

average values of observed values over a long period of time, including in the presence of external time-dependent forces. Based on the fact that, in accordance with the ergodic hypothesis, the limit of the dynamic statistical distribution for an isolated body is the microcanonical distribution, and for its subsystems the canonical Gibbs distribution, a definition of the temperature of an isolated body is proposed. The energy balance in the thermoelastic effect is in full accordance with the first law of thermodynamics for an isolated body.

Keywords: anharmonicity, stochasticity, deformation, energy, temperature.

УДК 530.145.86

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-261

Д.Н. Любимов¹, С.В. Кирильчик¹, Ю.Б. Щемелева¹, М.С. Яшин²

¹Южный Федеральный Университет,

Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, kirilchik@mail.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Россия, Москва, улица Радио, 17

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КВАНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ЭВОЛЮЦИИ ТРИБОСИСТЕМ

Аннотация

Целью работы является обоснование фундаментальной основы процессов трибомутаций на основе квантового механизма образования классической формы трибосистемы. Для этого была разработана теоретическая модель, основанная на гипотезе П.Эткинса, исследование которой показало, что аппарат квантовой механики способен физически корректно описывать появление вещественного, классического объекта из квантового состояния. В соответствии с полученными уравнениями делается допущение, что при замене квантовой информации на классическую, сохраняются эффекты квантовой природы, несмотря на «действие» постулата редукции волновой функции. При этом постдекогерентная физическая система приближается к квантовым объектам.

Ключевые слова: волновая функция, матрица плотности, квантовая запутанность, трибосистема, декогеренция

Введение

Современная наука полностью (как теоретически, так и экспериментально) обосновала предположение о пригодности для описания движения и эволюции физических макросистем аппарата квантовой механики [1]. Последнее в полной мере справедливо и для таких фундаментальных квантовомеханических эффектов как декогеренция, запутанность, редукция и прочее.

Макротела можно рассматривать как сложносоставные системы, состоящие из отдельных подсистем. Запутанные состояния в подобных физических объектах возникают при взаимодействии подсистем между собой. При этом факт образования между отдельными частями квантовокорреляционных связей квантовой запутанности играет важную роль в формировании «целостности» составной

физической системы.

Декогеренция квантовой системы происходит каждый раз, когда ее состояние «запутывается» с окружением, так что информация о ней «записывается» последним [2]. Квантовая часть информации о состоянии системы, заключаемая в волновой функции (вектор состояния $0|\Psi\rangle$), мгновенно передается из одной точки Гильбертова пространства в другую. Однако для восстановления этого состояния в точке переноса необходимо привлечение обычной или классической информации, которая распространяется со скоростью, ограниченной скоростью света [2]. Если состояния подсистем в макроскопической физической системе становятся запутанными, а волновая функция записывается как

$$|\Psi\rangle = (\sqrt{2})^{-1} [|\Psi_1\rangle|\varphi_1\rangle + |\Psi_2\rangle|\varphi_2\rangle],$$

а сама система находится в первом состоянии, то состояние любой из подсистем оказывается неопределенным [1,2].

Мгновенное распространение информации из одной точки Гильбертова пространства в другую получило весьма популярное название квантовой телепортации. При реализации этого процесса состояние в исходной точке разрушается, что проявляется в законе запрета «клонирования квантового состояния». Фактически квантовая механика логически ведет к выводу, что существует суперпозиция макроскопических состояний. Однако в соответствии с «кошачьим парадоксом» всегда наблюдается лишь одно из подобных состояний [2]. В то же время следует отметить, что «Гильбертов формализм» квантовой теории позволяет утверждать, что в природе существует неограниченный запас запутанных состояний любой сложности, и существование запутанных состояний многих квантовых частиц является экспериментально установленным фактом. По-видимому, многочастичные квантовые запутанности могут рассматриваться, как инструмент, позволяющий связать квантовую и классическую физику [3-5].

На основании этого утверждения целью данной работы является описание квантового механизма образования классической формы трибосистемы, а также обоснование фундаментальной основы процессов трибомутаций [6].

