

Ф.Я. ЯКУБОВ, д-р техн. наук, Симферополь, Украина

СИНЕРГЕТИКА И ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ ТРЕНИИ И ИЗНАШИВАНИИ

Розглянуто структурно-енергетичні аспекти процесів тертя, зміцнення й зносу, що протікають взаємнообумовлено за законами синергетики в режимі самоорганізації.

Рассмотрены структурно-энергетические аспекты процессов трения, упрочнения и изнашивания, протекающие взаимообусловленно по законам синергетики в режиме самоорганизации.

The article deals with the structure and energy aspects of friction. Strengthening and deterioration processes that are interrelated and are conducted in accordance with the synergy law in way of self-organization.

Динамические процессы, сопутствующие резанию, протекают в неравновесных условиях и развиваются по законам синергетики. С этих же позиций необходимо рассматривать процессы упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента. Единство этих процессов со структурно-энергетической точки зрения проявляется в адаптации инструментального материала к энергетическому по природе упрочняющему или разрушающему воздействию, объединяемых единым понятием – структурная приспособляемость или самоорганизация.

Самоорганизация является фундаментальным явлением природы. Первоначально процессы самоорганизации относили исключительно к биологическим системам, но по мере накопления знаний область их проявления была рассмотрена и применительно к неживой природе. Суть этого явления заключается в том, что под действием внешнего возмущения любая термодинамически открытая нелинейная система перестраивается таким образом, что ее ответная реакция максимально компенсирует вызвавшую такое внутреннее изменение причину. В живой природе процессы самоорганизации проявляются в приспособлении и эволюции биологических объектов к меняющимся внешним условиям. В технике и технологии процессы самоорганизации наиболее ярко проявляются при трении, в частности, при формировании вторичных контактных структур и изнашивании [1-7].

Процессы трения и изнашивания реализуются на фоне повышенных градиентных соотношений температуры, напряжений, концентрации легирующих элементов и дефектов кристаллического строения и представляют сложную совокупность физико-химических явлений. Трение и изнашивание, без сомнения, можно отнести к неравновесным

термодинамическим процессам, поэтому самоорганизующиеся реакции, протекающие в них, неизбежны и обязательны.

Внутренним проявлением самоорганизации при трении являются следующие процессы:

- формирование вторичных структур с иной, в пределе более высокой прочностью и износостойкостью, по сравнению с исходной;
- развитие равновесной шероховатости независимо от исходной микрогеометрии поверхностей трения;
- повышение фактической площади контакта за счет прирабочного износа и, как следствие этого, снижение контактных нагрузок; реализация эффекта избирательного переноса и т. п.

Внешним проявлением самоорганизации является снижение и стабилизация практически всех энергетических, силовых и триботехнических параметров процесса трения и изнашивания, в частности коэффициента трения, температуры, интенсивности изнашивания и т. п.

Общие закономерности самоорганизации удобно анализировать с позиций системного подхода, суть которого заключается в следующем [8, 9].

Под триботехнической системой понимают совокупность твердотельных и жидкофазных объектов, взаимодействующих между собой контактно-механическим способом, при этом в зонах контакта осуществляется взаимный энергомассоперенос. Образующаяся при разрыве линейных скоростей взаимодействующих тел трибосистема называется внешней, а при наличии плавного градиента линейных скоростей — внутренней. Элементарные трибосистемы состоят из двух объектов. К ним можно отнести узлы трения качения и скольжения, работающие без смазки; взаимодействие поверхности с сухой абразивной массой; взаимодействие инструмента с обрабатываемым материалом при резании всухую и т. п. Сложные трибосистемы дополняются активной внешней средой, смазочно-охлаждающими веществами и искусственно вводимыми источниками энергий.

Любая система разбивается на подсистемы более высокого порядка. Так, триботехническую систему можно разбить на подсистемы контактного взаимодействия, объединенные по режимным, структурным, геометрическим и другим признакам родства. Они, в свою очередь, состоят из подсистем еще более высокого порядка, в рамках которых реализуются микроструктурные процессы, включая массоперенос.

Функционирование подсистемы любого уровня (порядка) можно описать уравнениями энергодбаланса и кинетики, отображающими взаимодействие входящих в данную подсистему компонентов и их внутреннее структурно-энергетическое состояние. В результате взаимодействия компонентов подсистемы часть энергии затрачивается на изменение характера их поведения, а другая часть — на изменение их внутреннего состояния.

