

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТИТАНА НА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

*Канд. физ.-мат. наук АНДРЕЕВ М. А.,
инж. КУЗНЕЦОВА Т. А., канд. техн. наук МАРКОВА Л. В.*

Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии»

Комбинируемая технология, сочетающая электродуговое испарение в вакууме и ионное азотирование, формирует покрытие на основе Ti с равноосной структурой поверхности нитридного слоя. Микротвердость поверхности образцов с комбинированным покрытием составила 17,8–18,5 ГПа по сравнению с 23,0 ГПа у образцов со стандартным покрытием TiN. Однако высокий показатель микротвердости не определяет полностью технологических свойств данных покрытий, важнейшим из которых является износостойкость. Износостойкость материала определяется свойствами тончайшего слоя (вторичной структуры), образующегося при взаимодействии индентора с исследуемой поверхностью в контактной зоне [1, 2]. Цель данной работы – исследование функциональных свойств комбинированных покрытий на основе Ti.

Коэффициент трения $K_{тр}$ и износостойкость покрытий определяли в режиме возвратно-поступательного движения со скоростью перемещения индентора 10^{-2} м/с в условиях сухого трения на установке ТАУ-1М. $K_{тр}$ определяли с использованием датчика Холла в качестве регистрирующего элемента при нагрузке на индентор из сплава ВК8, равной 1 Н. Износ оценивали на лабораторной установке, оснащенной алмазным индентором типа «Роквелл», совершающим возвратно-поступательное движение с длиной перемещения 10 мм при нагрузке 5 Н, что при пересчете на пятно контакта составляет 70 МПа. Общая длина пути ин-

дентора по образцу – 20 м, что соответствовало 2000 проходам индентора.

Для сравнения износостойкости исследуемых покрытий использовали удельный объемный износ. Методика подробно описана в [3]. Структуру полученных дорожек трения исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Шероховатость поверхности покрытия после каждой стадии нанесения измеряли на профилографе-профилометре-252. Диффузионные процессы в покрытии исследовали методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) с использованием режима Y-модуляции – совмещения СЭМ-изображения с концентрационными кривыми химических элементов, записанными вдоль линии сканирования.

Все покрытия, прошедшие испытания, показали удельный объемный износ в диапазоне 10^{-13} – 10^{-15} м³/(Н·м). Анализ профилограмм дорожек трения (рис. 1) показал, что наименьшей износостойкостью обладает титановый подслоя толщиной 4 мкм. Его износ составляет $3,68 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м), что в 2 раза выше износа одномикронного подслоя (табл. 1). Азотирование титановых слоев уменьшает значение износа в 1,5 раза. Среди полностью сформированных покрытий наименьший износ у комбинированного покрытия, а наибольший – у стандартного покрытия TiN. Износ нитридного покрытия на азотированной подложке (без титанового подслоя) в 2 раза выше, чем комбинированного покрытия.

