

MATHEMATICAL MODELLING OF HYDRODYNAMIC LUBRICATION OF COLLAPSIBLE TAPERED BEARING WITH POROUS LAYER ON ITS FUNCTIONAL SURFACE

S.I. Zaderiyenko

On the basis of navier-stokes non-stationary non-linear equations for cases of «thin layer» and darcy equation using the structural supposition principle the method of hydrodynamic calculation of collapsible tapered bearing reference nodes of armament and military materiel has been developed. the estimate of the taper and length angle of porous component on the basic performance characteristics of the bearing has been made.

Keywords: armament and military materiel, hydrodynamic lubrication, tapered bearing, porous layer.

УДК 621.891:621.316

В.В. Запорожец¹, В.Н. Стадниченко¹, О.Н. Трошин², Н.Г. Стадниченко², Р.Н. Джус²

¹Национальный авиационный университет, Киев

²Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

О МЕХАНИЗМАХ ПОДВИЖНОСТИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СЛОЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

В статье предпринята попытка более подробно описать и раскрыть механизм безыносного трения металлокерамического слоя при использовании технологий триботехнического восстановления. Описана физическая картина диссипации внешней энергии при условии подвижности этого слоя, предложена физико-статистическая модель динамики его деформирования.

Ключевые слова: металлокерамический слой, металлокерамическое покрытие, технологии триботехнического восстановления, безыносное трение, диссипация внешней энергии, трибовосстанавливающий состав, эффективный объем взаимодействия.

Вступление

Наибольший финансовый эффект связанный с прогрессом в области машиностроения, в том числе и в интересах военно-промышленного комплекса, обусловлен снижением затрат на обслуживание и ремонт, которые поглощают весьма значительную и с каждым годом все возрастающую долю национального дохода промышленно развитых стран. Например, в США на ремонт промышленного оборудования в 1966 г. было израсходовано 16 млрд дол., в 1977 г. – свыше 20 млрд дол., в 1990 г. – уже свыше 39 млрд дол., а в 2007 г. – более 80 млрд дол. [1]. Исходя из вышеизложенного, следует признать актуальность и перспективность разработки новых и совершенствования существующих технологий в этом направлении.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время достаточно широко распространились технологии по восстановлению ресурса механизмов и машин, которые включают способы обработки трущихся поверхностей без их разборки и прекращения эксплуатации – так называемые технологии триботехнического восстановления (ТТВ). Наибольшее распространение получили такие, как «РВС», «Nanoprotex» Россия и «ХАДО» Украина

[1]. Дальнейшим развитием этой технологии является разработка трибовосстанавливающей смеси «Комбат» [2].

Данная технология образования металлокерамического (МК) слоя на поверхностях контакта трибосистем (ТС) включает в себя приготовление восстановительной смеси, ее подачу в зону трения посредством рабочей жидкости (смазочной среды), приработки пары трения. Трибовосстанавливающий состав (ТВС) готовят на основе минеральных веществ и соединений или их смесей, которые содержат оксид кремния в метастабильном состоянии, и катализаторов (табл.).

Таблица

Состав ТВС «Комбат»

Al ₂ O ₃	SiO	Fe	K	Ca	Ti	Cl	S	P
44,5	52,7	0,96	0,52	0,11	0,39	0,04	0,02	0,04

Изготовление ТВС осуществляют в два этапа. Сначала готовят первую часть упомянутой смеси на основе минеральных веществ и соединений, которые содержат оксид кремния и оксид алюминия в метастабильном состоянии, потом готовят вторую часть смеси на основе катализаторов, в качестве последних используют катализаторы металлических мыл, причем упомянутая первая часть составляет 30...45% масс. ед. от общей массы ТВС,

измельчение исходных продуктов выполняется методом криодиспергирования, разработанным в Институте проблем машиностроения АН Украины с последующей подачей ТВС в зону трения. В процессе работы трибосистемы с ТВС в течении 4...6 часов на поверхностях трения образуется МК слой, который обуславливает в процессе дальнейшей работы практически безыносное трение. Принципиальным отличием модифицированного поверхностного слоя, который создается на поверхностях трения, в рамках ТТВ является аморфное строение, имеющее высокие упругопластические свойства, обуславливающие его подвижность [2].

