения, весовой износ, относительную износостойкость ( $\epsilon$ ), рассчитываемую как отношение величины износа базовой стали 09Г2С к величине износа исследуемой износостойкой стали. Металлографические исследования площадок трения стальных роликов до и после испытаний позволили установить их единый механизм разрушения поверхности – абразивное изнашивание. Однако, на поверхности испытанных образцов из стали Quard 450, дополнительно, были обнаружены следы мартенситного превращения (Табл. 2).

Таблица 2 – Химический состав исследованных сталей

Марка стали	Твердость МПа	Износ мЛГ	Износостойкость, $\epsilon$	Момент трения кгс·см	Коэф. трения	Микроструктура	
						До испытания	После испытания
09Г2С	174	6,84	1,0	4,95201	0,44		
Quard 450	436	0,38	18,1	6,47114	0,58		
Hardox 450	434	0,87	7,9	7,78653	0,69		

Для выявления связи между моментом трения Мтр (выходной характеристикой трибосистемы) и износостойкостью  $\epsilon$  (обобщенной величиной трибосопряжения), для исследованных сталей 09Г2С, Quard 450 и Hardox 450 были построены нормированные графики моментов трения после испытания в интервале времени от 1 часа до 1 часа и 50 минут (Рис. 3), на участке установившегося процесса трения и изнашивания.

Как видно из этих графиков, износостойкие стали мартенситного класса Quard 450 и Hardox 450 имели более равномерный по амплитуде момент трения по сравнению с феррито-перлитной сталью 09Г2С, амплитуда значений момента которого значительно изменялась во времени. При этом в процессе трения стали Quard 450 (Рис. 3, б) во всем временном интервале наблюдались две стабильные амплитудные моды изменения момента трения.

Чтобы более отчетливо выделить эти изменения, в авторской программе было проведено усреднение (сглаживание) результатов испытаний для исключения лишних (случайных) колебаний, вызванных дополнительными внешними вибрациями (Рис. 4).

Сглаживание было произведено по методу Ханна, с шириной «окна сглаживания» 16 точек. Далее были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики колебаний момента трения (Рис. 5).

Преобразование Фурье — это функция, описывающая амплитуду и фазу каждой синусоиды, соответствующей определённой частоте и позволяющая разложить исходный сигнал на гармонические составляющие для отделения шумов [9-15].

Как видно из Рис. 5, уменьшение амплитуды синусоиды первой (главной)

гармоники происходило в направлении  $3,40 \rightarrow 2,15 \rightarrow 1,40$  в сталях  $09Г2С \rightarrow \text{Hardox 450} \rightarrow \text{Quard 450}$ , соответственно. В тех же сталях вторая гармоника формировалась с амплитудами синусоид в направлении  $1,50 \rightarrow 1,60 \rightarrow (0,85 \text{ и } 0,70)$ . Как оказалось, после испытания образцов из стали Quard 450, на поверхности которых были обнаружены следы мартенситного превращения (Табл. 2), амплитудно-частотная характеристика обнаружила спектры двух возбуждающих сил (абразивного изнашивания и мартенситного превращения).