Последняя представляет энергию, потерянную для изменения кинетики взаимодействия компонентов подсистемы между собой, но она является основной составляющей энергобаланса подсистемы следующего более высокого уровня (порядка). Подсистемы каждого уровня характеризуются своими наиболее информативными энергетическими параметрами в абсолютных, удельных, градиентных и других соотношениях, используемых для описания энергетических балансных и кинетических уравнений, отображающих первое и второе начала термодинамики. Объединение энергетических соотношений, отображающих функционирование подсистем разных уровней, допустимо, но не целесообразно из-за наличия в одном уравнении величин разных порядков, поэтому каждую подсистему независимо от ее уровня необходимо описывать своим термодинамическим уравнением. Подсистемы низкого уровня описываются уравнениями энергобаланса в абсолютных величинах или их потоках, подсистемы высоких уровней — плотностями энергетических потоков, а подсистемы более высоких порядков — удельными энергетическими параметрами или их градиентными выражениями.

Рассматривая процессы трения и изнашивания, к подсистеме первого уровня отнесем взаимодействие сопряженных деталей как материальных объектов с четкими геометрическими границами, однородными физико-механическими свойствами, с известными законами внешнего нагружения и движения каждой точки и, следовательно, заданным разрывом линейных скоростей в трибосистеме. Отдельное триботехническое сопряжение представляет индивидуальную подсистему первого порядка.

К подсистемам второго уровня (порядка) можно отнести зоны фрикционных взаимодействий на реальных участках контакта. Число подсистем второго уровня соответствует количеству пятен фактического контакта. Геометрические границы взаимодействующих объектов данных подсистем определяются зоной, охваченной структурно-энергетическими изменениями. В большинстве случаев предельные положения границ можно ограничивать глубиной пластических деформаций, численные размеры которых с достаточной степенью точности определяются экспериментально-теоретическими методами, например, по глубине изменения микротвердости, эпюре остаточных напряжений и т. п.

К подсистеме третьего уровня отнесем микрообъем контактной и приконтактной зоны, охваченной структурно-энергетическими изменениями трибопроцесса. В отличие от подсистем первого и второго уровня, предусматривающих взаимодействие как минимум двух твердофазных

объектов, компонентом подсистемы третьего порядка является одно твердофазное образование, эволюция структуры которого происходит за счет пронизывающих его потоков энергии и вещества. Численность подсистем третьего уровня может быть бесконечно большой, поэтому для анализа процесса необходимо выделять наиболее типичные варианты. В большинстве случаев достаточно рассмотрения структурных изменений на поверхности контакта и в близлежащих приконтактных зонах.

Эволюция самоорганизующихся систем представляет кинетический процесс, заканчивающийся либо ее полной деградацией (разрушением), либо выходом на принципиально отличное от исходного состояния положение устойчивого или неустойчивого динамического равновесия [8,9,10]. Направление течения процесса самоорганизации определяется критерием Пригожина-Гленсдорфа, который представляется в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} \leq 0 \quad (1)$$

где P — производство энтропии, t — время процесса.

Согласно этому критерию в любой неравновесной системе самопроизвольные процессы идут так, что скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил, уменьшается. Стационарные, или устойчивые, термодинамические процессы характеризуются минимальным производством энтропии. В случае открытости термодинамической системы возможно производство негэнтропии за счет обмена с внешней средой энергией и массой. Таким образом, критерий Пригожина-Гленсдорфа отражает естественное стремление любого кинетического процесса идти по пути наименьших энергетических потерь и он приложим к эволюционному анализу любой трибосистемы независимо от порядка уровня.

Применительно к процессу трения устойчивые, или стационарные, состояния в подсистеме первого уровня проявляются в стабилизации силовых и температурных параметров при выходе в зону установившегося периода. В подсистемах второго уровня устойчивость связывается с формированием «равновесной» шероховатости трущихся тел, снижением силовых и тепловых удельных нагрузок за счет увеличения фактической площади контакта. В этих процессах особая роль отводится приработочному изнашиванию, приводящему к оптимизации микрорельефа контакта [2, 6, 14]. В подсистемах третьего уровня устойчивость проявляется в виде процесса формирования вторичных диссипативных структур Π

Уравнение энергетического баланса для подсистемы первого уровня представляется в абсолютных энергетических величинах или их потоках, а именно:

$$\left(\overline{F} \cdot \overline{V}_c\right) \cdot t = W + \Pi \quad (2.1)$$

или

$$\left(\overline{F} \cdot \overline{V}_c\right) \cdot t = Q + \Pi^* \quad (2.2)$$