Окончание табл. 1

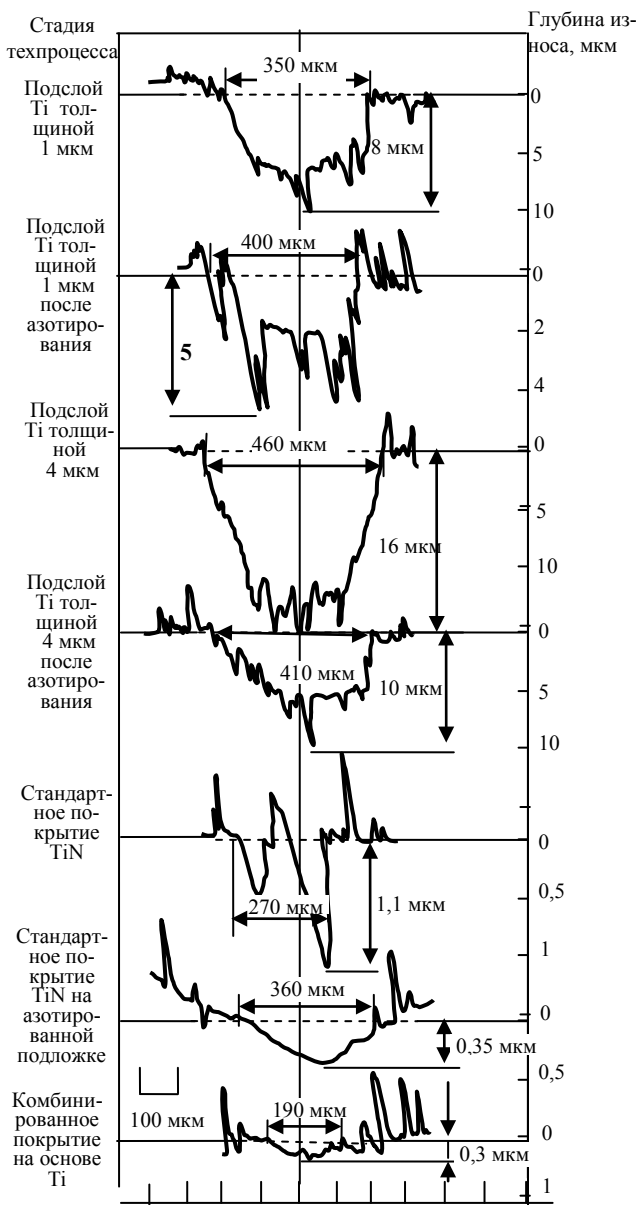


Рис. 1. Зависимость вида профиля дорожки износа при нагрузке в пятне контакта 70 МПа на поверхности комбинированных покрытий на основе Ti от технологического этапа их формирования

Таблица 1

Износ комбинированных покрытий на основе Ti

Стадия тех-процесса	Ширина дорожки износа, м	Глубина дорожки износа, м	Объем изношенного материала, м ³	Удельный объемный износ, м ³ /(Н·м)
Подслой Ti толщиной 1 мкм	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$
Подслой Ti толщиной 1 мкм после азотирования	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$

Стадия тех-процесса	Ширина дорожки износа, м	Глубина дорожки износа, м	Объем изношенного материала, м ³	Удельный объемный износ, м ³ /(Н·м)
Подслой Ti толщиной 4 мкм	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$3,68 \cdot 10^{-11}$	$3,68 \cdot 10^{-13}$
Подслой Ti толщиной 4 мкм после азотирования	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,05 \cdot 10^{-11}$	$2,05 \cdot 10^{-13}$
Стандартное покрытие TiN	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,49 \cdot 10^{-12}$	$1,49 \cdot 10^{-14}$
Стандартное покрытие TiN на азотированной подложке	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$5,95 \cdot 10^{-13}$	$5,95 \cdot 10^{-15}$
Комбинированное покрытие на основе Ti	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$2,85 \cdot 10^{-13}$	$2,85 \cdot 10^{-15}$

Наибольший $K_{тр}$ (0,32) оказался у покрытия TiN, полученного по стандартной технологии. У комбинированных покрытий при аналогичных испытаниях значения $K_{тр}$ составили: 0,19 – для покрытия с четырехмикронным подслоем и 0,24 – для покрытия с одномикронным подслоем. Такая расстановка покрытий по значениям $K_{тр}$ объясняется структурой, сформировавшейся в дорожках трения. Главное отличие комбинированных покрытий от стандартных заключается в формировании в зоне износа особой структуры. Исследование методом СЭМ дорожки трения стандартного TiN показало, что в ней сохраняется исходная направленность структуры TiN – согласно линиям полировки подложки. Капельная фаза деформируется под воздействием индентора, но форма ее следов округлая, нет процесса пластичного намазывания (за исключением небольших участков по краям). Большая твердость и хрупкость покрытия ведут к его выкрашиванию в процессе трения, что приводит к увеличению $K_{тр}$ (рис. 2а).

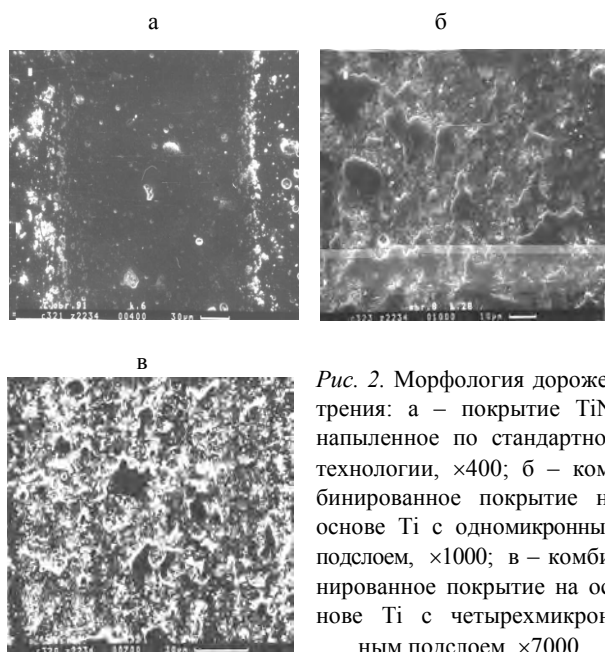


Рис. 2. Морфология дорожек трения: а – покрытие TiN, напыленное по стандартной технологии, $\times 400$; б – комбинированное покрытие на основе Ti с одномикронным подслоем, $\times 1000$; в – комбинированное покрытие на основе Ti с четырехмикронным подслоем, $\times 7000$

