

Бабак В.П.¹, Щепетов В.В.¹, Астахов Е.А.², Яковлева М.С.³

¹ Институт технической теплофизики НАН Украины. Украина, г. Киев

² Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Украина, г. Киев

³ Институт проблем материаловедения им. И.Н. Фрацевича НАН Украины. Украина, г. Киев

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ТРЕНИИ С АНТИФРИКЦИОННЫМИ И КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Представлены результаты исследований триботехнической совместимости нанокomпозиционных покрытий, напыленных детонационно-газовым методом, в подвижных сопряженных поверхностях из высокопрочной авиационной стали типа хромансиль (30ХГСНА) и азотированной конструкционной стали (38ХМЮА), а также с образцами из алюминиевой бронзы БрАЖН10-4-4 и оловянистой БрОЦС6-3-3. При этом отмечено, что одной из задач современной трибологии является оптимальный подбор материалов пар трения и обеспечение стабильности рабочих характеристик в различных условиях эксплуатации.

Современными методами физико-химического анализа исследованы поверхности трения испытываемых материалов.

Изучены основные факторы, обуславливающие развитие явления структурной приспособляемости в условиях обеспечения совместимости материалов пар трения. Отмечено, что определяющими из них являются механические нагрузки, внешняя среда и взаимодействующие материалы, их структура и свойства. Подчеркнуто, что минимизация нормального износа обусловлена генерализированным спонтанно необратимым процессом динамического формирования тонкопленочных объектов, образующихся в результате трибовзаимодействия элементов, входящих в состав покрытий, с активными компонентами среды.

Проведенные испытания показали, что разработанные нанокomпозиционные износостойкие покрытия являются перспективным направлением инженерии поверхности, обеспечивающим существенное повышение долговечности изделий.

Ключевые слова: детонационное покрытие; износостойкость; поверхностный слой; структурная приспособляемость; легирование.

Неисправности подвижных сопряжений поверхностей, возникающие в результате износа, одна из основных причин потери их работоспособности, то есть, явления, происходящие в контактной зоне рабочих поверхностей, оказывают первостепенное влияние на безотказность и долговечность машин и механизмов. Одной из актуальных задач современной науки о трении и изнашивании твердых тел является оптимальный подбор взаимодействующих в процессе эксплуатации материалов кинематических пар и определение областей их рационального технико-экономического применения.

Опыт исследования сочетаний материалов в типовых узлах трения авиационной техники показывает неудовлетворительные результаты эксплуатации покрытий на основе хрома при скольжении по алюминиевым сплавам, поверхностей медных сплавов по алюминиевым сплавам, покрытий на основе хрома по хромовым сплавам, также пар трения зака-

ленная сталь по хромовым покрытиям [1]. Таким образом, физической основой контактного взаимодействия является реализация структурно-энергетической концепции обеспечения совместимости как способности трущихся пар в заданных условиях приспособляться в процессе взаимного перемещения, обеспечивая заданную долговечность.

Целенаправленные и научно обоснованные результаты испытаний, определяющие оптимальные с точки зрения эксплуатации сочетания материалов в системе покрытие-контртело, несмотря на их принципиальную важность, в технической литературе крайне немногочисленны. Поэтому исследования физических аспектов совместимости детонационных нанокomпозиционных покрытий с антифрикционными и конструкционными материалами в подвижных сопряжениях деталей и оборудования остается актуальной проблемой современной техники.

Цель работы

Экспериментальное исследование совместимости детонационных нанокпозиционных покрытий $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ в условиях контактного взаимодействия с антифрикционными и конструкционными материалами, применяемыми в узлах трения авиационной техники.

Выбор материалов пар трения осуществляется с позиции системного анализа [2]. Так, бронза типа БрОЦС6-6-3, применяемая в качестве антифрикционного материала, используется, как правило, для подшипников, подпятников, шестерен, дисков, втулок и т.п. Бронза типа БрАЖН10-4-4 для изготовления упорных колес, секторов управления, опорных пят, втулок, зубчатых колес, клапанов и т.п. Как конструкционные материалы взяты образцы из высокопрочной самолетной стали 30ХГСНА, используемой для подвижных сочленений конструкций шасси, а также зубчатых колес, валов толкателей, рычагов, направляющих и других силовых элементов и образцы из азотированной стали 38ХМЮА, применяемой при изготовлении шестерен, валов, распределительных валиков, втулок, штоков и других ответственных деталей.