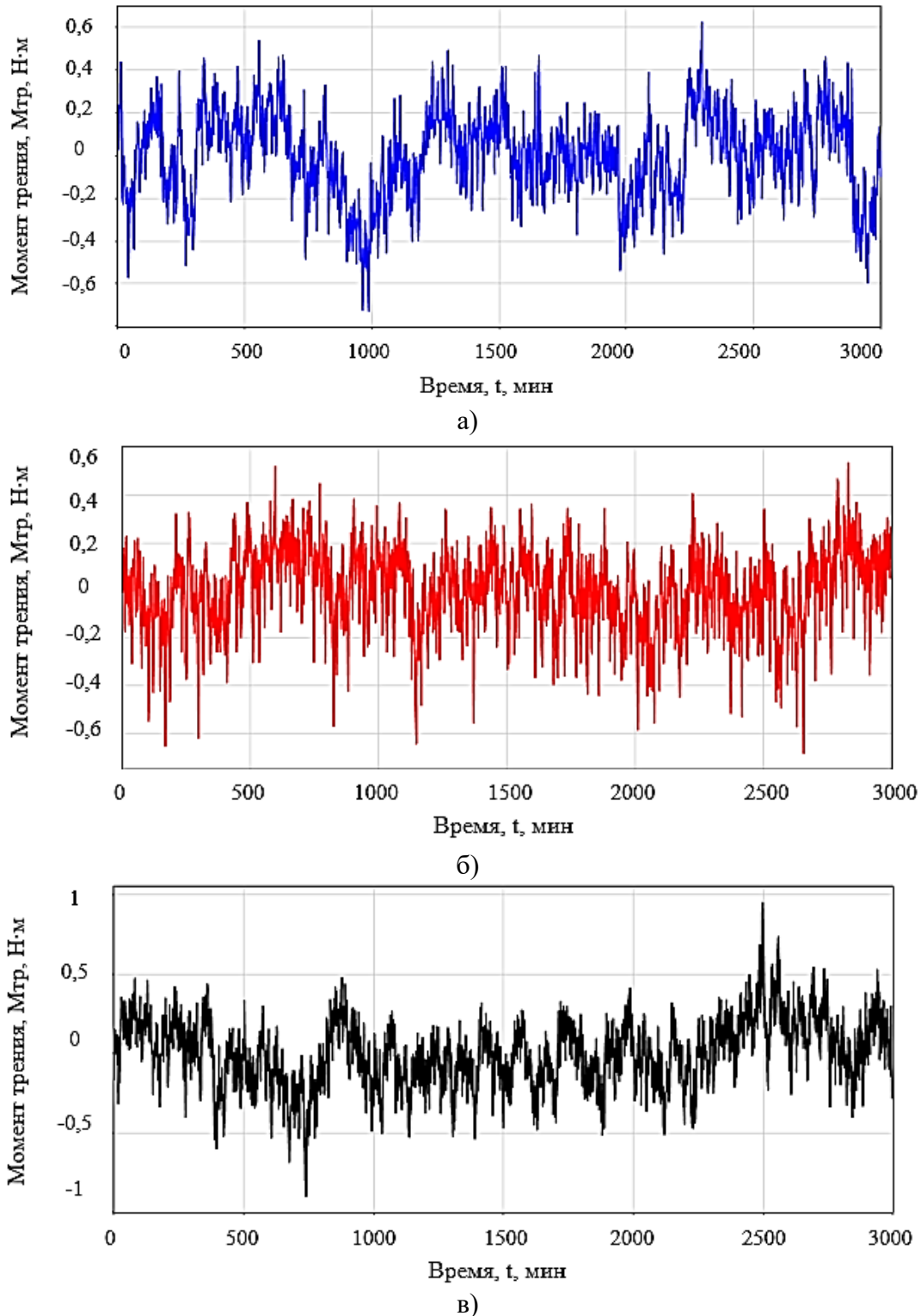
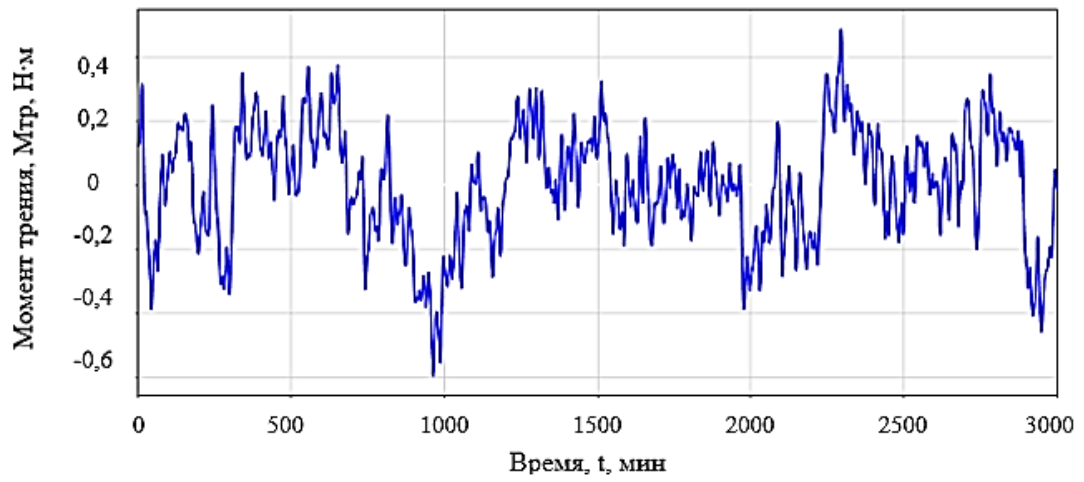
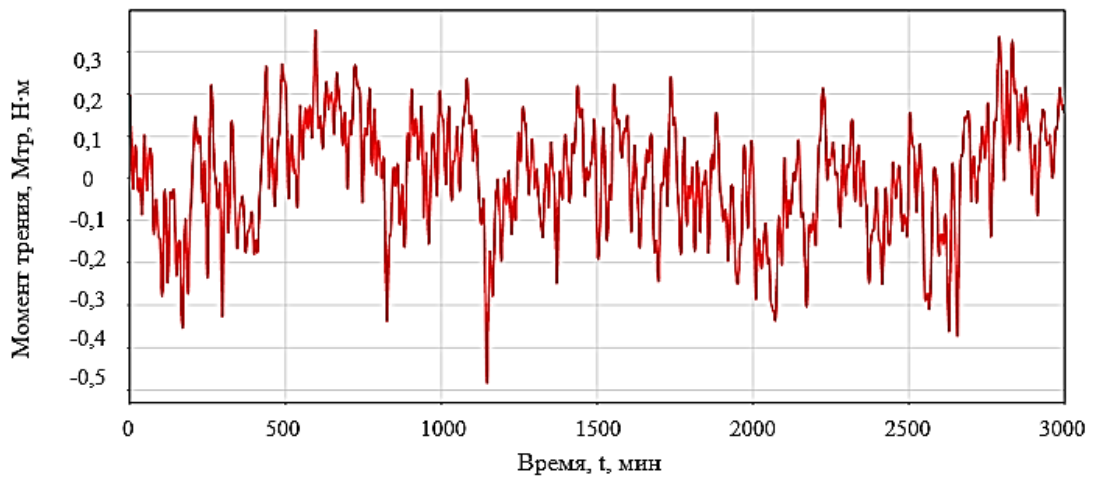