где F — усилие контактного взаимодействия; V_c — скорость скольжения; W — количество тепла, выделившееся в процессе контактного взаимодействия; Π — механическая составляющая энергодобавки трибосопряжения; Q — тепловой поток; Π^* — поток механической энергии. Последние слагаемые уравнений (2.1; 2.2) представляют энергетические затраты на поверхностные структурные изменения и их изнашивание. В абсолютном выражении они не превышают 1,5...3,0 % от работы трения и могут быть опущены, тогда уравнения (2.1; 2.2) примут вид:

$$\left(\overline{F} \cdot \overline{V}_c\right) \cdot t = W \quad (3.1)$$

$$\overline{F}_{mp} \cdot \overline{V}_c = Q \quad (3.2)$$

Полученные уравнения отражают баланс между работой трения и выделенным теплом (или процесс диссипации подводимой механической энергии) и используются при решении тепловых задач трибоники.

Согласно универсальному критерию эволюции Пригожина-Гленсдорфа в неравновесной системе с фиксированными граничными условиями процессы идут в направлении уменьшения скорости производства энтропии. Следовательно, развитие подсистемы первого порядка должно идти по пути выполнения условия:

$$\frac{\delta Q}{T} \rightarrow \min \quad (4.1)$$

или

$$\frac{\delta F \cdot V}{T} + \frac{\delta V \cdot F}{T} \rightarrow \min \quad (4.2)$$

где T — средняя абсолютная температура процесса трения.

На рисунке 1 представлены обобщенные кинетические зависимости силовых и тепловых параметров трения [4, 13, 14,]. Приращение производства энтропии δP определяет режим функционирования трибосистемы. Прирабочный период характеризуется снижением δP , установившийся — стабилизацией, а катастрофическое изнашивание — резким возрастанием.

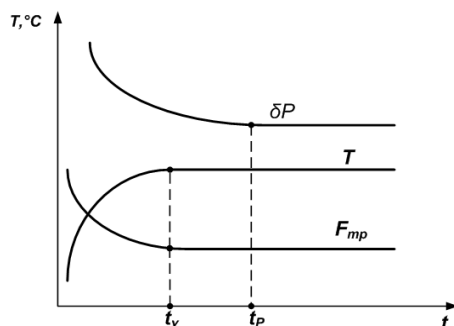


Рисунок 1 – Обобщенные кинетические зависимости силовых и тепловых параметров трения: T – температура; F_{mp} – сила трения; δP – приращение энтропии

Контактное взаимодействие при трении с энергетической точки зрения можно представить как совокупность процессов взаимодействия поверхности с потоком механической энергии, закон распределения которой на плоскости трения адекватен эпюрам касательных напряжений и относительных скоростей скольжения. В результате действия таких источников происходит изменение внутреннего структурно-энергетического состояния контактных слоев и микрогеометрии контакта, при этом большая часть потока механической энергии трансформируется в тепло. Недиссипативная составляющая механической энергии расходуется на формирование вторичных структур и совершение работы износа.

С энергетической точки зрения это проявляется в изменении химического потенциала вторичных структур и совершении работы диспергирования.

Термодинамика подсистем второго уровня рассматривает балансные соотношения, отображающие трансформацию недиссипативной части потока механической энергии, которые представляются в виде

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial M \partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 A_{узн}}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 W}{\partial M \partial t} \quad (5)$$

где Π_i — внутренняя энергия; $A_{узн}$ — работа износа; M — масса взаимодействующих объектов контактного взаимодействия.

Процесс поглощения (или выделения) упругой внутренней энергии контактными слоями характеризуется высокой активностью в начальный момент фрикционного взаимодействия или в период приработки, а по завершению этого этапа его интенсивность падает до нуля. Всплески активности поглощения упругой энергии периодически происходят по мере раскрытия новых контактных слоев за счет изнашивания. Следовательно, в установившемся процессе трения энергетические затраты на формирование вторичных структур становятся величинами более низкого порядка по сравнению с остальными слагаемыми уравнения (5). Тогда уравнение энергетического баланса подсистемы второго уровня при установившемся процессе изнашивания примет вид:

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial M \partial t} = \frac{\partial^2 A_{\text{изн}}}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 W}{\partial M \partial t} \quad (6)$$

Внешним проявлением самоорганизации в подсистемах второго уровня является стабилизация интенсивности изнашивания (рис. 2), которая устанавливается в последнюю очередь после полной стабилизации всех силовых, тепловых и микрогеометрических параметров трибосопряжения. Появление любого возмущающего фактора в трибосистеме приводит к дестабилизации интенсивности изнашивания.