Выбор в качестве объекта исследования данных материалов не является случайным. С одной стороны, это характерные представители обширных классов, различных как по типу, так и по структуре, в которых наблюдаются все типичные процессы, с другой — именно в этих материалах, на наш взгляд, основные свойства выражены наиболее отчетливо. Также путем оптимизации технологического процесса формирования детонационных покрытий исследуемой системы, была достигнута возможность получения их стабильного качества (варьирование прочностных и пластичных характеристик в напыляемых образцах одной партии — 5–10%). Таким образом, кроме непосредственного контроля качества покрытий осуществлялась заданная технологичность процесса напыления, неизменность которых гарантирует постоянство их свойств.

Методика исследований

Для детонационно-газового напыления использовали нанокпозиционные порошки $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, полученные методом механохимического синтеза с помощью лабораторного атритора типа «ИЭС-1-0,5».

Методом микроиндентирования были измерены механические свойства полученных покрытий и при сравнении с данными нормирован-

ных механических показателей подтверждено, что структурное состояние, обусловленное продуктами механохимического синтеза, относится к области микронанокпозитивов.

Изучение качества поверхностных слоев, в которых протекают процессы активации при нагружении трением, влияющие на интенсивность механохимических реакций, осуществляли с помощью комплексной методики физического анализа, включающей металлографию (оптический микроскоп «Неофот-32» с приставкой), дюротрический анализ (твердомер М-400 фирмы ЛЕСО при нагрузке 0,249 и 0,496Н), растровую электронную микроскопию (сканирующий электронный микроскоп JSM-840), рентгеноструктурный фазовый анализ (дифрактометр ДРОН-3М с монохроматизированным излучением CuK_α).

Триботехнические свойства покрытий оценивались при трении модельных образцов по торцевой схеме в отсутствие смазки в условиях распределенного контакта. Испытания проводились в режиме непрерывного скольжения при нагрузке 10,0 МПа, толщина покрытий после доводки составляла 0,15–0,25 мм, шероховатость $R_a = 0,63\text{--}0,32$. Положения, обосновывающие сопротивление изнашиванию испытываемых покрытий, рассматривались с позиции структурно-энергетической теории трения и износа [3].

Результаты исследований

Функциональные зависимости интенсивности изнашивания от скорости скольжения, полученные при испытаниях нанокпозиционных покрытий в парах трения с образцами из конструкционных сталей, представлены на рис. 1.

Основными факторами, определяющими закономерности трения и изнашивания исследуемых материалов являются трибофизические процессы,

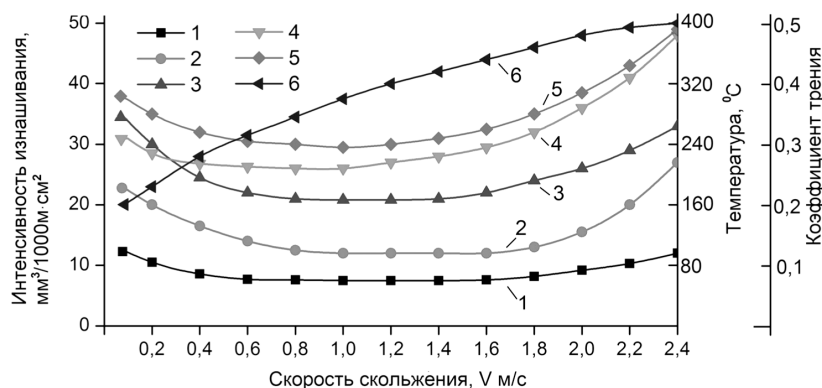


Рис. 1. Влияние скорости скольжения на:

1, 3, 5 — соответственно интенсивность изнашивания (I_n), коэффициент трения (μ), температуру для покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ в парах трения с образцами из стали 30ХГСНА; 2, 4, 6 — соответственно интенсивность изнашивания (I_n), коэффициент трения (μ), температуру для покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ в парах трения с образцами из стали 38ХМЮА

обусловленные монотонным повышением скорости скольжения и температуры в зоне фрикционного контакта, и взаимодействием с кислородосодержащей средой.

Металлографический и рентгеноструктурный анализ поверхностей трения наноконпозиций позволяют констатировать наличие тонкопленочных структур механохимической природы, представляющей большей частью конгломераты субмикробъектов фаз компонентов и кислорода воздуха, которые по стехиометрическому составу соответствуют ультрадисперсной смеси оксидов Al_2O_3 , $\beta-SiO_2$, TiO_2 , $\alpha-Fe_2O_3$. Анализ линий сканирования кислорода с элементами системы подтверждает наличие химического взаимодействия (сингулярные точки на линиях сканирования совпадают) и образования сложных структур химических соединений. Совпадение концентрационных максимумов Al, Ti, O подтверждает наличие β -тиалита, образующегося по реакции: $Al_2O_3 + TiO_2 = Al_2TiO_5$, установлено наличие муллита Al_2SiO_5 и шпинельных фаз типа $FeAl_2O_4$. Присутствие на поверхностях трения пленок сложных оксидов структур препятствует адгезионно-молекулярному взаимодействию рабочих поверхностей пар трения, предохраняя от непосредственного контакта и разрушения. Следует отметить, что по структуре и свойствам тонкопленочные объекты аналогичны дисперсно-упрочненным материалам, которые, как известно, обладают уникальным сочетанием высокой пластичности, прочности и отличаются стабильностью характеристик во времени [4].

