

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №11 (161). С.3-13.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №11 (161). P.3-13.

Научная статья

УДК 621.891

doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-17

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СМАЗОЧНЫХ СРЕД ДЛЯ НАГРУЖЕННЫХ СОПРЯЖЕНИЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ.

Сообщение 1. Влияние среды на напряженно-деформированное состояние и структурные изменения в зоне контактной деформации металлов при трении

Лидия Ивановна Куксенова¹, д.т.н.

Владислав Ильич Савенко², к.ф.-м.н.

¹ Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

² Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

¹ lkukc@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² visavenko@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3670-7716>

Аннотация. Изложены экспериментально-теоретические основы материаловедческого подхода к оценке смазочных сред, который базируется на анализе комплекса структурно-чувствительных свойств антифрикционного материала в зоне трибодеформации и позволяет выявить существенную роль процесса взаимодействия смазочных сред с поверхностью трения. Реологические свойства поверхностного слоя, образующегося в трибоматериале в условиях контактной деформации под действием смазочной среды, определяют условия формирования в нем износостойкой структуры. Сформулированы представления о физико-химических основах действия среды применительно к стандартным задачам упругопластичности, описывающим поведение поверхностно-модифицированных материалов в простейших напряженно-деформированных состояниях. Показано, что в поверхностно-упрочненном материале остаточные напряжения во внешнем слое по знаку совпадают с нагружающими, а во внутриобъемной зоне – противоположны им. Распределения остаточных напряжений в поверхностно-пластифицированном образце оказывается обратным случаю поверхностно-упрочненного материала. Приведены схематические эпюры остаточных напряжений, возникающих в приповерхностном слое материала в результате его упругопластического деформирования при трибоконтатном воздействии в поверхностно-пластифицирующей и поверхностно-упрочняющей смазочной среде. Найдено, что в поверхностно-пластифицированном приповерхностном слое остаточные напряжения носят сжимающий характер, а в поверхностно-упрочненном – растягивающий. На межслойной границе имеет место резкая смена знака остаточных напряжений. Распределение напряжений по глубине материала качественно подобно соответствующим распределениям, полученным для случаев кручения и изгиба. На основе анализа эпюр компонент тензора остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое антифрикционного материала при трении скольжения, выявлены условия реализации пластифицирующего и упрочняющего трибоэффекта в реальных антифрикционных материалах. Показано, что среди промышленных алюминиевых бронз наибольшей износостойкостью в поверхностно-активных смазочных средах обладают бронзы БрА5, БрА7.

Ключевые слова: антифрикционные материалы, граничное трение, поверхностно-активные смазочные среды, остаточные напряжения, контактная деформация, трение, износ, износостойкая структура материала, эффект Ребиндера

Для цитирования: Куксенова Л.И., Савенко В.И. Методологические основы материаловедческой оценки качества смазочных сред для нагруженных сопряжений машин и механизмов. Сообщение 1. Влияние среды на структурные изменения в зоне контактной деформации металлов при трении // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 11 (161). С. 3–13. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-13

**METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE MATERIALS SCIENCE
ASSESSMENT OF THE QUALITY OF LUBRICANTS FOR LOADED
INTEGRATIONS OF MACHINES AND MECHANISMS.**

**Message 1. The influence of the medium on the stress-strain
state and structural changes in the zone of contact
deformation of metals during friction**

Lidiya I. Kuksenova¹, D.Eng.

Vladislav I. Savenko², Cand.Sc. Ph. and M.

¹ A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

¹ lkuc@mail.ru,

² visavenko@rambler.ru

Abstract. *The experimental and theoretical foundations of the material science approach to the assessment of lubricants are described. This approach is based on the analysis of the complex of structurally sensitive properties of anti-friction material in the tribo deformation zone and aimed at identifying the significant role in the process of interaction of lubricants with the friction surface. The rheological properties of the surface layer formed in the tribo material under conditions of contact deformation and by the action of a lubricating medium determine the conditions for the formation of a wear-resistant structure. The concepts of the physical-chemical bases of the action of the medium in relation to the problems of elasticity and sliding contact are formulated, describing the behavior of surface-modified materials in the simplest stress-strain states. It is shown that when a surface-hardened material, the residual stresses within external layer are in agreement with the loading stresses, while in the inner volume zone they are opposite to them. The distribution of residual stresses in a surface-hardened sample turns out to be the reverse of the case of a plasticized material. The distribution of residual stresses in a surface-hardened sample turns out to be the reverse of the case of a plasticized material. Schematic diagrams of residual stresses arising in the near-surface formation of the material as a result of its elastic-plastic deformation during tribocontact action in a surface-plasticizing and surface-hardening lubricating medium, are presented. It is shown that in the surface-plasticized near-surface formation, residual stresses are compressive in nature, and in the surface-hardened layer they are tensile. There is a sharp change in the direction of residual stresses between layers at their boundary. The stress distribution over the depth of the material is qualitatively similar to the corresponding schematic diagrams obtained for cases of torsion and bending. Based on the calculation of the diagrams of the components of the residual stress tensor arising in the surface layer of the anti-friction material during sliding friction, the conditions for the implementation of the plasticizing and strengthening triboeffect, are shown. It is also shown that among industrial aluminum bronzes, BrA5, BrA7 have the highest wear resistance in surfactants.*

Keywords: anti-friction alloys, boundary friction, surfactants, microstructure, residual stresses, contact deformation, friction, wear, wear-resistant structure

For citation: Kuksenova L.I., Savenko V.I. Methodological foundations of the materials science assessment of the quality of lubricants for loaded integrations of machines and mechanisms. Message 1. The influence of the medium on the stress-strain state and structural changes in the zone of contact deformation of metals during friction / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 11 (161). P. 3–13. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-13

Введение

Проблема повышения надежности, долговечности и безопасности эксплуатации машин и механизмов связана с задачами обеспечения работоспособности нагруженных трибосопряжений, износостойкости конструкционных материалов, совместимости этих материалов и смазочной среды. Эта проблема является одной из наиболее сложных в современной технике. Несколько смягчить ее можно реализацией мероприятий, связанных с

методологически обоснованным выбором смазочных сред для скользящего трибоконтакта. Большинство узлов трения работают в режиме граничной смазки. Роль процесса взаимодействия смазочного материала с поверхностями трения отмечалась уже в ранних работах по развитию представлений о структуре системы «смазка трибоматериал». Был выдвинут ряд гипотез о строении и механических свойствах граничных слоев трибоматериалов. Установлены эффект пластифицирования тончайших слоев металлов (эффект Ребиндера) и

расклинивающий эффект тончайших слоев среды (эффект Дерягина), играющие важную роль в механизме граничной смазки [1].