Однако до настоящего времени механизм безыносного трения МК слоя с условием его подвижности в ТТВ остается малоизученным.

Цель и постановка задачи

Экспериментальные исследования трибосистем с образовавшимся МК слоем, проведенные на автоматизированной системе трибодиагностики [3], позволяющей регистрировать в одном временном масштабе момент трения, толщину граничного слоя и скорость изнашивания в относительных информационных единицах [3], выявили следующие особенности:

1. После образования МК слоя в режиме нормального трения скорость изнашивания уменьшается практически до нуля, однако наблюдаются периодические колебания момента трения в диапазоне до 10% от среднего значения, которые не наблюдались при трении без МК слоя.

2. Аналогичные колебания, но с большей амплитудой, наблюдаются для толщины граничного слоя. Величина амплитуды колебаний составляет до 40% от среднего значения.

Диссипация внешней подводимой энергии при трении в данной ТС происходит за счет упругопластических циклических деформаций МК слоя в контактной области, что и обуславливает практическую безыносность ТС.

Такое поведения МК слоя может быть объяснено высокими упругопластическими свойствами, характерными для материалов с аморфной структурой. Для объяснения высоких противоизносных свойств МК слоя предложена математическая модель контактного взаимодействия в поле действующих сил, названная нами моделью «Бегущей волны» (рис. 1), в которой динамика движения МК слоя в эффективном объеме взаимодействия состоит из двух стадий: сцепления с образованием волны в контактной области и ее выравнивания при проскальзывании. Для упрощения моделирования рассматриваем только поведение МК слоя, который образуется на

поверхности подвижного образца, но не рассматриваем роль смазочного материала, который находится в контактной области.

Это разделение играет фундаментальную роль для понимания ряда закономерностей трения и изнашивания узлов трения, обработанных ТВС «Комбат». В рассматриваемой физико-статистической модели динамики деформирования МК слоя существует два состояния контакта: сцепление и проскальзывание. Состоянию сцепления будет соответствовать смещение центра эффективного объема взаимодействия МК слоя как целого и его деформация (рис. 1 а). Молекулярное взаимодействие на эффективной границе в точках фактического контакта отвечает величине силы трения, при которой наступает проскальзывание в контактной области с восстановлением первоначального состояния (рис. 1 б). В этой связи можно поставить следующие вопросы, представляющие интерес для выяснения связи между элементарной схемой контактирования МК слоя в эффективном объеме взаимодействия и той моделью, которая будет рассмотрена далее.

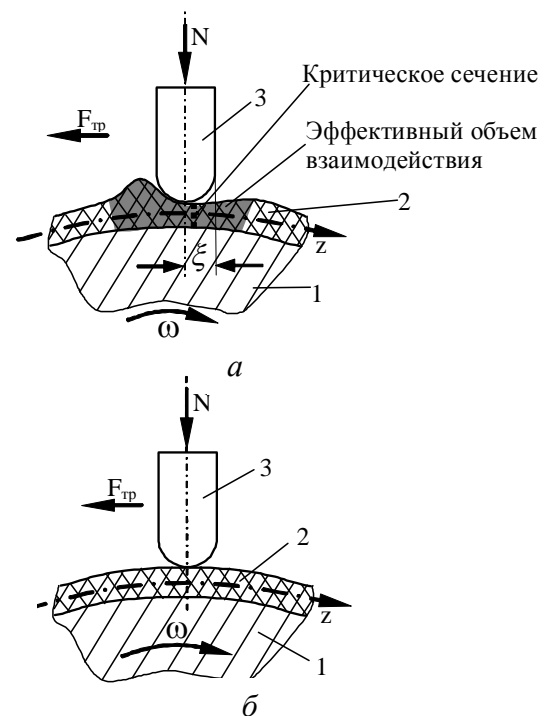


Рис. 1. ТС с МК слоем: а – сцепление с образованием волны в контактной области; б – выравнивание слоя при проскальзывании, где: 1 – подвижный образец; 2 – МК слой; 3 – неподвижный образец; ξ – величина смещения слоя при проскальзывании

1. Какая простейшая вероятностная схема может быть поставлена в соответствие дискретной двустадийной модели и содержит ли она в связи с этим стационарные решения, отражающие

устойчивое состояние процесса трения и изнашивания при достаточно большом интервале времени?