Устойчивость профиля кривой $I_{и} = f(V_{ск})$ наноконкомпозитных покрытий (рис. 1) практически во всем диапазоне испытаний свидетельствует о стабильности триботехнических параметров, обусловленных структурной приспособляемостью материалов пар трения. Характер изменения коэффициентов трения, значения которых определяют уровень потери энергии в трибосопряжениях, согласуется с установленной закономерностью изнашивания и находится в пределах 0,23–0,36.

Типичные поверхности трения наноконпозиционных покрытий представлены на рис. 2. Можно отметить, прежде всего, отсутствие визуальных повреждений при взаимодействии с образцами из конструкционной стали, точечные очаги в гетерофазных тонкопленочных структурах, которые неизбежны при нагружении трением, локализуются в поверхностной контактной зоне и аннигилируются в процессе аккомодации зернограничного

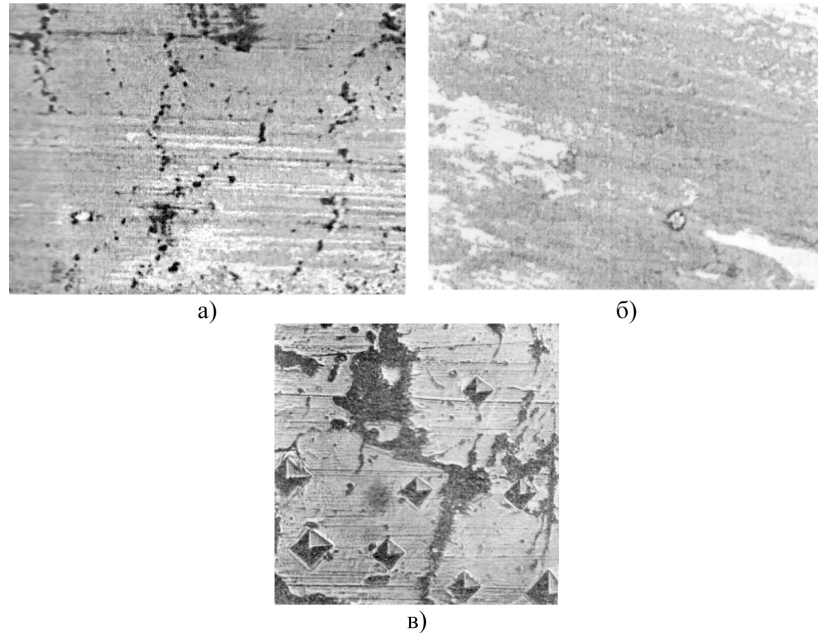


Рис. 2. Поверхности трения покрытий $FeAl_2-Ti-Si$ испытанных с образцами из стали 30XГСНА при:

а – 0,2 м/с; б – 1,5 м/с (x320); в – 2,0 м/с (x180)

скольжения, обеспечивая устойчивое механохимическое изнашивание. При исследовании структуры поверхностных пленок методами рентгенофазового анализа установлено их ультрадисперсное строение с явно выраженным разбросом микротвердости. Следствием чего является невозможность получения отпечатков индентора в прогнозируемых фазах, можно лишь говорить об усредненных в результате большого числа измерений значениях микротвердости (рис. 2, в).

В данных условиях испытаний структура приповерхностного слоя совместно с тонкопленочными вторичными структурами механохимического происхождения отвечает сочетанию высокой прочности с достаточным запасом пластичности, иными словами обладают устойчивым проявлением структурной приспособляемости что обеспечивает способность сопротивляться развитию хрупких трещин и обуславливает минимизацию параметров трения. Однако для кривой 2 зависимости $I_{и} = f(V_{ск})$ с повышением скорости скольжения интенсивность изнашивания несколько возрастает, что обусловлено, на наш взгляд, абразивным действием выкрашивающихся частиц за счет повышения температуры в зоне трения азотированной стали 38ХМЮА, так как работоспособность азотированного слоя ограничена температурой химико-термического процесса.