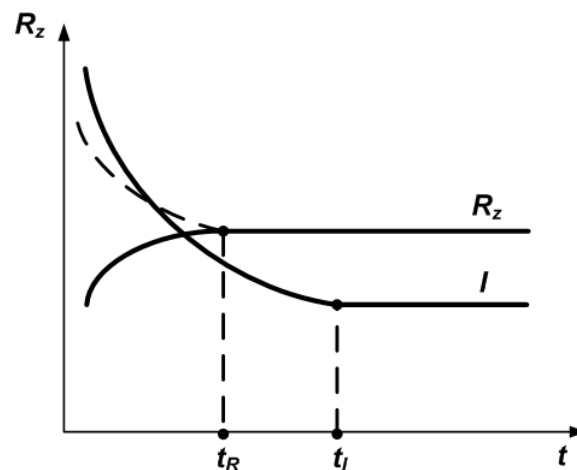


Рисунок 2 – Обобщенные кинетические зависимости шероховатости (R_z) интенсивности изнашивания (I) поверхности трения

Выше отмечалось, что в отличие от подсистем первого и второго уровней подсистема третьего порядка состоит из одного твердофазного объекта, пронизываемого потоками энергии и вещества, под действием которых реализуются процессы микроструктурных преобразований и формируются частицы разрушения. Единичная подсистема третьего уровня по сути представляет элементарный микрообъем, выделенный в

интересующей области контактной или приконтактной зоны, для которой потеря внутренней энергии за счет уноса частицы износа составляет величину одного порядка с самой ее внутренней энергией. С практической точки зрения наибольший интерес представляют структурные изменения, происходящие в плоскости трения, поэтому все особенности функционирования подсистемы третьего уровня рассмотрим для этого случая.

Термодинамика подсистемы третьего уровня отражает процесс трансформации нетепловой составляющей внешнего потока механической энергии в необратимые энергетические потери и внутренние структурно-энергетические преобразования, происходящие в контактных слоях при трении. В обобщенном варианте этот процесс можно представить следующей функциональной схемой.

Вся подводимая механическая энергия поглощается поверхностным слоем трущегося тела в виде упругой энергии деформации. В результате контактные структуры переходят в неравновесное состояние. Параллельно с этапом поглощения упругой внутренней энергии начинается ее трансформация в другие энергетические формы (например: в акустическую, магнитную, электрическую, тепловую и т. п.). Все возможные энергетические формы можно разделить на два вида - обратимые и необратимые. Необратимые — это такие виды энергий, которые в своем развитии достигли такого состояния, при котором потенциально невозможна их дальнейшая трансформация в другие формы. Они не могут быть задействованы в процессах преобразования структур и безвозвратно покидают подсистему, рассеиваясь в окружающей среде. К таким видам в первую очередь можно отнести тепловую, акустическую и световую энергии. Необратимые энергетические формы являются доминирующими во всех триботехнических и деформационных процессах [2, 15, 16]. Обратимые — это такие энергетические формы, которые не достигли состояния полного вырождения и обладают потенциальными возможностями для преобразования в другие энергетические виды. Они контролируют процессы структурных преобразований и в своей дальнейшей эволюции приближаются к необратимым формам. Следовательно, большая часть обратимых энергетических форм находится в кинетическом состоянии как промежуточная стадия между подводимой механической энергией и ее вырожденными или необратимыми видами. Лишь незначительная доля обратимых энергетических форм может относительно долго находиться в устойчивом состоянии, и именно они определяют свойства вторичных, в том

числе диссипативных структур. Они же управляют процессами массопереноса внутри подсистемы третьего уровня.