Теоретическая модель

В основу дальнейших рассуждений может быть положена замечательная догадка, сделанная известным английским физико-химиком П.Эткинсом, о декогерентной природе явления трения [7]. Это достаточно умозрительное предположение было развито в монографии [8], в которой процесс декогеренции представлялся как проецирование многомерного, находящегося в Гильбертовом пространстве квантового объекта – исходной или в терминах [8] «собственно» трибосистемы на «наше» четырехмерное пространство-время Г.Минковского [9]. Такой процесс был записан в форме системы линейных уравнений, количество которых определяется числом измерений, проведенных над трибосистемой. Число слагаемых линейной комбинации в каждом уравнении данной системы определяется базисом пространства, в котором декогерирует наша трибосистема, т.е. четырем: трем пространственным и одной временной координатам [9].

$$\begin{aligned} |A_1\rangle &= a_{11} |q_1\rangle + a_{12} |q_2\rangle + a_{13} |q_3\rangle + a_{14} |q_4\rangle \\ |A_2\rangle &= a_{21} |q_1\rangle + a_{22} |q_2\rangle + a_{23} |q_3\rangle + a_{24} |q_4\rangle \end{aligned} \quad (1)$$

 $|A_n\rangle = a_{ni} |q_1\rangle + a_{n2} |q_2\rangle + a_{n3} |q_3\rangle + a_{n4} |q_4\rangle$
 где $|q_i\rangle$ – базисы пространства Минковского,

$|A_i\rangle$ – состояния трибосистемы после декогеренции (наблюдаемые),
 a_{ij} – коэффициенты векторного разложения, равные $\langle q_i | A_j \rangle$

Как показано в работе [8], линейное пространство, в котором в определена исходная трибосистема, имеет шестнадцать измерений и описывается квадратной (4x4) матрицей плотности вида:

$$a_{ij} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} \quad (2)$$

В этой же монографии было сделано предположение, что структура матрицы (2) адекватно отражает строение исходной трибосистемы, элементами которой являются три матрицы:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, B = \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, C = \begin{vmatrix} a_{33} & a_{34} \\ a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}, \quad (3)$$

которые одновременно являются и возможными вариантами декогеренции.

Эти варианты существуют объективно в отдельных подпространствах многомерного пространства Гильберта, представляющих собой четырехмерные континуумы Минковского [8-10]. Более того, по оценкам, сделанным в монографии [8], подсистемы исходной трибосистемы, выраженные матрицами (3), связаны между собой квантовой запутанностью со степенью $E(\Psi) = 0,75$, что является весьма большой величиной. В то же время положение подсистемы (3) в матрице плотности (2) оказывается весьма неравнозначной. В частности, система, описываемая матрицей плотности В, по сути является в некотором смысле суперпозицией матриц А и С, что делает ее аналогом живо-мертвого состояния «Шредингера кота». Соответственно, и декогеренция системы В из исходной (собственно) трибосистемы, описываемой матрицей плотности ρ_{ij} (2), отличается от аналогичного процесса для подсистем А и С. Декогеренция последних тождественна друг другу. Остаточные матрицы плотности после выделения их исходной квантовой системы А и С имеют равные нулевые детерминанты. В то же время декогеренция подсистемы В оставляет после себя матрицу с детерминантом, не равным нулю, а имеющим значение $a_{12}, a_{22}, a_{43}, a_{34}$.

По крайней мере формально это связано с тем, что компоненты следа матриц А и С находятся в «свободном» состоянии (2), в то время как аналогичные элементы из матрицы В «закрываются» недиагональными членами матрицы плотности ρ_{ij} . Тем не менее значения, которые принимают указанные детерминанты в соответствии с критерием Переса-Городецкого [16], свидетельствуют о сепарабельности этих физических систем, что определяет саму возможность «выделения» подсистем А, В и С из собственно трибосистемы в результате ее взаимодействия (декогеренции) с квантовым трибометром.