У всех комбинированных покрытий в зоне трения создается структура, ориентированная в соответствии с направлением движения индентора (рис. 2б, в). Под воздействием нагрузки и температуры в зоне контакта индентора с поверхностью микрокапельная фаза пластически деформируется. Пластичные свойства ее таковы, что она равномерно распределяется по дорожке трения и выполняет роль твердой смазки. Пространство между островками видоизменившейся капельной фазы равномерно заполнено мелкими белыми частицами (рис. 2б, в), являющимися осколками округлой белой фазы. Возможно, наличие большого количества дисперсной округлой фазы в дорожке трения данных комбинированных покрытий дополняет трение скольжения трением качения на десятках сотен отдельных микроскопических сфер. В структуре дорожки трения комбинированного покрытия на четырехмикронном подслое пластически измененная капельная фаза распределена более равномерно, чем у покрытия с одномикронным подслоем. Это может объясняться большим размером и более развитым рельефом лунок покрытия с четырехмикронным подслоем. Лунки способствуют равномерному распределению пластически измененной микрокапельной фазы по дорожке трения и задержке ее в углублениях лунок. Это препятст-

вует слиянию измененной микрокапельной фазы в сплошной слой с последующим выкрашиванием его фрагментов.

Пластичные свойства верхнего слоя комбинированного покрытия и микрокапельной фазы на его поверхности, являющиеся предпосылкой формирования особого слоя в дорожке трения при испытаниях на износ, можно объяснить диффузионным микролегированием покрытия элементами подложки. В спектрах МРСА, полученных с поверхности титанового покрытия после азотирования, пики железа и молибдена, едва различимые в спектрах исходных покрытий, значительно увеличиваются. Это свидетельствует об усилении диффузии железа и молибдена в титановый подслоя под действием азотирования. Исследования в режиме Y -модуляции структуры поперечных шлифов комбинированных покрытий показали, что уже при нанесении одномикронного титанового подслоя происходит диффузия Ti на глубину 4 мкм (рис. 3а). При увеличении толщины подслоя глубина диффузии Ti не увеличивается. Азотирование также не оказывает влияния на глубину диффузии Ti в подложку. Диффузионное проникновение элементов основы в покрытие происходит только для тех элементов, которые образуют с Ti твердые растворы (Mo, Fe). Прописывание Y -модуляции под углом 30° (эффект косого шлифа) позволило растянуть зону одномикронного Ti покрытия и выявить образование железосодержащих фаз по всей глубине и на поверхности титанового подслоя, а также диффузионное проникновение Mo в покрытие из основы (рис. 3в, г). Проникновение Fe и Mo в покрытие объясняется тем, что из диаграммы состояния только Fe и Mo образуют твердые растворы с Ti. Все остальные компоненты стали Р6М5 образуют с Ti интерметаллиды различного состава. Поскольку при ионном азотировании и формировании покрытий температура подложки не превышает 500°C , образования интерметаллидов не происходит. Твердые растворы в этом случае образовываться могут. В покрытии формируется диффузионная зона толщиной 0,5 мкм, одинаковая для покрытий с различной толщиной подслоя, в которую встраиваются карбиды основы.