2. В каком смысле применимо представление эффективного объема взаимодействий (или контакта в состоянии сцепления) в виде некоей квазичастицы, описываемой стохастическим уравнением движения, и как это представление может быть связано с динамикой первичного (дискретного) случайного процесса?

3. В каком смысле возможно использовать функции Ланжевена для характеристики относительной частоты некомпенсированных тангенциальных смещений, в том числе тех, которые могут порождать частицы износа?

Изложение материалов исследования

Наиболее естественное решение первого вопроса вытекает из рассмотрения движения эффективного объема как марковского процесса с двумя дискретными состояниями, в частности, «двухсторонней реакции», предполагающей в системе возможность только перехода $1 \leftrightarrow 2$ (1 – состояние x_k – восстановление, 2 – состояние x_j – распад), например, деформации и восстановления первоначальной формы эффективного объема взаимодействия МК слоя.

Для указанного процесса справедливо уравнение А.Н. Колмогорова [4]

$$\frac{\partial p_1(t_1, x_k)}{\partial t} = \sum_i A_{jk}(t) p_1(t_1, x_j), \quad (1)$$

где $p_1(t_1, x_k)$ – одномерная вероятность состояния;

$$A_{jk} = \left[\frac{\partial p(u_1, x_k / t_1, x_j)}{\partial u} \right]_{u=t}; \quad P(u_1, x_k / t_1, x_j) -$$

вероятность перехода из состояния x_k в состояние x_j , так что с учетом нормировки $A_{jk}(t) \geq 0 (j \neq k)$;

$$A_{ij}(t) = -\sum_{k \neq 1} A_{jk} \leq 0; \quad \sum_k A_{jk}(t) = 0.$$

Вводя обозначения $p_1(t, I) = p_1(t)$ – вероятность существования в системе состояния 1 (восстановление), считая процесс однородным во времени и α, β постоянными величинами: $A_{12} = \alpha$; $A_{21} = \beta$; $\alpha + \beta = \lambda$, где $\alpha \partial t$; $\beta \partial t$ – вероятности переходов $1 \leftrightarrow 2$ (распад) и $2 \leftrightarrow 1$ (восстановление) за время ∂t , уравнение (1) можно записать в виде системы

$$\begin{cases} \frac{\partial P_1}{\partial t} = -\alpha P_1 + \beta P_2 \\ \frac{\partial P_2}{\partial t} = -\alpha P_1 - \beta P_2 \end{cases}. \quad (2)$$

Решая уравнение (1) при начальном условии $t=0, p_1=1$ (восстановление), получим

$$P_1(t) = e^{-\lambda t} + \beta/\lambda (1 - e^{-\lambda t}), \quad (3)$$

$$P_2(t) = \beta/\lambda (1 - e^{-\lambda t}). \quad (4)$$

Двухстадийная модель отождествляет состояние 1 (восстановление) с контактом, находящимся в состоянии сцепления, а состояние 2 (распрямившаяся волна) – с контактом в состоянии проскальзывания (3) и (4). Их можно трактовать как вероятности нахождения контактов в указанных состояниях или как относительные числа таких контактов, находящихся в системе в каждый момент времени t .

Таким образом, на первый вопрос относительно стационарности (и, следовательно, эргодичности) модели можно ответить утвердительно, поскольку выражения (3) и (4) при $t \rightarrow \infty$ содержат стационарные решения: $p_1(\infty) = \beta/\lambda$; $p_2(\infty) = \beta/\lambda$.

Так как вероятность $p_1(t)$ пропорциональна числу контактов, находящихся в состоянии сцепления (если ввести элементарную силу трения сцепления, приходящуюся на один контакт), то выражение (3) аналогично зависимости силы трения покоя F_{mp} (и коэффициента трения f) от продолжительности неподвижного контакта, установленной И.В. Крагельским:

$$T = T_\infty - (T_\infty - T_0) e^{-\nu t} = T_0 e^{-\nu t} + T_\infty (1 - e^{-\nu t}), \quad (5)$$

где T_∞ – сила трения, соответствующая бесконечно продолжительному контакту; T_0 – сила трения при нулевом времени контакта.