Если в результате декогеренции из исходной трибосистемы (2) «появилась» например, подсистема А, то первоначальное состояние, описываемое матрицей плотности ρ_{ij} , разрушается, и соответственно превращается в систему с матрицей ρ_{ij}' :

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \leftrightarrow \rho_{ij}' = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} \quad (4)$$

Обоюдоострая стрелка, соединяющая матрицы (4), указывает на сохраняющуюся между ними квантовую запутанность, равную 0,47 [8]. Подобная

связь обеспечивает неизбежные изменения в матрице ρ_{ij}' , характер которых определяется изменением в матрице плотности В, количественная оценка которых по величине соответствующего детерминанта дает уменьшение последнего на $a_{22}^*a_{33}$.

Эта величина может рассматриваться как возмущение квантового поля V, приводящее к очередному изменению матрицы ρ_{ij}' . Последнее связано с произведением $a_{22}^*a_{33}$, которое в соответствии с (1) равно

$$a_{22}^*a_{33} = \langle 2 | A_2 \rangle \langle 3 | A_3 \rangle = \langle 2, 3 | A_2, A_3 \rangle. \quad (5)$$

Выражение (5) можно трактовать как влияние декогерированной матрицы А на ρ_{ij}' , которое связано с изменением метрики Гильбертова пространства исходной трибосистемы, определяемого появлением нового подпространства $\langle 2, 3 |$ и потенциального результат декогеренции $| A_2 A_3 \rangle$.

Возмущение квантового поля исходной трибосистемы по сути является изменением топологии Гильбертова Пространства. В соответствии с работами Уилера и Мизнера [12, 13] подобные пространственные «возмущения» можно трактовать как появление новых частиц и квазичастиц. При этом подобная пространственная перестройка происходит мгновенно и может рассматриваться как проявление квантовой телепортации.

Квантовая телепортация, связанная с мгновенной топологической перестройкой гильбертова пространства исходной трибосистемы, вызывает появление вещественных постдекогерентных форм. Как было показано в монографиях [14, 15], для описания последнего удобно использовать представление о солитонах и другие понятия из нелинейной динамики, с помощью которых удобно описывать и анализировать вещественно-энергетические потоки, связанные с эволюцией трибосистем. Подобные процессы протекают с конечной скоростью, не превышающей некоторое значение С. Для солитонов в рассматриваемых системах С - скорость звука, тем не менее их движение описывается при помощи Лоренц-инвариантных уравнений, что означает присутствие в данных физических системах релятивистских эффектов [14]. Наличие запутанности между матрицами А и ρ_{ij} с необходимостью вызывает изменения, происходящие уже не мгновенно, а с ограниченной скоростью С. Характер подобных изменений в силу существования запутанности имеет циклический характер, который можно проиллюстрировать следующей диаграммой:

$$\begin{array}{ccc} & \longrightarrow & \\ (A')_n & & (\rho'_{ij})_n \\ & \longleftarrow & \end{array} \quad (6)$$

где n – число циклов изменения.

Происходящий процесс, несмотря на исходную квантовую природу, затрудняет образование суперпозиции между наблюдаемыми $A_i(1)$, что объясняется появлением классической информации и формированием нового вида матрицы плотности. Поскольку изменения, происходящие в матрицах (3), определяются аппаратом нелинейной динамики, то они принимают вид классических кинетических процессов, многократно описанных в работах по теории трения. При этом из-за ограниченного значения запутанности между исходной и декогерированной системами каждый последующий цикл (6) приводит к более слабым изменениям в структуре физических систем. Поэтому можно ожидать, что по истечению некоторого времени эти изменения станут малозаметными, а трибосистема перейдет в устойчивый режим трения.

Вышесказанное совпадает с выводами, вытекающими из модели непрерывных измерений [11], в соответствии с которой декогеренция возникает экспоненциально быстро по мере того, как все большее число степеней свободы квантовой макросистемы запутываются с окружением. В нашем случае это квантовый трибометр [8]. Формальная сторона описания такого процесса связана с «отмиранием» недиагональных компонентов матрицы плотности, описывающих корреляционные связи внутри физической системы [17]:

$$\rho_D = \left\| \begin{array}{cc} C^2_1 & 0 \\ 0 & C^2_2 \end{array} \right\| \quad (7)$$

где C^2_1, C^2_2 - вероятности реализации состояний 1 и 2 физической системы после декогеренции.