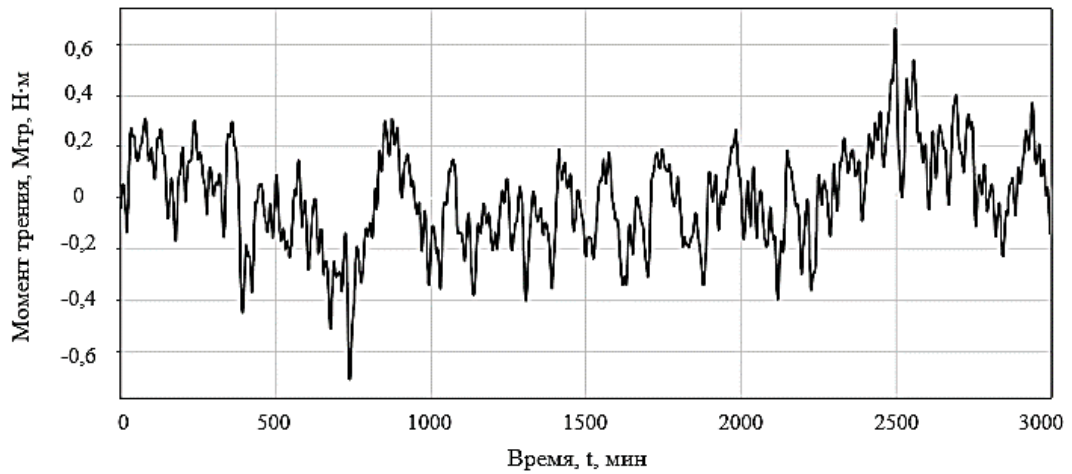
Рисунок 3 – Изменение момента трения во время испытания сталей:  
а) 09Г2С; б) Quard 450; в) Hardox 450



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Сглаженные графики изменение момента трения во время испытания:  
а) 09Г2С; б) Quard 450; в) Hardox 450