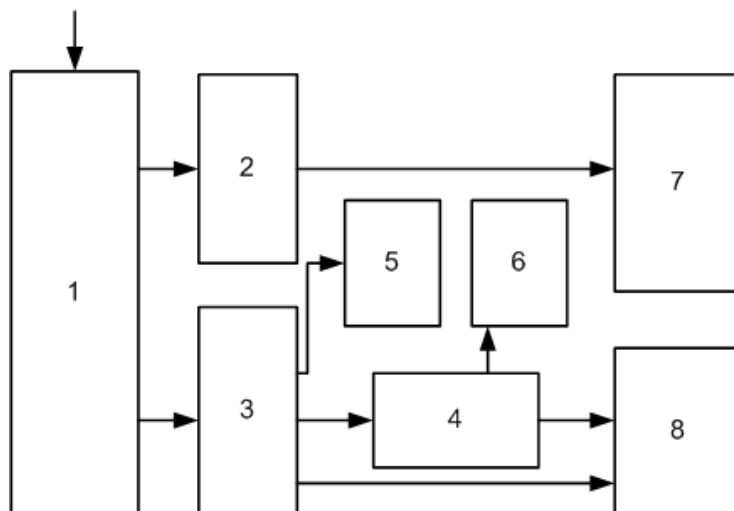


Рисунок 3 – Структурная схема трибосистемы третьего уровня: 1 — поглощенная упругая энергия деформации; 2—необратимые энергетические формы;

3—обратимые энергетические формы, 4 — внутренний микроструктурный массоперенос; 5 — энергетические затраты на разрушение (износ); 6 — продукты разрушения (износа); 7 — необратимые энергетические потери, 8 — вторичные диссипативные структуры

Энергомассоперенос в подсистеме третьего уровня инициируется градиентными соотношениями температур, напряжений, химического потенциала и т. п. Направление энергомассопереноса противоположно вектору градиента химического потенциала, поэтому по ходу развития Процесса происходит его снижение. Следовательно, энергомассоперенос, реализуемый в подсистеме третьего уровня, представляет одну из форм диссипации поглощенной механической энергии. Убыль массы за счет микроразрушения (износа) относится также к диссипативному явлению, так как внутренняя энергия, унесенная частицами износа, и энергетические затраты на совершение работы изнашивания необратимо покидают подсистему третьего уровня. Схематично процесс энергетических преобразований в подсистеме третьего уровня представлен на рисунке 3. Рассмотрим кинетику основных процессов.

Итак, основной формой диссипации поглощенной внутренней энергии является тепловыделение. При наличии «идеальной» диссипативной структуры будет иметь место полный баланс между поглощенной внутренней энергией и выделенным теплом. Процесс трансформации подводимой внешней энергии будет реализовываться по схеме «внешнее

энергетическое воздействие — необратимые энергетические формы — тепло». Такой термодинамический цикл относят к установившемуся режиму трения с минимальной интенсивностью изнашивания, энергетические затраты на который практически равны нулю. При нарушении баланса, когда внешнее энергетическое воздействие будет превышать производство тепла, часть поглощенной энергии начнет накапливаться в контактных слоях и трансформироваться в другие недиссипативные формы. Эта цепочка энергетических превращений будет совершаться до тех пор, пока поглощенная внутренняя энергия не выродится в диссипативный вид и восстановится баланс между подводимой энергией и выделенным теплом. Следовательно, подсистема третьего уровня функционирует только при возникновении дисбаланса между подводимой энергией и произведенным теплом, который появляется в момент внешних энергетических возмущений или при наличии энергетического воздействия кинетического характера. Трибосопряжение по существу представляет автоколебательную систему из-за дискретности пятен фактического контакта и особенностей деформационно-пластических процессов в контактных слоях, поэтому возмущения кинетического характера всегда сопровождают процессы трения и изнашивания. Энергетические процессы трибоконтakta представляют взаимодействие нестационарных энергетических потоков в начальный момент и квазистационарных — в установившийся период работы узла трения, поэтому теоретически подсистема третьего уровня функционирует постоянно, но с разной степенью активности.

Трансформация дисбалансной составляющей (или поглощенной упругой энергии деформации) в общем случае протекает по следующей схеме: «скрытая энергия деформации — внутренний микроструктурный энергоперенос — внешний массоперенос (изнашивание)». Напомним, что внутренний энергоперенос, происходящий в подсистеме третьего уровня, контролируется градиентными соотношениями температур, упругих напряжений, концентраций легирующих элементов и дефектов кристаллического строения, которые в совокупности определяют градиент концентрации внутренней энергии (градиент химического потенциала). Учитывая, что направление внутреннего микроструктурного энергопереноса противоположно вектору градиента химического потенциала и по мере реализации процесса приводит к его снижению, интенсивность самого энергопереноса со временем падает. Таким образом, внутренний микроструктурный

энергомассоперенос представляет одну из форм вырождения упругой энергии деформации или ее диссипацию.