Для оценки качества смазочного материала используются разные феноменологические показатели: коэффициент трения; износ поверхности деталей; критическая температура разрушения смазочного слоя; предельные значения нагрузки и скорости скольжения. Эти показатели обычно используются при инженерных расчетах на износ и заедание трибозулов [2]. Однако они не отражают изменение структурно-чувствительных свойств материала поверхностного слоя, формирующего частицы износа. Поэтому на их основе весьма затруднительно указывать способы совершенствования смазочного материала. Эта задача оказывается особенно сложной, если в состав смазочной среды входят поверхностно-активные вещества, которые влияют не только на эффективность смазочного действия среды, но и изменяют механические свойства материала зоны контакта, в частности его пластичность, – важный параметр для реализации процесса внешнего трения.

Ряд новых отраслей науки, возникших в XX веке, в первую очередь, физико-химическая механика материалов [3], внесли заметный вклад в разработку физико-химических основ смазочного действия на основе эффекта Ребиндера [4]. Эффектом Ребиндера называют явление адсорбционного понижения прочности твердых тел, облегчение их деформации и разрушения вследствие обратимого физико-химического воздействия окружающей среды. Термодинамически он обусловлен уменьшением работы образования новой поверхности при деформировании твердого тела в результате понижения его свободной поверхностной энергии под влиянием активной среды. Его молекулярная природа состоит в облегчении разрыва и перестройки межатомных связей в твердом теле в присутствии инородных атомов, молекул или ионов. В физико-химической механике твердых тел рассматривают две основные формы эффекта Ребиндера: охрупчивающее действие среды, в результате которого падает прочность твердого тела; пластифицирующее действие среды, которое проявляется в снижении макроскопического предела текучести, уменьшении коэффициента упрочнения при активном нагружении или увеличении скорости деформации при испытании на ползучесть.

Многочисленные экспериментальные исследования [5] показали, что при помещении однородного по механическим свойствам металла в инактивную среду последний

сохраняет свои свойства. Однако поверхностно-активная среда может оказывать на реологическое поведение материала не только пластифицирующее, но и упрочняющее влияние. Упрочняющее действие среды обусловлено уменьшением подвижности приповерхностных дислокаций в результате их адсорбционной блокировки, тормозящего действия окисных и пассивирующих пленок, под влиянием электрохимических явлений на поверхности твердых тел [6]. Изменения предела текучести приповерхностного слоя образца влияет на характер его напряженного состояния материала, на распределение остаточных напряжений в нем, что в свою очередь оказывает значимое влияние на изменение структуры и свойств модифицированного слоя.

Данная работа посвящена обобщению результатов экспериментальных и теоретических исследований влияния среды на изменение структуры и свойств металлических материалов при разных условиях нагружения с целью разработки методологических основ структурной оценки качества смазочного материала триботехнического назначения. Работа состоит из двух сообщений: в части 1 дано описание базовых представлений о физико-химических основах действия среды применительно к некоторым задачам упругопластичности и скользящего контакта, описывающих поведение поверхностно-модифицированных материалов в простейших напряженных состояниях и изменения структуры модифицированного слоя при деформации в поверхностно-активной среде. В части 2 приводятся результаты экспериментальных исследований влияния смазочной среды на структурно-фазовые превращения в зоне деформации при трении, на реологические свойства поверхностного слоя. Формулируются условия формирования износостойкой структуры и даются рекомендации по оценке смазочной способности сред.

Материалы и методы исследования

Испытывали пару реверсивного трения скольжения при давлении 20 МПа и средней скорости скольжения 0,1 м/с. Реверсивное трение, относящееся к тяжелым условиям испытаний с точки зрения деформации поверхностных слоев, позволяет более ярко выявлять роль смазочного материала. Интенсивность изнашивания трибообразцов I_h оценивали как среднее значение в результате испытаний от трех до пяти трибопар по потере массы образца на фиксированном пути трения $L = 0,36...36$ км. Роль среды выявляли с использованием

критериальных подходов [7], основанных на экспериментально полученной совокупности значений макроскопического интегрального критерия (феноменологических показателей потерь на износ) и микроскопических критериев (физического уширения рентгеновских линий материала зоны деформации, периода a кристаллической решетки, элементного и концентрационного состава поверхностного слоя), определяемых с применением методов металлофизического исследования.

Физическое уширение $\beta_{(hkl)}$ рентгеновских линий отражает влияние размера областей когерентного рассеяния – микроблоков D в кристалле, а также усредненных по микрообъему микродеформаций кристаллической решетки (напряжений II рода $\langle \varepsilon \rangle = \langle \frac{\Delta d}{d} \rangle$). Его величина определяется соотношением:

$$\beta_{(hkl)} = \frac{k\lambda}{D \cos \theta} + 4\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \theta,$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения; θ – угол дифракции Вульфа-Брэггов; k – коэффициент, зависящий от формы микрорешеток. Величина $\beta_{(hkl)}$ связана с плотностью как скользящих, так и неподвижных дислокаций, присутствующих в деформированном металле: $\rho_{\Sigma} = A\beta_{(hkl)}^2$, здесь ρ_{Σ} – плотность дислокаций обоих видов, $[\rho_{\Sigma}] = \text{см}^{-2}$; A – размерная постоянная, $[A] = (\text{см} \cdot \text{рад})^{-2}$. Очевидно, что первый член соотношения связан лишь с неподвижными дислокациями, которые формируют границы микроблоков; второй – отражает влияние суммарной плотности как подвижных дислокаций, находящихся в объемах микроблоков, так сидячих дислокаций, локализованных в их границах.