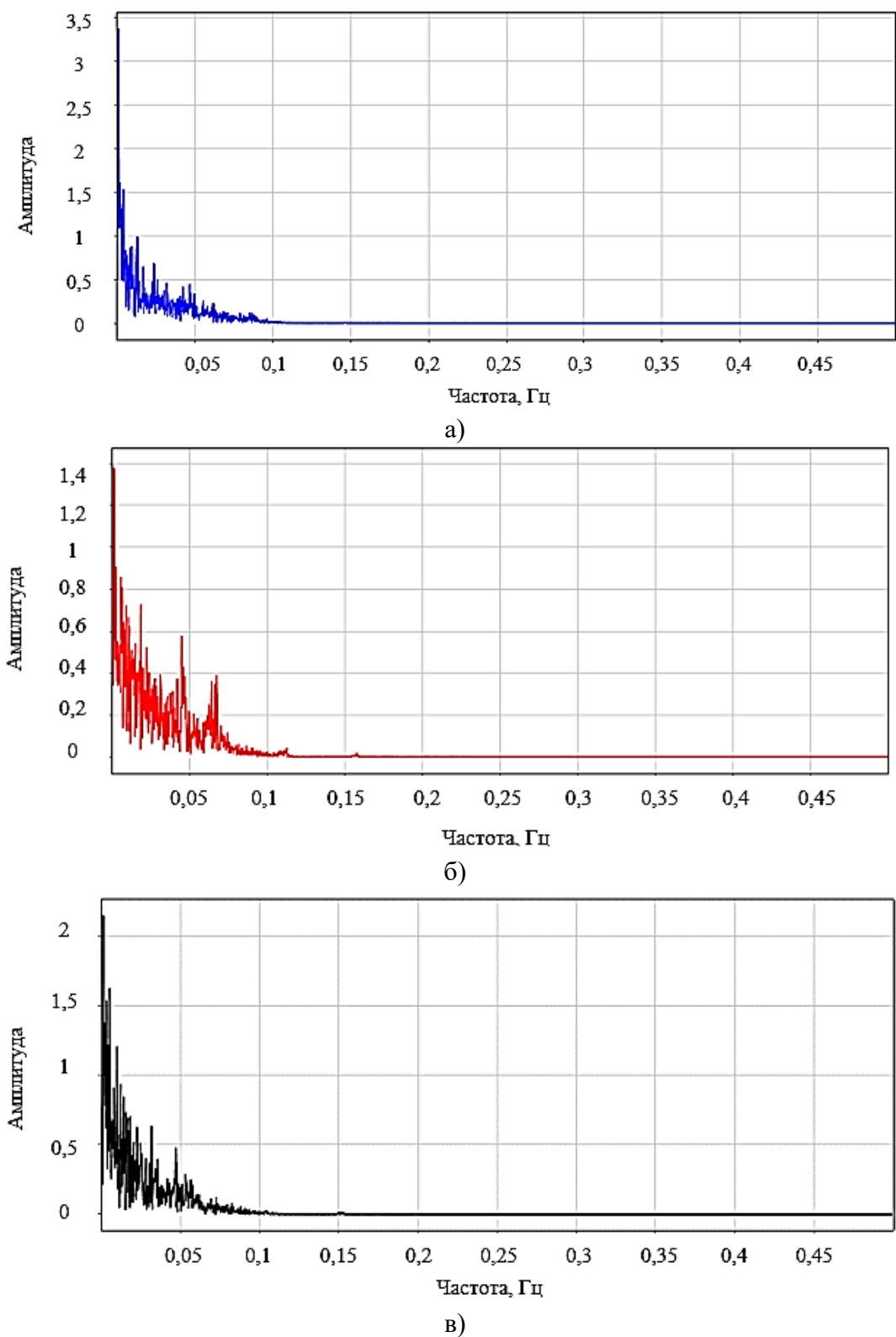


Рисунок 5 – Амплитудно-частотные характеристики:  
а) 09Г2С; б) Quard 450; в) Hardox 450

Как показали триботехнические испытания (Табл. 2), износостойкость  $\varepsilon$  возросла в направлении  $1,0 \rightarrow 7,9 \rightarrow 18,1$  в сталях  $09Г2С \rightarrow \text{Hardox 450} \rightarrow \text{Quard 450}$ , соответственно.

Таким образом, в стали Quard 450, обладающей минимальной амплитудой первой гармоники, вторая оказалась расщепленной на 2 синусоиды с близкими, но разными амплитудами. Можно полагать, что в стали Quard 450, в процессе трения,

происходили некие структурно-фазовые превращения, например, остаточный аустенит превращался в мартенсит деформации, упрочняющий поверхность контактной зоны и повышающий износостойкость стали Quard 450.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований была написана авторская программа на языке Python, использованная для сравнения моментов трения двух износостойких сталей Hardox 450 и Quard 450 по сравнению с обычной сталью 09Г2С. Показано, что по сравнению со сталью Hardox 450, в контактной зоне равнотвердой стали Quard 450, в процессе трения, происходили структурно-фазовые (мартенситные) превращения, упрочняющие поверхность в контактной зоне и повышающие её износостойкость.