Если подсистема третьего уровня не в состоянии перевести избыточную внутреннюю энергию в диссипативный вид с помощью внутреннего микроструктурного энергомассопереноса, то она избавляется от нее путем внешнего массопереноса или микроразрушения материала. Отсюда следует, что изнашивание представляет эффективный способ «сброса» избыточной внутренней энергии путем отторжения от подсистемы третьего уровня микрочастиц износа с избыточной концентрацией химического потенциала. Изнашивание является наиболее радикальным способом восстановления баланса между подводимой внешней энергией и ее диссипативными видами. При изнашивании диссипативный процесс включает убыль внутренней энергии частицами износа и энергетические затраты на совершение работы образования новых поверхностей (диспергирование). Изнашивание и сопутствующие ему процессы структурных превращений частиц износа представляют диссипацию упругой энергии деформации в необратимые для данной подсистемы формы, хотя по своей физической природе эти энергетические состояния еще имеют потенциальные возможности дальнейшей деградации до теплового уровня.

Уравнение, описывающее процесс диссипации внутренней энергии, представляется в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = B^* \frac{\partial \mu}{\partial n} + a_u \frac{\partial M}{\partial t} \quad (7)$$

где μ — химический потенциал материала; n — перемещение в направлении максимального градиента химического потенциала; B^* — коэффициент энергомассопереноса (по аналогии с коэффициентом диффузии и коэффициентом теплопроводности); a_u — удельная работа изнашивания.

Выражение (7) с физической точки зрения представляет уравнение переноса, при этом первое слагаемое описывает процессы энергомассопереноса, реализуемые за счет градиентных соотношений, в частности диффузионный массоперенос и теплопроводность, а второе — конвективный массоперенос или поверхностное разрушение.

Уравнение (7) можно преобразовать:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{a_u} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - B^* \frac{\partial \mu}{\partial \eta} \right) \quad (8)$$

Из (8) следует, что изнашивание можно снизить как за счет уменьшения внешнего энергетического воздействия, так и интенсификации внутреннего энергопереноса.

Выводы. Трение, упрочнение и изнашивание относятся к неравновесным термодинамическим системам, протекают по законам синергетики и самоорганизующиеся процессы, как следствие их взаимообусловленности, неизбежны. Внешним проявлением самоорганизации является стабилизация всех энергетических, силовых и триботехнических параметров процесса трения и изнашивания при выходе в зону установившегося периода. Внутренним проявлением самоорганизации является развитие «равновесной» шероховатости трущихся тел, снижение силовых и тепловых удельных нагрузок за счет увеличения фактической площади контакта, формирование вторичных структур с иной, в пределе более высокой, прочностью, по сравнению с исходной.

Список использованных источников: 1. *Бершадский Л.И.* Основы теории структурной приспособляемости переходных состояний трибосистемы и ее приложение к задачам повышения надежности зубчатых и червячных передач: Дисс. на стиск. уч. ст.. д-ра. техн. наук. – Киев, 1982 2. *Карасик И.И.* Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. – М.: Наука, 1978. – 135 с. 3. *Ким В.А., Якубов Ф.Я.* Влияние структурной приспособляемости инструмента на его стойкость // Сб. трудов Уфимского авиационного института «Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов». – Уфа, 1983. – С. 92–96. 4. *Костецкий Б.И.* Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. – Минск, 1985. – Т. VI. – № 2. – С. 201–212. 5. *Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 128 с. 6. *Якубов Ф.Я.* Пути повышения стойкости металлорежущих инструментов на основе анализа термодинамики контактных процессов: Дисс. на стиск. уч. ст.. д-ра. техн. наук. – Ташкент–Тбилиси, 1984. – 400 с. 7. *Якубов Ф.Я., Ким В.А., Тимофеев С.М.* К термодинамике упрочнения и изнашивания режущего инструмента // Резание и инструмент в технологических системах. – Вып. 50. – Харьков: ХГПУ, 1996. – С. 211–216. 8. *Ханин М.В.* Механическое изнашивание материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 152 с. 9. *Чихос Х.* Системный анализ в трибонике: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 352 с. 10. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. – 280 с. 11. *Naken H.* Encyclopedia of Physics Laser Theory Spriger/ – Berlin; Heidelberg; New York, 1970. Vol. 25. – 440 p. 12. *Буше Н.А., Копытко В.В.* Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 128 с. 13. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с. 14. *Мур Д.* Основы трибоники: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 488 с. 15. *Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К., Костецкая Н.Б.* Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: Техника, 1976. – 292 с. 16. *Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К.* Физические основы пластической деформации. – М.: Metallurgy, 1982. – 584 с.