Величина периода кристаллической решетки a , оцениваемая по смещению дифракционных пиков на рентгенограмме, определяет сумму главных напряжений (напряжений I рода) и, кроме того, зависит от концентрационного состава сплава (для твердых растворов замещения выполняется закон Вегарда: $a_{AB} = C_A a_A + (1 - C_A) a_B$, где a_{AB} , a_A и a_B – параметры решеток раствора, растворителя и растворенного элемента, соответственно; C_A – атомная концентрация растворителя в сплаве). Поэтому изменение величины a_{AB} позволяет анализировать диффузионное перераспределение легирующих элементов в зоне механического или любого другого воздействия на сплав.

Рентгеносъемки проводили методом неразрушающего послойного сканирования зоны контактной деформации (модифицированного слоя) в диапазоне 0,5...10 мкм в Co-K α излучении.

В качестве смазочного материала применяли глицерин, минеральные масла, модельные смазочные материалы, в состав которых входили ПАВ, промышленные смазочные материалы.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим особенности поведения твердых тел в простейших напряженных состояниях на примере модельного материала, представляющего собой однородную сплошную среду в упругой области и двухслойную с поверхностно-модифицированным слоем – в пластической. Такой анализ обусловлен тем, что в условиях трения и изнашивания трибоматериала в различных микрообъемах его приповерхностного слоя одновременно реализуются разные виды нагружения: растяжение, сжатие, изгиб и кручение (особенно при формировании частиц износа) [8]. При этом величина износа узлов трения находится в прямой зависимости от механических свойств приповерхностных слоев металлических материалов (в первую очередь антифрикционных сплавов) [9], а уровень механических свойств этих слоев находится в прямой зависимости от их внутренней структуры (ее субзеренного и дислокационного строения) [10]. Кроме того, имеет место общая закономерность изменения структурного состояния металла, в частности его дислокационной структуры, на разных участках диаграммы объемной деформации. Также наблюдается эволюция дислокационных структур по глубине поверхностных слоев материала при трении [11].

В качестве примера на рис. 1, а представлена схематическая диаграмма одноосного растяжения поверхностно-пластифицированного круглого цилиндрического стержня (образец подвергался циклу «нагружение-разгрузка») [7]. Параллелограмм 01456 представляет собой траекторию напряжения в пластифицированном слое. Прямая 0178 обозначает траекторию напряжения во внутриобъемной зоне. Ломаная 0123 есть траектория усредненного по сечению напряжения, задаваемого внешней нагрузкой, которая регистрируется экспериментально [12].

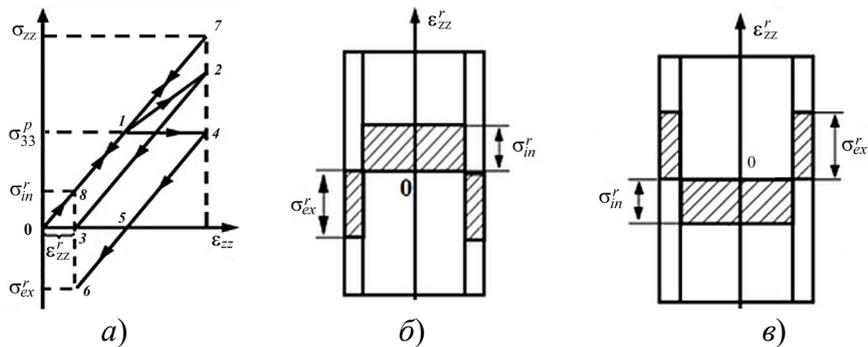


Рис. 1. Зависимость осевых компонент σ_{zz} тензора напряжений от деформации ε_{zz} при одноосном растяжении поверхностно-пластифицированного стержня (а); распределение остаточных напряжений σ_{zz}^r в поверхностно-пластифицированном (б) и поверхностно-упрочненном (в) стержне после растяжения, или в поверхностно-пластифицированном (в) и поверхностно-упрочненном (б) стержне после сжатия

Fig. 1. Dependence of the axial components σ_{zz} of the stress tensor on the deformation ε_{zz} during single-axial tension of a surface-plasticized rod (a); distribution of residual stresses σ_{zz}^r in a surface-plasticized (b) and surface-hardened (c) rod after stretching, or in a surface-plasticized (c) and surface-hardened (b) rod after compression

Как следует из рис. 1, а, образец при нагружении доводится до состояния, при котором внутриобъемная зона остается полностью упругой, а внешний слой претерпевает пластическую деформацию (участок 1–4). После разгрузки в материале появляются остаточные напряжения σ_{zz}^r . При этом в упругом ядре они оказываются растягивающими σ_{in}^r , а в поверхностно-пластифицированном слое – сжимающими σ_{ex}^r . Эти напряжения показаны в виде заштрихованных участков для растягивавшегося внешней нагрузкой образца (рис. 1, б) и для сжимавшегося (рис. 1, с). Видно, что во внешнем пластифицированном слое остаточные напряжения противоположны по знаку нагружающим, а во внутриобъемной зоне – совпадают с ними. Легко показать, что в случае одноосного растяжения поверхностно-упрочненного стержня диаграмму напряжение-разгрузка можно получить из рис. 1 б, с, если

поменять у обозначений индексы, относящиеся к внутреннему и внешнему слоям материала. Тогда рис. 1, б будет качественно описывать распределение остаточных напряжений в упрочненном стержне после его сжатия внешней нагрузкой, а рис. 1, с – после его растяжения. Таким образом, в поверхностно-упрочненном стержне остаточные напряжения во внешнем слое по знаку совпадают с нагружающими, во внутриобъемной зоне – противоположны им. Иными словами, картина распределения остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном образце оказывается обратной случаю пластифицированного стержня.