Зависимость (4) существенна для объяснения явления скачков при трении В.В. Лаврентьевым [5]. Получено уравнение, подобное (5), для площади фактического контакта высокоэластичных полимеров, исходя из простых вероятностных соображений.

В тесной связи с двухстадийной моделью дана вероятностная интерпретация скоростной зависимости силы отрыва ползуна от поверхности вращающегося диска в условиях граничной смазки, в этом случае молекулярное взаимодействие поверхности МК слоя может возникнуть в результате образования либо прямых, соответствующих, например, концам групп цепных молекул, либо боковых связей, отвечающих боковым частям молекул смазочного материала.

Для относительного числа (вероятности) P связей, существующих в системе (и разрываемых в момент отрыва ползуна от поверхности диска) при данной скорости скольжения ν можно записать

$P = P_{01}e^{\alpha v} + P_{02}(1 - e^{-\beta v})$, где P_{01} , P_{02} – относительное число прямых и боковых связей при $v=0$, $v=\infty$ соответственно; α , β – коэффициенты.

Из сравнения (5) с (3) после перехода к коэффициенту трения f следует $f_{\infty} = \frac{\beta}{\lambda} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$.

Уравнение (4) относится к силе трения движения. При числе состояний модели больше двух (например: сцепление, деформирование поверхностного слоя по линии контакта, проскальзывание, восстановление исходной формы и многократное повторение этого же цикла) уравнение (1) может содержать и колебательные решение, что, безусловно, должно сопровождаться уменьшением силы трения.

Ответ на второй вопрос, поставленный в начале статьи, связан с четким различием масштабов усреднений возможных в системе контактов с учетом реальной шероховатости поверхности МК слоя.

Вначале имеем дискретную последовательность импульсов силы трения со случайными амплитудами α_v и моментами возникновения t_v , отвечающую элементарным смещениям взаимодействующих микроскопических зон трущихся поверхностей. На основе этой системы импульсов, аппроксимируемых, например, δ -импульсами, можно построить непрерывную случайную функцию $x(t)$ и соответствующий ей случайный процесс путем усреднения по достаточно крупным интервалам времени $\partial t'$, большим, чем между отдельными элементарными импульсами:

$$x(t) = \int \sum_v \alpha_v \delta(t' - t) \partial t'. \quad (6)$$

Физически это соответствует фиксированию результирующих смещений на достаточно больших микроучастках поверхностей трения. В свою очередь, этот усреднённый по интервалам времени случайный процесс аппроксимируется Марковским, т.е. предполагается, что его функция распределения $v(t_1 x / t_0 x_0)$ описывается уравнением Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial A(x_1 t) v}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B(x_1 t) v}{\partial x^2}, \quad (7)$$

где A , B – коэффициенты.

Далее вводим условное среднее $\bar{x}(t)$ по смещениям, но уже для процесса (6), с предположением, что в момент t_0 $\bar{x} = x_0$:

$$\bar{x}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x v(t_1 x / t_0 x_0) dx.$$

Строим феноменологическое уравнение движения

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A v dx = A(\bar{x}_1 t) \quad (8)$$

путем умножения уравнения (6) на x и интегрирования по x в пределах от $-\infty$ до ∞ , предполагая, что проинтегрированные члены в бесконечности обращаются в нуль.

При этом уравнение (8) совпадает с обычным уравнением динамики для некоторой материальной точки при условии

$$A(\bar{x}_1 t) = a(t)\bar{x} + b(t). \quad (9)$$

Таким образом, уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова эквивалентно стохастическому уравнению динамики, т.е. использование при физико-статистической трактовке стохастического уравнения для описания движения эффективного объема взаимодействия, находящегося в состоянии сцепления, так же как и разбивка действующей на него стохастической силы реакции на среднюю и флуктуирующую части в указанных рамках, представляется вполне понятным и допустимым. При этом эффективную массу можно рассматривать просто как некий коэффициент пропорциональности, входящий в $A(x_1 t)$. С учетом связи уравнений (6) и (8) можно ответить и на третий вопрос о смысле экспоненциального распределения по энергиям для системы ячеек или контактов в состоянии сцепления.