### **Благодарности**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шабанов, А.Ю., Галышев, Ю.В., Сидоров, А.А. и др. Исследование эффективности восстановления технико-экономических показателей изношенного двигателя с помощью триботехнических составов. Современное машиностроение: Наука и образование. 2016. С.583–596.
2. Skotnikova, M.A., Tsvetkova, G.V., Krylov, N.A., Medvedeva, V.V. Features of wear of abrasive grains depending on microcuttings speed of steels. 2016. Key Engineering Materials, 674, pp. 189–194.
3. Syundyukov, I. S., Ryabikin, A. Y., Ivanova, G. V., Skotnikova, M. A. Increasing the Wear Resistance of Crankshafts by the Plasma Spraying Method. 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 142–152.
4. Tsvetkova, G., Skotnikova, M. Engineering and research of wearability coating on the basis of high-strength steel. 2018. Proceedings of 9th International Scientific Conference, BALTRIB 2017 – Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania, pp. 166–171.
5. Скотникова, М. А. [и др.]. Триботехнические материалы. Стали и чугуны: учеб. пособие. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020 – 61 с.
6. Филиппов, М. А., Шешуков, О. Ю. Трение и антифрикционные материалы: учебное пособие. М–во науки и высш. образования РФ. Екатеринбург: Изд–во Урал. ун–та, 2021–204 с
7. Абдукаххоров, З., Рахимов, Я. Т., Адашалиев, М. И. Влияние фазовой перекристаллизации на абразивную износостойкость стали. Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства, 2016 – Т. 1. № 9. С. 404–406.
8. Стрельникова, С. С. Тенденции развития методов трибологических исследований. В сборнике: Трибология – машиностроению. Труды XIII Международной научно-технической конференции, 2020 – с. 281–286.
9. Ильичев, В.Ю. Использование алгоритма дифференциальной эволюции для решения оптимизационных задач. // Системный администратор. 2021. № 4 (221). С. 80–83.
10. Фирсова, С.А. Преобразование дискретного преобразования Фурье в полиномиальную форму. // Вестник Таганрогского государственного педагогического института. 2014. № 1. С. 73–76.
11. Harris, F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform / F. J. Harris // Proc. of the IEEE. – Jan. 1978. – Vol. 66, no. 1. – P. 51–83.
12. Якимов, В. Н. Цифровой гармонический анализ на основе метода усреднения



Фурье–преобразования псевдоансамбля сегментов знакового сигнала / В. Н. Якимов, А. В. Машков, О. В. Горбачев // Цифровая обработка сигналов. – 2016. – № 2. – С. 31–34.

13. Погорелов, А. В. Исследование частотных характеристик рудничной сети с пассивными фильтрокомпенсирующими устройствами / А. В. Погорелов // Интеллектуальная электротехника. – 2019. – № 3. – С. 27–35.

14. Юрик Е.А., Ильичев В.Ю. Использование функций быстрого преобразования Фурье для спектрального анализа шума перлина. E–Scio. 2021. № 9 (60). С. 287–297.

15. Шляхтенко П.Г., Пименов В.И., Кофнов О.В. Использование двумерного дискретного преобразования Фурье для компьютерного анализа материала с повторяющейся структурой. Автоматизация и современные технологии. 2013. № 7. С. 20–27.

A.Y. Ryabikin, A.D. Shestakov, L.D. Tuptei, M.A. Skotnikova, A.D. Novokshenov  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia. ryabikin-98@mail.ru

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ABRASIVE WEAR OF STEELS BY PHYSICAL MODELING AND MACHINE LEARNING

### Abstract

Comparative tribotechnical tests of wear-resistant equal-hard steels of the martensitic class Hardox 450, Quard 450 in comparison with ferrite-pearlite steel 09G2C were carried out. The wear resistance increased in the direction of 1.0 → 7.9 → 18.1 in steels 09G2C → Hardox 450 → Quard 450, respectively. Graphs of fluctuations in time of the friction moments of the studied steels are constructed, their smoothing (averaging) by the Hanna method is carried out. The Fourier transform was performed and the amplitude-frequency characteristics of the friction moments were calculated. It is shown that the decrease in the amplitude of the sine wave of the first (main) harmonic occurred in the direction of 3.40 → 2.15 → 1.40 in steels 09G2C → Hardox 450 → Quard 450, respectively. In the same steels, the second harmonic was formed with sinusoid amplitudes in the direction of 1.50 → 1.60 → (0.85 and 0.70). As it turned out, after testing samples made of Quard 450 steel, on the surface of which traces of martensitic transformation were found, the amplitude-frequency response revealed the spectra of two exciting forces (abrasive wear and structural-phase (martensitic) transformation), strengthening the surface in the contact zone and increasing its wear resistance.

*Keywords:* moment of friction, steel, phase transformation, Hann window, Fourier transform.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-270

В.А. Яхимович<sup>1,2</sup>, В.О. Токарев<sup>1,2</sup>, Д.А. Виноградов<sup>1,2</sup>, Naghavi Yanal<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>2</sup>НТК «Новые технологии и материалы»

Санкт-Петербург, Россия. den895619@gmail.com

<sup>3</sup>The University of Jordan, Amman, Jordan

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПОКОЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ ПАРЫ ТРЕНИЯ «ПКМ-СТАЛЬ»