Рассмотрим теперь задачу о чистом упругопластическом изгибе поверхностно-модифицированной балки прямоугольного поперечного сечения [13]. Структурная модель такой балки и распределение напряжений в ней при деформации показаны на рис. 2, а – г.

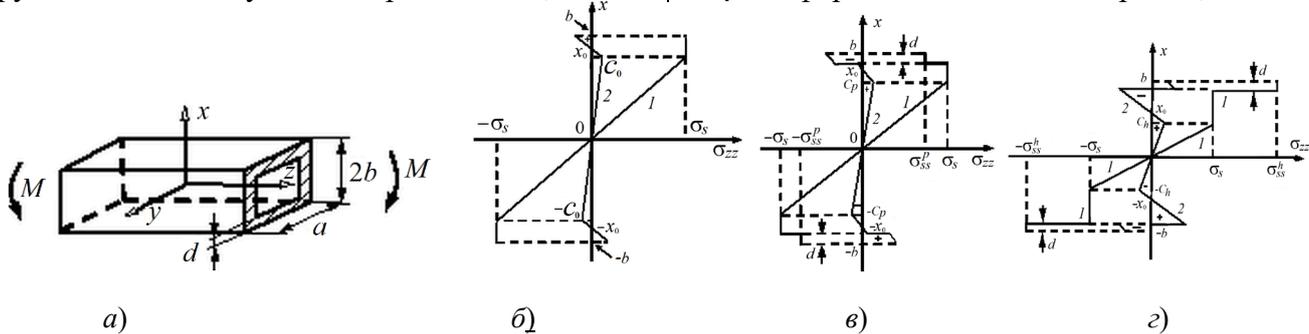


Рис. 2. Структурная схема поверхностно-модифицированной балки (а) при соотношении изгибающих моментов $M_o:M_p:M_h = 1:1:1,4$ для балок:

б – однородной; в – поверхностно-пластифицированной; г – поверхностно-упрочненной;
1 – внешние изгибающие напряжения; 2 – остаточные напряжения

Fig. 2. Structural diagram of a surface-modified beam (a) with a ratio of bending moments $M_o:M_p:M_h = 1:1:1,4$ for beams:

б – homogeneous; в – surface-plasticized; г – surface-hardened;
1 – external bending stresses; 2 – residual stresses

На рис. 2 d – толщина поверхностно-модифицированного слоя; M – изгибающий момент внешних сил; c_o , c_p , c_h – полуширина упругого ядра в соответствующих случаях. Штриховкой на рис. 2, a отмечен приповерхностный модифицированный слой. Рис. 2, b иллюстрирует распределение напряжений в поперечном сечении однородной балки, перпендикулярной оси OZ , по обе стороны от нейтральной плоскости. Отлична от нуля лишь компонента тензора σ_{zz} , лежащая в плоскости, нормальной к поперечному сечению. Нагружающие усилия выбраны таким образом, чтобы вовлечь в пластическую деформацию приповерхностный слой толщиной bc_o . Расчеты показывают, что остаточные напряжения в приповерхностном слое балки противоположны по знаку внешним нагружающим, а во внутриобъемной зоне их знаки совпадают.

Аналогичная картина наблюдается в случае испытаний в поверхностно-пластифицирующей среде, рис. 2, b . Расчеты показывают, что, в отличие от однородной балки, на межслойной границе наблюдается скачок напряжений. Если в пластическую деформацию была вовлечена часть внутриобъемной зоны, то величина скачка равна разности соответствующих пределов текучести: $\Delta\sigma_{zz} = \sigma_s - \sigma_{ss}^p$, где σ_s – предел текучести основного материала (его внутриобъемной области), и σ_{ss}^p – предел текучести его приповерхностного пластифицированного слоя.

Картина распределения остаточных напряжений при испытании поверхностно-упрочненной балки (рис. 2, c) отличается появлением осцилляций напряжения, сопровождающихся сменой его знака. Знак остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое совпадает со знаком внешних нагружающих напряжений. При этом на межслойной границе также наблюдается скачок напряжений, равный разности пределов текучести соседних слоев (здесь σ_{ss}^h – предел текучести поверхностно-упрочненного слоя).

Анализ модели поверхностно-модифицированного круглого стержня при упругопластическом кручении и выявление характера распределения напряжений в сечении, перпендикулярном оси стержня (нормальные компоненты тензора напряжений равны нулю), показали полную качественную аналогию распределениям напряжений в балках после изгиба в тех же средах [14].

Теперь рассмотрим особенности напряженного состояния в материале в условиях его контактной трибодеформации. Как известно, поверхность трения двух шероховатых твердых тел представляет собой набор дискретных контактов, периодически деформирующихся под действием сопряженных микровыступов. После каждого цикла деформации в приповерхностном слое

металла возникает упругопластическая деформация, и формируются остаточные напряжения I рода, знак и величина которых зависит от соотношения механических свойств приповерхностного слоя и внутриобъемной зоны. Задача решалась в двумерном приближении методом численного моделирования, ранее использованном для описания процесса прокатки поверхностно-модифицированных полос и тонких фольг [6]. Рассчитывали распределение нагружающих и остаточных напряжений в полубесконечном идеально упругопластическом пространстве при вдавливании со сдвигом по его поверхности бесконечно длинного абсолютно жесткого цилиндра.

Схематические эпюры остаточных напряжений, возникающих в приповерхностном слое материала в результате его упругопластического деформирования при трибоконтактном воздействии модельного цилиндрического микровыступа в поверхностно-пластифицирующей и поверхностно-упрочняющей смазочной среде приведены на рис. 3.