В соответствии с этим, матрицы A, B, C (3) вследствие процесса декогеренции физической системы принимают следующий вид:

$$A_D = \left\| \begin{array}{cc} A^2_1 & 0 \\ 0 & A^2_2 \end{array} \right\|, B_D = \left\| \begin{array}{cc} B^2_1 & 0 \\ 0 & B^2_2 \end{array} \right\|, C_D = \left\| \begin{array}{cc} C^2_1 & 0 \\ 0 & C^2_2 \end{array} \right\| \quad (8)$$

Основываясь на материале, приведенном во введении к настоящей работе, можно предположить, что оценка изменений, происходящих в квантовых системах при их декогеренции, может основываться на сохранении совокупной информации, «сокрытой» в структуре этой системы. Причем понятно, что сохранение информации в качественном плане, тем не менее сопровождается ее трансформацией из квантовых форм в классические. Количественной мерой такой информации является параметр, называемый «параметр чистоты», определяемый следом квадрата матрицы плотности [18].

$$I = \text{Tr}(\rho^2) \quad (9)$$

Несложный расчет показывает, что «величина информации», содержащаяся в матрице плотности (2), равна сумме квадратов ее диагональных членов:

$$a_{11}^2 + a_{22}^2 + a_{33}^2 + a_{44}^2.$$

Причем в процессе отделения от матрицы ρ_{ij} матриц плотности A, B, C их суммарная информация сохраняется по величине.

Распространяя принцип сохранения информации на акт декогеренции, можно допустить равенство параметров чистоты I для матриц A, B, C (3) и соответствующих им матриц (8). Тогда в соответствии с этим, а также используя выражение для матриц плотности (8), можно записать, что:

$$\begin{aligned} a_{11}^2 + a_{22}^2 &= A_1^4 + A_2^4 \\ a_{22}^2 + a_{33}^2 &= B_1^4 + B_2^4 \\ a_{33}^2 + a_{44}^2 &= C_1^4 + C_2^4 \end{aligned} \quad (10)$$

Правые части уравнений (10) после несложных преобразований принимают вид:

$$\begin{aligned} A_1^4 + A_2^4 &= A_1^2 + A_2^2 - 2 * A_1^2 * A_2^2 \\ B_1^4 + B_2^4 &= B_1^2 + B_2^2 - 2 * B_1^2 * B_2^2 \\ C_1^4 + C_2^4 &= C_1^2 + C_2^2 - 2 * C_1^2 * C_2^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Правая часть уравнений (11) напоминает известную формулу для расчета вероятности совместных событий [19]. Это может означать, что состояния физической системы, сформированной в следствии декогеренции квантовой системы оказываются взаимозависимыми, но из-за особенностей характерных для исходных квантовых вероятностей, которые коммутируют между собой, классические состояния также не могут проявляться в рамках одного измерения или взаимодействия с квантовым трибометром [10].

По сути, здесь подтверждается тезис, обоснованный в работах [8, 9]: «...воздействие агента измерения на квантовую систему способно одновременно «материализовать» только одно из информационного множества ее возможных проявлений...». О некоей сохраняющейся корреляционной связи (запутанности ограниченной сепарабельности) в физических системах, рассматриваемых в настоящей работе, говорит тот факт, что на единицу нормируется вся совокупность вероятностей, содержащихся в квадрате матрицы плотности (2):

$$a_{11}^2 + a_{22}^2 + a_{33}^2 + a_{44}^2 = 1 \quad (12)$$

Аналогично, по определению:

$$A_1^2 + A_2^2 = B_1^2 + B_2^2 = C_1^2 + C_2^2 = 1 \quad (13)$$

Из уравнений (10)-(13) следует, что:

$$a_{11}^2 + a_{22}^2 + a_{33}^2 + a_{44}^2 = A_1^4 + A_2^4 + C_1^4 + C_2^4 = 2 * (1 - A_1^2 * A_2^2 - C_1^2 * C_2^2) \quad (14)$$