Поскольку существует стационарное решение уравнения (7) ($\partial v / \partial t = 0$), то

$$j = -Av + \frac{1}{2} \frac{\partial Bv}{\partial x} = const. \quad (10)$$

Стационарный поток j на границе x области изменения предполагается равным нулю, тогда после интегрирования

$$v(x) = \frac{c}{B(x)} e^{-\int_0^x \frac{A(s)}{2B(s)} ds}, \quad (11)$$

где c – const, определяемая из условия нормировки. Если при постоянных A , B положить $\int_0^x \frac{A(s)}{2B(s)} ds = \frac{Ax}{2B} = -\frac{\Delta E}{\Theta}$, где ΔE – энергия контакта в состоянии сцепления; Θ – модуль канонического распределения, то

$$v(x) = const e^{-\frac{\Delta E}{\Theta}}. \quad (12)$$

Распределение (12) является как бы эквивалентным распределению (11), но уже не для системы микросмещений, описываемой уравнением (7), а для системы индуцированных ими в поверхностных слоях квазичастиц и ячеек с учетом реальной структуры МК слоя, движение которых описывается стохастическими уравнениями типа (8).

Остается ответить на вопрос, касающийся интерпретации функции Ланжевена в рамках вероятностной модели. Для этого обратимся к понятию выбора случайного процесса. Если на оси ординат графика момента трения и толщины граничного слоя, отражающего временной ход случайного процесса $\xi(t)$, отметить уровень $\xi = \xi_0 = \text{const}$ (в частности, $\xi_0 = 0$), то некоторые «всплески» графика будут превосходить этот уровень (в том числе и нулевой). Среднее числопересечений заданного уровня в единицу времени и определит среднее число выбросов случайного процесса $\lambda(\xi_0)$. Как известно,

$$\lambda(\xi_0) = \int_0^{\infty} \omega(\xi_0, y) dy, \quad (13)$$

где $y = \frac{d\xi}{dt}$ – скорость изменения случайной величины;

$\omega(\xi_0, y)$ – двумерная плотность вероятности.

При $\omega(\xi_0, y) = \omega(\xi_0)\omega(y)$ (статистическая независимость)

$$\lambda(\xi_0) = \omega(\xi_0) N \int_0^{\infty} \omega(y) dy, \quad (14)$$

где нормирующий множитель $N = \frac{1}{\int_0^{\infty} \omega(y) dy}$.

Пусть далее случайный процесс имеет вид $\xi(t) = A \sin \Theta(t)$, где A – изменение амплитуды на этапе деформирования МК слоя (достаточно медленно меняющаяся амплитуда); $\Theta(t)$ – амплитуда при проскальзывании по линии контакта (достаточно быстро меняющаяся фаза,

$$y = \frac{d\xi}{dt} \approx A \Theta \cos \Theta = c_1 \cos \Theta, \text{ где } \theta \leq \theta \leq \pi.$$

Допустим, что $\omega(y)$ – стационарное решение соответствующего уравнения Фоккера-Планка, т.е.

$$\omega(y) = \text{const} e^{c_1 y} = \text{const} e^{c_1 \cos \Theta}.$$

Тогда (14) превращается в следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \lambda(\xi_0) &= \text{const} \frac{\int_0^{\infty} \cos \Theta e^{c_1 \cos \Theta} d(\cos \Theta)}{\int_0^{\infty} e^{c_1 \cos \Theta} d(\cos \Theta)} = \\ &= \text{const} \left(\text{cth} c_1 - \frac{1}{c_1} \right) = \text{const} L(c_1), \end{aligned} \quad (15)$$

где $L(c_1)$ – функция Ланжевена, связанная с существованием некоторого постоянного уровня смещения ξ , определяемого физическими условиями (сцепление, деформирование МК слоя, распад образовавшейся волны) протекания определенного типа случайного процесса.

Выводы

1. Таким образом, математическое моделирование динамики подвижности МК слоя в контактной области полностью соответствует экспериментальным результатам регистрации скорости изнашивания и основных триботехнических характеристик ТС с использованием ГТВ.

2. Результаты данных исследований могут быть полезными при конструировании многослойных износостойких покрытий, получаемых в рамках нанотехнологий.