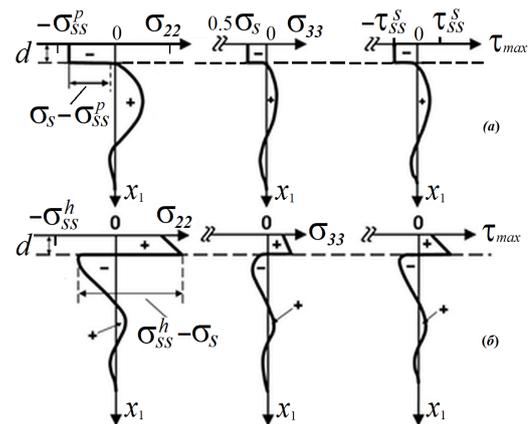


Рис. 3. Распределение остаточных нормальных (σ_{22} и σ_{33}) и максимальных касательных ($\tau_{\max} = 0,5\sigma_{22}$) напряжений в поверхностно-пластифицированном (а) и поверхностно-упрочненном (б) образцах после трибоконтактного воздействия на их поверхность жесткого цилиндрического ползуна

Fig. 3. Distribution of residual normal (σ_{22} and σ_{33}) and maximum negative ($\tau_{\max} = 0,5\sigma_{22}$) stresses in surface-plasticized (a) and surface-hardened (b) samples after tribocontact action on their surface by a rigid cylindrical slider

Расчеты свидетельствуют, что в поверхностно-пластифицированном приповерхностном слое остаточные напряжения носят сжимающий характер, а в поверхностно-упрочненном – растягивающий. Кроме того, наблюдаются осцилляции напряжений по глубине материала. На межслойной границе имеет место резкая смена знака остаточных напряжений. Распределение напряжений по глубине материала качественно подобно соответствующим эпюрам, полученным для случаев

кручения и изгиба. Анализ известных экспериментальных данных показывает, что это не случайное совпадение, а проявление общей закономерности, наблюдающейся при механических испытаниях поверхностно-модифицированных материалов, содержащих мягкую и твердую структурные составляющие.

Таким образом, характер напряженного состояния материала в зоне контакта и распределение остаточных напряжений в нем зависит от свойств окружающей среды. Последняя является регулирующими фактором структурообразования (перераспределения дефектов кристаллической решетки, легирующих элементов сплава, концентрационного и фазового состава модифицированного слоя) и, соответственно, фактором формирования совокупности структурно-чувствительных характеристик механических свойств, которые определяют уровень поверхностного разрушения. Это указывает на необходимость применения материаловедческого подхода к оценке эффективности смазочного действия разных по природе смазочных сред. Сопоставление характера напряженного состояния в условиях объемного и поверхностного (при трении) деформирования дает основание заключить, что в случае нагруженного скользящего контакта в приповерхностных слоях трибоматериалов должны происходить качественно аналогичные структурные изменения – концентрационные и

дислокационные. Далее рассмотрим эти особенности.

Прежде всего, остановимся на характеристиках микроструктурного состояния деформированного материала, влияющих на его механические свойства, и рассмотрим процессы эволюции дислокационной структуры и изменения концентрационного состава антифрикционного материала.

Результаты исследования пар трения, в состав которых входят чистые металлы (медь, железо и никель) представлены на рис. 4.

Анализ данных рис. 4 с позиций функциональных взаимосвязей параметров, характеризующих микроструктуру и механические свойства металла, таких как $S = f(\gamma, \delta)$, $\delta = f(\beta_{(hkl)})$, $H_{\mu} = f(\delta)$, $H_{\mu} = f(\beta_{(hkl)})$, (где S – истинные напряжения течения; γ – коэффициент пластичности; δ – остаточная деформация) [15], свидетельствует о том, что введение активной добавки в смазочную среду влияет на деформационные процессы в приконтактной зоне и вызывает формирование в материале модифицированного приповерхностного слоя. Так как вазелиновое масло является трибохимически инертной средой, то именно активные присадки изменяют величину $\beta_{(hkl)}$ (и, соответственно, плотность дислокаций) в тонком поверхностном слое металла по сравнению с вариантом его трения в чистом масле.

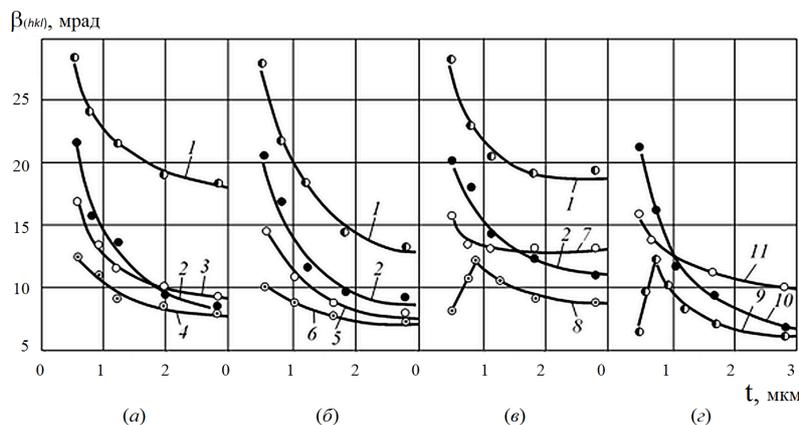


Рис. 4. Изменение физического уширения рентгеновских линий $\beta_{(hkl)}$ по толщине зоны деформации h для меди (а), железа (б), никеля (в) при трении в различных граничных условиях, а также для Cu, Fe, Ni при трении в глицерине (г):

1 – сухое трение; 2 – трение в вазелиновом масле; 3, 4 – трение в вазелиновом масле с активной добавкой (1 %) стеариновой и (1 %) олеиновой кислот соответственно; 5 – трение в смеси синтетических жирных кислот (СЖК) $S_{17} - S_{20}$; 6 – трение в СЖК $S_{10} - S_{16}$; 7, 8 – трение, соответственно, в эмульсиях Э-2 и Э-1 (индустриальных маслах с добавками сложных эфиров и карбоэфиров, хлоридов и фосфидов); 9 – медь; 10 – железо; 11 – никель в глицерине

Fig. 4. Changes in the physical broadening of the $\beta_{(hkl)}$ rentgen lines along the thickness of the h deformation zone for copper (a), iron (b), nickel (c) under friction under various boundary conditions, as well as for Cu, Fe, Ni under friction in glycerin (d):

1 – dry friction; 2 – friction in petroleum jelly oil; 3, 4 – friction in petroleum jelly oil with active addition of (1 %) stearic and (1 %) oleic acids, respectively; 5 – friction in a mixture of synthetic fatty acids (SFA) $S_{17} - S_{20}$; 6 – friction in SFA $S_{10} - S_{16}$; 7, 8 – friction, respectively, in emulsions E-2 and E-1 (industrial oils with the addition of esters and carboesters, chlorides and phosphides); 9 – copper; 10 – iron; 11 – nickel in glycerin

Теперь рассмотрим более подробно механизм влияния остаточных напряжений на дислокационную структуру материала [6].