Выражение (14) свидетельствует о том, что вся информация об исходной системе содержится в матрицах A_D и C_D . Члены уравнения (14), содержащие произведения $A_1^2 * A_2^2$ и $C_1^2 * C_2^2$, с одной стороны определяют размер последних:

$$(A_1^2 * A_2^2 + C_1^2 * C_2^2) < 1.$$

С другой стороны – указывают на возможность проявления некоторого подобия квантовых корреляций и суперпозиционных состояний, возникающих в постдекогерентной фазе эволюции физической системы.

Действительно, как отмечается в работе [20], нет никаких причин, запрещающих макроскопическим телам (внешне классическим системам) обладать «склонностями» к проявлению суперпозиционных свойств. Квантовая система, описываемая матрицей плотности B , по сути является некоторой суперпозицией подсистем с матрицами плотности A и C , поэтому возможно что выражения (10), (11), включающие вероятности B_1^2 и B_2^2 определяют характер связей типа запутанности между подсистемами постдекогерентной фазы развития исходной физической системы (трибосистемы).

Заключение

Из вышеизложенного можно сделать выводы относительно появления в следствии эффекта декогеренции классических «образов» физических объектов, например «проявленных трибосистем» [10], в соответствии с которыми:

- во-первых, очевидно, что аппарат квантовой механики в самом общем виде без привлечения каких-либо дополнительных допущений и понятий, оперируя ограниченным числом параметров и оставаясь в границах представлений об эффекте декогеренции, способен физически корректно описывать появление вещественного, классического объекта из квантового состояния;

- во-вторых, в соответствии с полученными уравнениями можно допустить, что в постдекогерентный период эволюции трибосистемы (как в прочем и любых физических систем), при замене квантовой информации на классическую, несмотря на «действие» постулата редукции волновой функции [20], благодаря присутствию в уравнениях (11)- (14) сомножителей вида $A_1^2 * A_2^2$ и $C_1^2 * C_2^2$ в этих физических системах сохраняются эффекты квантовой природы;

- в-третьих, наличие «суперпозиционных» матриц B и B_D обеспечивает физическим объектам, описываемых матрицами плотности A_D и C_D . За счет проявления квантовой запутанности, ограниченной сепарабельности, что приближает постдекогерентную физическую систему (несмотря на постоянное упоминание ее классичности) к квантовым объектам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихарев К.Н. Реально-квантовые макроскопические эффекты в слабой сверхпроводимости // УФН, 1983, Т139 №1, с. 169-184.
2. Минский М.Б. Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новая форма старых вопросов // УФН, 2000, т.170, №6, с.212-219
3. Haffner H., Hansel W., Ross C., et al. Sentable multiparticle entanglement of trapped ions// Nature 2005, v 458 p.643-646
4. Leibfried D., Knill E. et al Creation of six-atom «Shrodinger cat» State // Nature, 2005, v 433 h.639-642
5. Кузнецов В.В. Многочастичная квантовая запутанность – прорывное направление в науке // Квантовая магия, т. 8, 2011, с. 1101-1119.
6. Трибология: международная энциклопедия т.1. Исторические справки, термины, определения / ред. К.Н. Воинов-Спб.: АНИМА, 2010-176с.
7. П. Эткинс. Десять великих идей науки. Как устроен наш мир.- М.: Астрель, 2008-381с.
8. D.N. Lyubimov, K.N. Dolgoplov// Quantum Effects in Tribology. CRC Press.Taylor& Francis Group.2017, London, New York.-188p.
9. Медведев Б.В. Начала теоретической физики. – М.: Наука, 1977-496с.
10. Квантовая парадигма трибологии [Текст] : монография / Любимов Д. Н., Долгополов К. Н., Пинчук Л. С. - Ростов-на-Дону : Изд-во Южного федерального ун-та, 2013. - 204 с. : ил.; 21 см.; ISBN 978-5-9275-1176-1
11. Фок В.А., Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н., Бор Н. Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным // УФН – 1938.т.16, №4-с.436-457
12. Шварц А.С. Квантовая теория поля и топология- .: Наука 1989-400с.
13. Misner C. W., Wheeler J.A. Ann.Phys. USA -1957 vol.2 p.527
14. Черницкий А.А. Нелинейная электродинамика: сингулярные солитоны и их взаимодействие – Спб.: СПб ГИ ЭУ 2012- 360с.
15. Любимов Д.Н., Потеха В.Л. Введение в нелинейную механику трибосистем – Гродно: ГГАУ 2016- 334с.
16. Белоусов Ю.М. Матрица плотности. Применение для сптновых систем. – М; МФТИ, 2017 – 154с.
17. Менский М.Б. Явление декогеренции и теория непрерывных квантовых измерений // УФН т.168 № 9, 1998 с. 1017-1038
18. Спасский Б.И., Московский А.В. О нелокальности в квантовой физике// УФН, 1984, т.142, №4, с. 599-616
19. Гмурман В.Е. теория вероятностей и математическая статистика – М., Юрайт, 2016, 179с.
20. Минский М.Б. Сознание и квантовая механика. Жизнь в параллельных мирах – Фрязино: Век 2. 2011-320с.
21. УДК 530.145.86