Список литературы

1. Войтов В.А. Технологии триботехнического восстановления – обзор и анализ перспектив / Войтов В.А., Стадниченко В.Н., Стадниченко Н.Г., Джус Р.Н., Бильяк А.П. // Проблемы трибологии. – 2005. – №2. – С. 67-74.
2. Стадниченко В.Н. Анализ напряженного состояния поверхностных слоев трущихся материалов, модифицированных ревитализантами / В.Н. Стадниченко, Р.Н. Джус, Ю.П. Волков. // Збірник наукових праць ХУПС. – 2005. – Випуск 2(2). – С.107-113.
3. Филоненко С.Ф. Автоматизация исследований процессов самоорганизации трибосистем / Филоненко С.Ф., Стадниченко В.Н. // Автоматика. Автоматизация, Электротехнические комплексы и системы. – 2007. – №1(18). – С.154-167.
4. Красовский А.А. Фазовое пространство и статистическая теория динамических систем / А.А. Красовский – М.: Наука, 1974. – 232 с.
5. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учеб. для вузов / Под ред. Громаковского Д.Г. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.

Надійшла до редакції 27.08.2009 р.

Рецензент: доктор технічних наук, професор О.Б. Леонтьев, Харківський університет Повітряних сил, Харків.

ПРО МЕХАНІЗМИ РУХОМОСТІ МЕТАЛОКЕРАМІЧНОГО ШАРУ В ТЕХНОЛОГІЯХ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

В.В. Запорожець, В.Н. Стадніченко, О.Н. Трошин, Н.Г. Стадніченко, Р.Н. Джус

У статті зроблена спроба більш детально описати і розкрити механізм беззношеного тертя металокерамічного шару під час використання технологій трибо технічного відновлення. Описано фізичну картину дисипації зовнішньої енергії за умови рухомості цього шару, пропонується фізико-статистична модель динаміки його деформування.

Ключові слова: металокерамічний шар, металокерамічне покриття, технології трибо технічного відновлення, беззношене тертя, дисипація зовнішньої енергії, трибовідновлюючий склад, ефективний об'єм взаємодії.

ABOUT THE MOVEABLE MECHANISMS OF CERAMET LAYER IN THE TECHNOLOGIES OF TRIBOTECHNICAL RENEWAL

V.V. Zaporozhets, V.N. Stadnichenko, O.N. Troshin, N.G. Stadnichenko, R.N. Juice

An attempt to write up and expose the mechanism of unwearing friction of ceramet layer at the use of technologies of tribotechnical renewal is undertaken in the article. A physical picture of dissipation of external energy on condition of this layer mobility is described, the physic-statistical model of dynamics of his deformation is offered.

Keywords: ceramet layer, ceramet coverage, technologies of tribotechnical renewal, unwearing friction, dissipation of external energy, triborenewal mixture, effective volume of cooperation.

ПІДГОТОВКА ВІЙСЬКОВИХ ФАХІВЦІВ

УДК 004.825

М.А. Ісаков, М.Ю. Яковлев, Ю.О. Фтемов, О.О. Фуртес

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

СИСТЕМА БОЙОВОЇ ПІДГОТОВКИ СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ: СУЧАСНИЙ СТАН, ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

У статті проведено аналіз існуючої системи підготовки Сухопутних військ Збройних Сил України, розкрито основні проблемні питання, виявлено недоліки в її організації та причини їх виникнення, встановлено необхідність трансформації системи підготовки військ. Основна увага зосереджена на змінах в системі бойової підготовки з часу прийняття Державної програми розвитку Збройних Сил України на 2006-2011 роки. Розглянуто основні напрямки та перспективи розвитку системи бойової підготовки Сухопутних військ Збройних Сил України.

Ключові слова: бойова підготовка, Сухопутні війська, Збройні Сили України, програми бойової і командирської підготовки, трансформація.

Вступ

Постановка проблеми. На сьогодні, коли Збройні Сили (ЗС) України повинні бути спроможними не лише забезпечувати оборону держави, захист її суверенітету, територіальну цілісність і недоторканність, але й залучатися до усунення надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, бути готовими до участі в

міжнародних миротворчих операціях відповідно до чинного законодавства, як ніколи постає питання вдосконалення системи бойової підготовки (БП) військ. Крім того, вирішення всього комплексу завдань, пов'язаних з удосконаленням організаційно-штатної структури органів військового управління та військ, а також перехід до формування професійної армії на контрактній основі, переоснащення