Наличие на межслойной границе поверхностно модифицированного материала резкой смены знака остаточных касательных напряжений I рода (см. рис. 3) приводит к встречному движению дислокаций с однонаправленными векторами Бюргерса в соседних разнозначно напряженных слоях материала. Двигаясь в параллельных плоскостях скольжения, дислокации тормозятся на межслойной границе, формируя в ней простую малоугловую дислокационную стенку. При этом равновесная плотность стеночных дислокаций будет определяться условием силового баланса, записанного, например, в цилиндрической системе координат $O r \varphi z$ [6]:

$$\tau_{z\varphi}^r - \text{sign}(\tau_{z\varphi}^r) \cdot \tau_{st} = \tau_{z\varphi}^{in} + \tau_{z\varphi}^a,$$

где $\tau_{z\varphi}^r$ – компонента тензора остаточных напряжений I рода; τ_{st} – напряжение старта дислокаций в плоскости скольжения; $\tau_{z\varphi}^{in}$ – внутреннее напряжение в решетке, обусловленное дислокациями фона, т. е. ростовыми и неподвижными деформационными дислокациями; $\tau_{z\varphi}^a$ – действующее упругое напряжение, созданное стенкой. На основе соотношения для составляющих силового баланса в [6] дана оценка равновесной плотности стеночных дислокаций и показано, что её величина примерно на два порядка превышает плотность дислокаций фона. Например, при плотности дислокаций фона $\rho_{ph} \sim 10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-2}$ равновесная плотность стеночных дислокаций составляет $\rho_w \sim 10^8 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$.

Процесс концентрации дислокаций на межслойной границе сопровождается очисткой от них приграничных областей металла. Расчеты показывают, что размер таких областей составляет $\delta_g \sim (\rho_w)^{-1/2}$ и по порядку величины совпадает с толщиной поверхностно-модифицированного слоя h , достигающей нескольких микрон для типичных случаев упругопластического деформирования металлов [6].

Антифрикционный материал, как правило, представляет собой двойной или многокомпонентный сплав. Рассмотрим изменения элементного (концентрационного) состава его приповерхностного слоя под действием остаточных напряжений, тип распределения которых, как отмечалось выше, задается

свойствами внешней среды. После первых циклов контактного взаимодействия в активной среде любого модифицирующего типа в приповерхностном слое трибоматериала возникают диффузионные потоки вакансий, атомов примесных и/или легирующих элементов, стимулирующие релаксацию остаточных напряжений. Будет наблюдаться «восходящая диффузия» [16], в результате которой в сжатых областях материала концентрация элементов, размеры атомов которых превосходят таковые для основного металла, понизится, а в растянутых областях – наоборот, повысится. В приповерхностном слое происходит перераспределение легирующих элементов, которое может приводить к изменению фазового состава и, следовательно, к изменению его механических свойств.

Результаты экспериментальных исследований различных промышленных бронз приведены на рис. 5. Анализ этих данных показывает, что диффузионное перераспределение легирующих элементов в алюминиевых бронзах при трении приводит к формированию нескольких типов микроструктуры модифицированного слоя.

Микроструктура первого типа возникает в бронзах, характеризующихся относительно малой концентрацией алюминия (БрА5; БрА7), когда в приповерхностном слое трибоматериала создается износостойкая микроструктура [17] и возможность реализации высокой износостойкости бронзы наиболее вероятна (см. рис. 5, а).

Микроструктура второго типа формируется в трехкомпонентных бронзах БрАМц9-2, БрАЖ9-4. В зависимости от вида материала и свойств смазочной среды, в зоне контактной деформации этих бронзах возможно формирование трех альтернативных типов микроструктур: например, в виде традиционно неоднородного по толщине слоя α -твердого раствора, когда условия образования износостойкого структурного состояния нарушаются (кривая 1, см. рис. 5, б); В иных случаях могут образоваться два кристаллографически изоструктурных α -твердых раствора, обеспечивающие создание предпосылок для возникновения износостойкой структуры (кривые 3, см. рис. 5, в) наконец, в трибоматериале может сформироваться поверхностная пленка меди и подповерхностный концентрационно неоднородный α -твердый раствор, что создает условия для реализации нестабильного режима избирательного переноса (кривая 2, см. рис. 5, б).

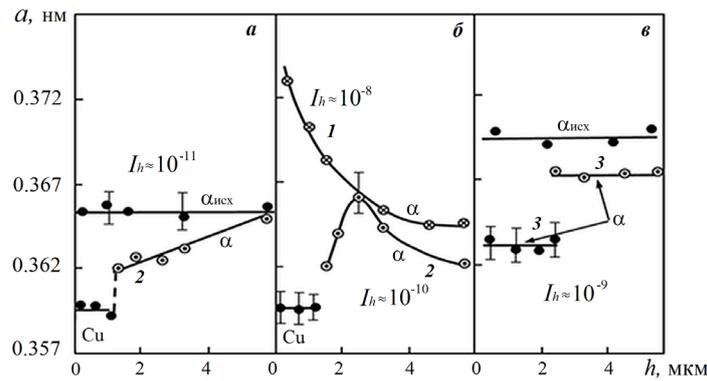


Рис. 5. Изменение периода a кристаллической решетки α -твердого раствора алюминиевых бронз по глубине зоны деформации при трении в разных смазочных средах:
 a – БрА7; b – БрАМц9-2; v – БрАЖМц10-3-1,5;
 1 – этиленгликоль (этанediол-1,2); 2 – жидкая смесь на основе глицерина (ПГВ); 3 – ЦИАТИМ-201 (I_h – интенсивность износа)