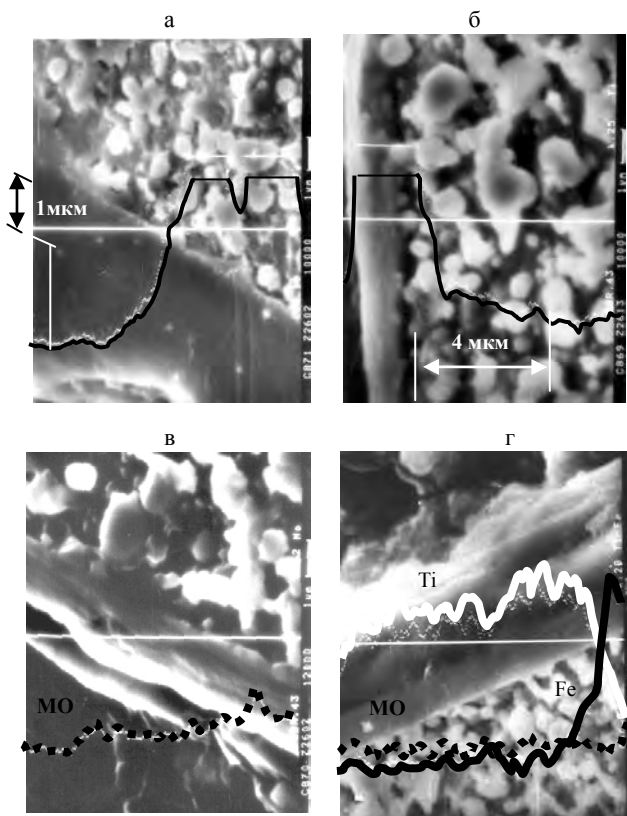


Рис. 3. Диффузия элементов подслоя и подложки в комбинированном покрытии на основе Ti: а – диффузия Fe в титановый подслоя после азотирования на глубину 1 мкм; б – диффузия Ti в подложку на глубину 4 мкм при нанесении одномикронного Ti подслоя; в – присутствие Mo в подслое; г – распределение Ti, Fe и Mo по толщине покрытия

Совмещение СЭМ-изображений поверхности покрытий с кривыми Y-модуляции показывает пути, по которым происходит диффузия Ti в подложку, а Fe и Mo – в подслоя. Анализ большого количества экспериментального материала показал, что этими путями в комбинированном покрытии являются границы микрокапельной фазы. Причем данный факт характерен только для комбинированных покрытий. Исследование структуры поверхности покрытия TiN, выполненного по стандартной технологии, не выявило пиков Fe и Mo и падения содержания Ti по границам микрокапель (рис. 4а).

В то же время исследование комбинированного покрытия с одномикронным титановым подслоем зафиксировало пики Fe и Mo и падение Ti на границе микрокапли при большей толщине покрытия (рис. 4б). Причина заключается в присутствии в комбинированном покрытии

титанового подслоя, подвергнутого азотированию. «Провалы» на концентрационных кривых Ti имеются как у одномикронного, так и у четырехмикронного подслоев. Однако не всегда пики Fe и Mo соответствуют этим «провалам» (рис. 5а). После азотирования стабильность присутствия и высота пиков Fe и Mo на концентрационных кривых повышаются (рис. 5б). Азотирование активирует диффузию элементов подложки в подслоя, наметившуюся при нанесении титанового подслоя.

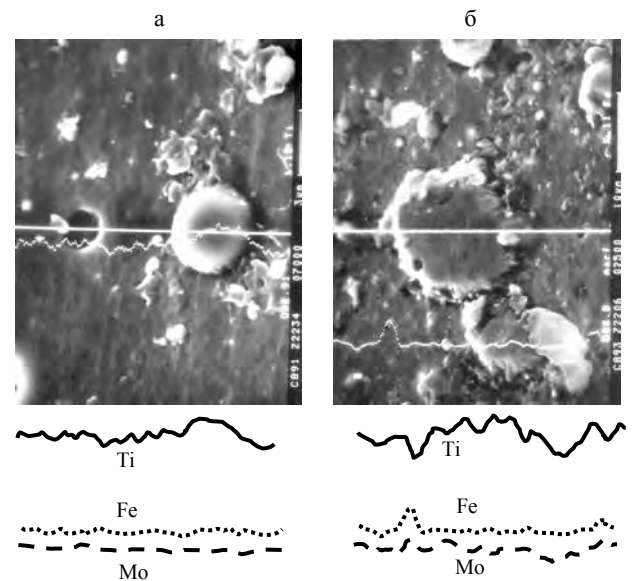


Рис. 4. Влияние азотирования на рост пиков на концентрационных кривых Ti, Fe и Mo в полностью сформированном покрытии: а – стандартное нитридное покрытие с отсутствием пиков на концентрационных кривых Fe и Mo, плавный ход концентрационной кривой Ti без «провалов» по границе микрокапли; б – комбинированное покрытие с одномикронным Ti подслоем с пиками на концентрационных кривых Fe и Mo и соответствующими им «провалами» на концентрационной кривой Ti

При изучении поверхности комбинированного покрытия с использованием АСМ в пределах лунок нами обнаружен более мелкий структурный элемент – блоки (рис. 6а). Границы блоков могут служить путями миграции диффундирующих атомов под действием азотирования.