Lyubimov D.N.¹, Kirilchik S.V.¹, Shchemeleva Yu. B. ¹., Yashin M.S.²

¹Southern Federal University,

Russia, Rostov-on-Don, st. Bolshaya Sadovaya, 105/42, kirilchik@mail.ru

² Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials” of the National Research Center “Kurchatov Institute”,

Russia, Moscow, Radio Street, 17

FUNDAMENTAL LAWS OF THE QUANTUM THEORY OF TRIBOSYSTEM EVOLUTION

Annotation

The aim of the work is to substantiate the fundamental basis of tribomutation processes based on the quantum mechanism of formation of the classical form of the tribosystem. For this purpose, a theoretical model was developed based on the hypothesis of P. Atkins, whose research showed that the apparatus of quantum mechanics is able to physically correctly describe the appearance of a real, classical object from a quantum state. In accordance with the obtained equations, it is assumed that when replacing quantum information with classical information, the effects of quantum nature are preserved, despite the "action" of the postulate of wave function reduction. At the same time, the postdecoherent physical system approaches quantum objects.

Keywords: wave function, density matrix, quantum entanglement, tribosystem, decoherence

УДК 531.43

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-262

М.Г. Шалыгин, А.Г. Суслов
Брянский государственный технический университет,
Брянск, Россия, migshalygin@yandex.ru

МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ НАНОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ УМЕНЬШЕНИЕ ПЕРИОДА ПРИРАБОТКИ ФРИКЦИОННОЙ ПАРЫ

Аннотация

Приведена молекулярно-механическая модель изнашивания наногеометрии (субшероховатости) поверхностей трения, основанная на теории усталостного и адгезионного разрушения поверхности. Показано, что модель адекватна в условиях установившегося износа и равновесной шероховатости. Приведена технология ускорения завершения процесса приработки.

Ключевые слова: приработка, субшероховатость, модель, износ, качество поверхности.

Введение

Развитие исследований в области трибологии и средств профилирования поверхностей деталей высокого разрешения позволяет при обеспечении износостойкости учесть микронеровности в нанометровом диапазоне (субшероховатость), сформировавшиеся в процессе приработки на фактических площадках контакта. Таким образом, как показывают результаты экспериментальных исследований поверхностей трения на износ, в период приработки целесообразно использовать модель изнашивания, основанную на геометрии шероховатости поверхности. Тогда как в период установившегося износа необходимо учитывать субшероховатость поверхности.

Методы и материалы

Теоретические исследования базировались на микро- и наногеометрии поверхностей трения, теории молекулярного и усталостного изнашивания. Экспериментальные исследования проводили на образце, изготовленном из стали