Fig. 5. Change in the period a of the crystal lattice of an α -solid solution of aluminum bronzes in the depth of the friction deformation zone in different lubricating media:
 a – BRSAl7; b – BRSAlMn9-2; c – BRSAlFeMn10-3-1,5;
 1 – ethylene glycol (ethanediol-1,2); 2 – liquid mixture on glycerin-based (PGV); 3 – AFRMPLiL-201 (I_h is the wear rate)

Микроструктура третьего типа возникает в высокопрочных четырехкомпонентных бронзах типа БрАЖМц10-3-1,5 и БрАЖН10-4-4. В этих бронзах переход поверхностного слоя трибоматериала в износостойкое состояние осуществляется в два этапа: путем образования двух изоструктурных α -твердых растворов с одновременным вытеснением в приповерхностный подслои обогащенной медью фазы и последующим созданием на его поверхности пластифицированной медной пленки (рис. 5, в).

Изменение концентрации легирующего элемента в напряженной области материала в результате восходящей диффузии описывается соотношением [6, 13, 14]:

$$(\Delta C)/C \approx \exp\{\delta\omega (\Delta\sigma_{ij}^r / 3kT)\} - 1,$$

где $\Delta\sigma_{ij}^r$ – скачок остаточных напряжений на межслойной границе; $\delta\omega = \omega_A - \omega_B$; ω_A и ω_B – атомные объемы металлов матрицы и примеси. Было показано, что для экспериментов с поверхностно-модифицированными образцами величина $(|\Delta C|)/C = (10 \div 100)\%$ при $|\Delta\sigma_{ij}^r| \approx \sigma_S = 0,1 \dots 1$ ГПа, $\delta\omega = 3 \cdot 10^{-24}$ см³. Следовательно, при испытаниях в активных средах происходит концентрационное расслоение деформированного материала, которое закономерно влияет на предел текучести его модифицированного слоя. Основываясь на зависимости $\sigma_S \approx C^{1/2}$ и учитывая выполняющееся в трибоэкспериментах соотношение $(|\Delta C|)/C \rightarrow 1$,

можно получить, что $|\Delta\sigma_S|/\sigma_S \approx 50\%$ [6]. Таким образом, только за счет восходящей диффузии может быть достигнуто пятидесятипроцентное изменение предела текучести, что для случая поверхностно-пластифицирующей среды обеспечивает условия реализации положительного градиента механических характеристик – необходимого условия устойчивого режима трения и высоких антифрикционных свойств.

Таким образом, структурная модификация приповерхностного слоя трибоматериала является значимым механо-физико-химическим явлением, сопровождающим процесс граничного трения в поверхностно-активных смазочных средах. При этом в приповерхностном слое реализуются два структурообразующих процесса: первый процесс – формирование стационарного макроскопического диффузионного потока атомов легирующих элементов и их переход в смазочную среду (изменение периода a), что приводит к созданию поверхностной пластифицированной пленки меди, и второй процесс – понижение плотности неподвижных (сидячих) дислокаций в материале зоны деформации (уменьшение величины $\beta(hkl)$), что указывает на эффект пластифицирования материала (снижение предела его текучести).

В результате этих процессов материал зоны контакта будет существенно отличаться от исходного по характеристикам напряженного состояния, микроструктуры и механических свойств. Именно свойствами этого модифицированного слоя и определяется износостойкость трибоматериала и ресурс пары

трения. Поэтому оценку смазочной способности той или иной среды, кроме общепринятых в триботехнике феноменологических критериев, целесообразно проводить также с использованием описанного выше критериального подхода, основанного на совокупности данных, соответствующих разным масштабно-аналитическим характеристикам трибосистемы. Недостаток сведений о физико-химическом взаимодействии смазочных композиций с конструкционными материалами в условиях трибодеструкции является сдерживающим фактором для методически обоснованного подхода к выбору состава смазочных материалов, которые могли бы существенно повысить работоспособность реальных узлов трения.

Заключение

Для обеспечения высокой износостойкости нагруженных трибосопряжений определяющим фактором является оптимизация реологических свойств приповерхностного слоя, формирующегося в трибоматериале в условиях контактной трибодеструкции под действием активной смазочной среды. Подбирать сочетания конструкционных и смазочных материалов необходимо так, чтобы в трибоматериале создавались условия для реализации правила положительного градиента механических характеристик по нормали к поверхностям трения (И.В. Крагельский). В этом случае сдвиговые деформации концентрируются в тонком приповерхностном слое приконтактной зоны трибосопряжения, что и обеспечивает минимальный уровень его разрушения.

В основе методологии подбора материалов триады трения лежит совокупность макроскопических критериев (феноменологических показателей потерь на трение и износ) и микроструктурных характеристик приповерхностного слоя трибоматериала. К последним относятся: физическое уширение рентгеновских линий, отражающее плотность дефектов дислокационной природы, а также период кристаллической решетки, указывающий на изменение элементного, концентрационного и фазового состава и уровня напряжений I рода при трении антифрикционного материала в данной смазочной среде.

В основе формирования износостойкого структурного состояния материала в поверхностно-активной смазочной среде лежат два структурообразующих процесса: первый процесс – формирование стационарного макроскопического диффузионного потока атомов

легирующих элементов и их переход в смазочную среду (изменение периода a), что приводит к созданию поверхностного пластифицированного слоя и второй процесс – понижение плотности неподвижных (сидячих) дислокаций в материале зоны деформации (уменьшение величины $\beta_{(hkl)}$), что обеспечивает эффект пластифицирования материала (снижение предела его текучести). В результате этих процессов материал зоны контакта существенно отличается от исходного по характеристикам напряженного состояния, микроструктуры и механических свойств.