АСМ подтверждает сделанное выше предположение, что азотирование усиливает диффузию и что она происходит по межфазным границам (рис. 6б). Режим фазового контраста АСМ, регистрирующий изменение микромеханических свойств поверхности, показывает распределение упрочняющих фаз, образовавшихся в структуре четырехмикронного титано-

вого подслоя после азотирования (рис. бв). Упрочняющие фазы располагаются по границам как кристаллитов, так и блоков. Эти фазы контрастно выделяются белым цветом на фоне серой матрицы титанового покрытия. Белый цвет на изображении фазового контраста свидетельствует об их большей твердости по сравнению с серой матрицей титанового покрытия.

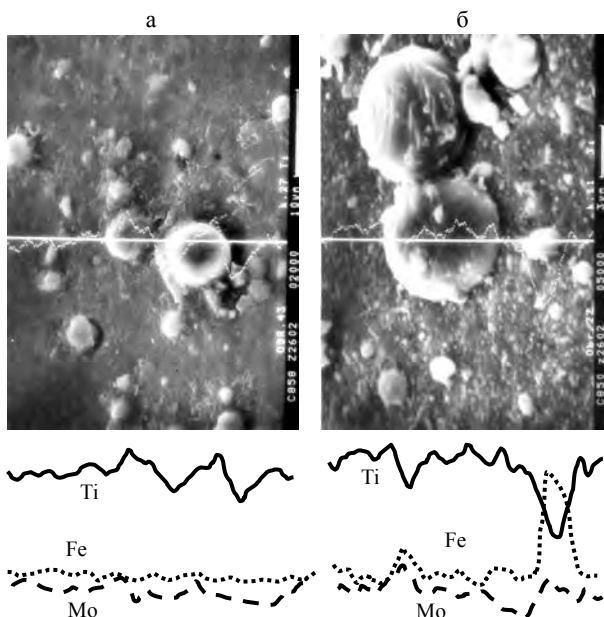


Рис. 5. Влияние азотирования на рост интенсивности пиков Fe и Mo на концентрационных кривых, совмещенных с СЭМ – изображением поверхности одномикронного титанового подслоя: а – более сглаженные концентрационные кривые на поверхности подслоя без азотирования; б – рост пиков на концентрационных кривых после азотирования

Износостойкость комбинированных покрытий на основе Ti в применявшихся условиях испытаний в 5 раз выше, чем у стандартного покрытия TiN. Стойкость торцевых фрез с комбинированным покрытием возросла в 1,7 раза по сравнению с фрезами с покрытием TiN.

Азотирование титанового подслоя при формировании комбинированного покрытия приводит к активации диффузионных процессов между элементами покрытия и подложки. Микролегирование покрытия элементами подложки способствует формированию материала, сочетающего прочность и пластичность покрытия и пластичность микрокапельной фазы. Предлагаемая технология формирует структуру

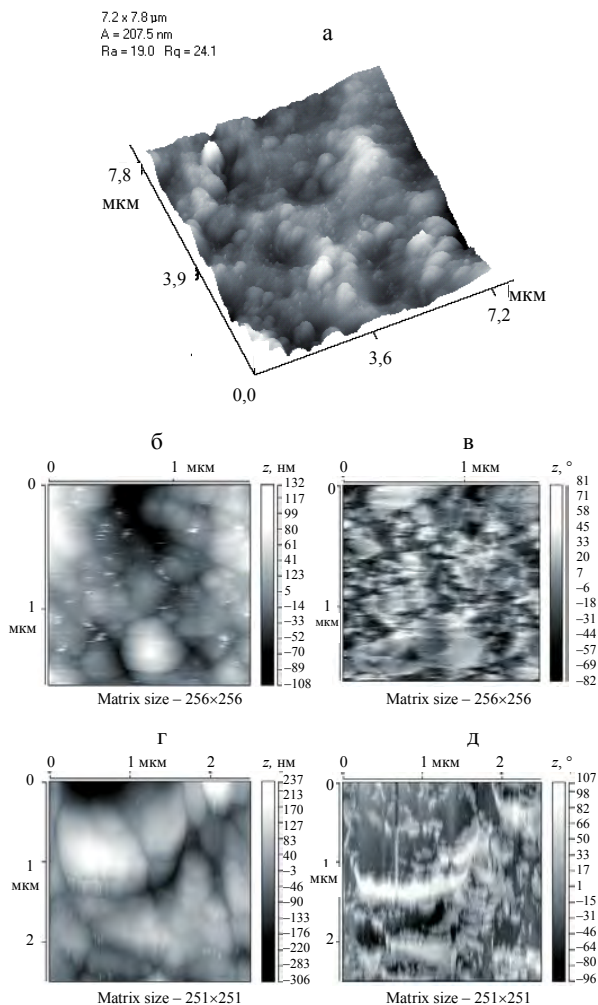


Рис. 6. АСМ-изображение поверхности комбинированного покрытия на основе Ti на различных стадиях его формирования: а – топография поверхности полностью сформированного покрытия с делением лунок на блоки; б – топография поверхности четырехмикронного титанового подслоя, поле сканирования – 1,5×1,5 мкм; в – фазовый контраст того же участка; г – топография поверхности четырехмикронного титанового подслоя после азотирования, поле сканирования – 2,5×2,5 мкм; д – фазовый контраст

ВЫВОД

покрытия, на поверхности которого при износе равномерно распределяется пластичный слой, образованный пластическим деформированием микрокапельной фазы. Эта пластически измененная микрокапельная фаза служит твердой смазкой на поверхности покрытия при трении. Таким образом, разработанное покрытие является материалом, адаптированным к условиям эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбаров. – М.: Машиностроение, 1977.
2. Мышкин, Н. К. Трибология. Принципы и прило-

жения / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2002. – 310 с.

3. Кузнецова, Т. А. Исследование износостойкости комбинированных вакуумных электродуговых покрытий на основе ZrHf / Т. А. Кузнецова, М. А. Андреев, Л. В. Маркова // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 5. – С. 521–529.

Поступила 17.03.2006

УДК 681.511

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ УСТОЙЧИВЫХ СЕМЕЙСТВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Канд. техн. наук, доц. НЕСЕНЧУК А. А.,
аспиранты ОСИПЯН А. И., ФЕДОРОВИЧ С. М.*

Белорусский национальный технический университет

Функционирование разнообразных технических устройств практически всегда сопряжено с отклонениями параметров от номинальных значений, установленных техническими требованиями. Подобные отклонения могут привести к значительной неопределенности и нарушению режима работы устройства, вплоть до его выхода из строя. Одним из основных направлений исследований систем с неопределенностью является параметрическое направление [1–5], рассматриваемое в настоящей статье. Наиболее значительные успехи были достигнуты в области анализа устойчивости систем. В рамках частотного подхода известны работы Я. З. Цыпкина и Б. Т. Поляка [1], труды В. Л. Харитоновой, Б. Р. Бармиша и Р. Темпо посвящены алгебраическому [2] и корневому [3] подходам. В данной работе развивается корневое направление [4, 5] к проблеме. Формулируются условия устойчивости для использования с целью параметрического синтеза робастных САУ.

Формирование корневого портрета. Рассмотрим интервальную динамическую систему (ИДС), описываемую семейством характеристических полиномов:

$$P(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n, \quad (1)$$

где $\underline{a}_j \leq a_j \leq \bar{a}_j$, $j = \overline{0, n}$, $a_0 \neq 0$, \underline{a}_j и \bar{a}_j – соответственно действительные значения мини-

мальной и максимальной границ замкнутого интервала изменения коэффициента a_j , которая представляет собой систему с параметрической неопределенностью.

Сделаем в (1) замену переменного $s = \sigma + i\omega$, запишем выражение относительно выбранного варьируемого коэффициента a_k

$$a_k = f(s) = u(\sigma, \omega) + iv(\sigma, \omega), \quad (2)$$

где $u(\sigma, \omega)$ и $v(\sigma, \omega)$ – гармонические функции двух независимых действительных переменных σ и ω .

Интервальное семейство рациональных функций отображения (2) позволяет формировать в плоскости s корневой портрет системы. Тогда уравнение корневого годографа Теодорчика – Эванса [4] определяется выражением

$$v(\sigma, \omega) = 0, \quad (3)$$

а уравнение параметра [4] – выражением

$$a_k = u(\sigma, \omega). \quad (4)$$

Динамика корневого портрета на границе устойчивости. Устойчивость семейства (1) зависит от расположения его корней относительно мнимой оси $i\omega$ плоскости корней s , являющейся границей асимптотической устойчи-