Именно свойствами этого модифицированного слоя определяется износостойкость конструкционного трибоматериала. Поэтому оценку противоизносной способности той или иной смазочной среды, кроме общепринятых в триботехнике критериев, целесообразно проводить также с использованием описанного выше критериального подхода, основанного на совокупности данных, соответствующих разным масштабно-аналитическим характеристикам трибосистемы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буяновский И.А., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н. Граничная смазка. Этапы развития трибологии: монография. М: ГУП Изд-во Нефть и газ РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2002. 230 с.
2. Буяновский И.А. К учету влияния смазочных материалов при прогнозировании заедания и износа в режиме граничной смазки // Трение и износ. 1980. Т. 1. № 5. С. 837–844.
3. Щукин Е.Д., Савенко В.И., Малкин А.И. Лекции по физико-химической механике. М.: Изд-во «Нобель Пресс», 2015. 679 с.
4. Щукин Е.Д., Амелина Е.А., Качанова Л.А., Савенко В.И. Физико-химическая механика контактного взаимодействия // Трение и износ. 1980. № 2. С. 247–262.
5. Shchukin E.D., Kochanova L.A., Savenko V.I. On mechanism of environment-induced plasticizing under contact interactions // Advances in the mechanics and physics of surfaces. 1981. V.1. P. 111–152.
6. Савенко В.И. Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии, 1994. № 3–4. С. 26–38.
7. Савенко В.И., Щукин Е.Д. О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. 1987. Т. 8. № 4. С. 581–589.
8. Алексеев Н.М. Новое о структурных особенностях изнашивания твердых тел // Трение и износ. 1989. Т.10. № 3. С. 197–205.
9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
10. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Структура и механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1970. 472 с.

11. Рапопорт Л.С. Уровни пластической деформации поверхностных слоев и их связь с процессом изнашивания // Трение и износ. 1989. Т. 10. № 5. С. 786–792.

12. Щукин Е.Д., Савенко В.И., Качанова Л.А. Роль поверхности и среды в переходах упругость-пластичность-хрупкость в металлических кристаллах // Поверхность. 1982. № 2. С. 25–41.

13. Савенко В.И., Щукин Е.Д. Об остаточных напряжениях, возникающих в материалах, деформированных в активных средах путем изгиба // Поверхность, 1987. № 12. С. 20–25.

14. Савенко В.И., Щукин Е.Д. Об остаточных напряжениях, возникающих в упруго-пластичных материалах, деформированных в активных средах при кручении // Поверхность. 1989. № 8. С. 129–135.

15. Рыбакова Л.М., Куksenova Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.

16. Гегузин Я.Е. Восходящая диффузия и диффузионное последствие // УФН. 1986. Т. 149. № 1. С. 149–151.

17. Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical tribomechanics of antifriction materials operating in heavily-loaded friction pairs in active lubricating media // Journal of Friction and Wear. 2023. Vol. 44. No. 6. P. 333–345.

REFERENCES

1. Buyanovsky I.A., Fuchs I.G., Shabalina T.N. Boundary lubrication. Stages of tribology development: monograph. Moscow: SUE publishing house «Oil and Gas», Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2002, 230 p.

2. Buyanovsky I.A. Taking into account the influence of lubricants in predicting jamming and wear in the mode of boundary lubrication // Friction and wear. 1980. Vol. 1. No. 5. pp. 837–844.

3. Shchukin E.D., Savenko V., Malkin A.I. Lectures on physico-chemical mechanics. Moscow: Publishing house «Nobel Press», 2015, 679 p.

4. Shchukin Ye.D. Amelina. Ye.A., Kachanova L.A., Savenko V. I. Physical and chemical mechanics of contact

interactions // Friction and Wear, 1980, no. 2, pp. 247–262.

5. Shchukin E.D., Kochanova L.A., Savenko V.I. On mechanism of environment-induced plasticizing under contact interactions // Advances in the mechanics and physics of surfaces. 1981. V.1. P. 111–152.

6. Savchenko V.I. The role of the Rebinder effect in the implementation of the wearlessness regime in tribotechnics // The effect of wearlessness and tribotechnology, 1994, no. 3-4, pp. 26–38.

7. Savchenko V.I., Shchukin E.D. On the relationships between the phenomenological and structural criteria of friction assembly operation // Friction and wear. 1987, vol. 8, no. 4, pp. 581–589.

8. Alekseev N.M. New information on structural features of wear of solids // Friction and wear, 1989, vol. 10, no. 3, pp. 197–205.

9. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p.

10. Bernstein M.L., Zaimovsky V.A. Structure and mechanical properties of metals. Moscow: Metallurgiya, 1970, 472 p.

11. Rapoport L.S. Levels of plastic deformation of surface layers and their relation to the wear process // Friction and wear, 1989, vol. 10, no. 5, pp. 786–792.

12. Shchukin E.D., Savchenko V.I., Kachanova L.A. Role of the surface and the medium in elasticity-plasticity-brittleness transitions in metallic crystals // Surface, 1982, no. 2, pp. 25–41.

13. Savchenko V.I., Shchukin E.D. Residual stresses arising in materials deformed in active media by bending // Surface, 1987, no. 12, pp. 20–25.

14. Savchenko V.I., Shchukin E.D. Residual stresses arising in materials deformed by bending in surface-active media // Surface, 1989, no. 8, pp. 129–135.

15. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Structure and wear resistance of metal. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 212 p.

16. Geguzin Ya.E. Ascending diffusion and diffusion aftereffects // UFN, 1986, vol. 149, no. 1, pp. 149–151.

17. Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical tribomechanics of antifriction materials operating in heavily-loaded friction pairs in active lubricating media // Journal of Friction and Wear. 2023. Vol. 44. No. 6. P. 333–345.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.05.2024; одобрена после рецензирования 26.05.2024; принята к публикации 03.09.2024.

The article was submitted 26.05.2024; approved after reviewing 26.05.2024; assepted for publication 03.09.2024.