Диапазон структурно-энергетической приспособляемости детонационных покрытий $FeAl_2-Ti-Si$ в парах трения с конструкционными материалами может быть значительно увеличен за счет применения смазочных материалов. Так, использование масла МС-20 в сопряжении покрытий $FeAl_2-Ti-Si$ и

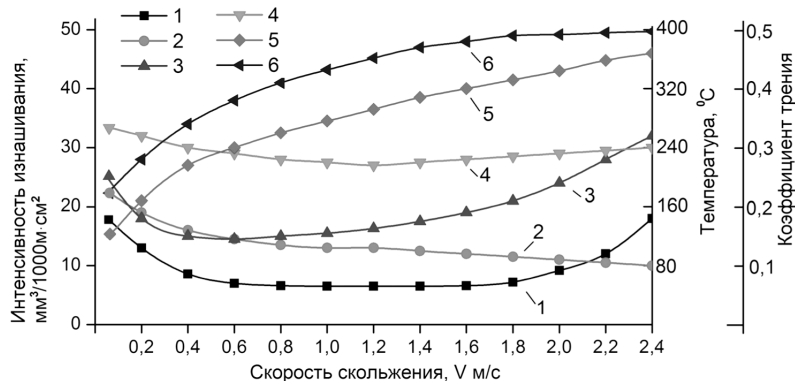


Рис. 3. Влияние скорости скольжения на:

1, 3, 5 – соответственно интенсивность изнашивания (I_n), коэффициент трения (μ), температуру для покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ в парах трения с образцами из БрАЖН10-4-4; 2, 4, 6 – соответственно интенсивность изнашивания (I_n), коэффициент трения (μ), температуру для покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ в парах трения с образцами из БрОЦС6-6-3

сталь 30ХГСНА позволило расширить диапазон нормального механохимического трения в 7 раз и значительно при этом повысить надежность трибосистемы [1].

Зависимости интенсивности изнашивания от скорости скольжения, полученные при испытаниях нанокomпозиционных покрытий с антифрикционными материалами, представлены на рис. 3.

Сочетание покрытий в парах трения с алюминиевой бронзой, как видно из графика, обладает высоким сопротивлением износу и хорошо противостоит поверхностному разрушению и схватыванию. Реализация структурной приспособляемости материалов контактных поверхностей в данных условиях испытаний обусловлена как свойствами вторичных структур, так и характеристиками поверхностей трения. Важным условием совместимости испытываемых материалов является и то, что для бронзы температура рекристаллизации сохраняется ниже средней температуры поверхности трения.

Для зависимостей пары трения покрытие $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ с образцами из оловянной бронзы характерно, прежде всего, монотонное повышение температуры в зоне трения, сопровождающееся как понижением интенсивности изнашивания, так и коэффициента трения при повышении скорости скольжения. По данным металлографического анализа минимальный износ и оптимальное трение испытываемых пар обусловлены процессом экструзии свинца, то есть при увеличении температуры в поле действующих напряжений вследствие поверхностной деформации и различия коэффициентов линейного расширения, имеет место выдавливание свинца из структуры (рис. 4).

В результате чего поверхность трения покрывается тончайшим слоем свинцовой пленки, выполняющей

роль смазки, что препятствует схватыванию и обеспечивает в данных условиях устойчивое проявление процесса структурной приспособляемости.

В зависимости от свойств материалов и среды изменяется диапазон и уровень минимального трения и износа. Действенным методом расширения области минимальных значений параметров трения, остается рациональное применение смазочных материалов и присадок в подвижных сопряженных поверхностях узлов трения. При испытаниях нанокomпозиционных покрытий $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ в парах с антифрикционными материалами в условиях смазки удалось расширить диапазон

структурной приспособляемости при сравнении с результатами испытаний без смазки до 9 раз, при этом показатели трения и износа были устойчивы и значительно ниже, чем вне этих диапазонов.

Таким образом, обобщая экспериментальные данные, отметим, что эксплуатационная надежность в значительной мере зависит от состояния материалов в паре трения, от конструкции узла и от внешних условий. Поэтому каждый материал должен иметь установленную область применения. Кроме того, работоспособность узла зависит не только от оптимальной совместимости трибосопряжений, но и от применения смазки, так в ряде случаев обоснованный выбор смазки является основным решением проблемы совместимости материалов контактных пар трения.

В дальнейших исследованиях номенклатура совместимости материалов с детонационными нанокomпозициями, их режимы эксплуатации в различных средах будут непрерывно расширяться с целью определения технического паспорта с четким указанием их технико-экономических областей применения. Но уже сейчас, основываясь на полученных результатах, можно отметить, что использование нанокomпозитных покрытий сулит существенный экономический эффект и способствует уже в ближайшие годы повы-

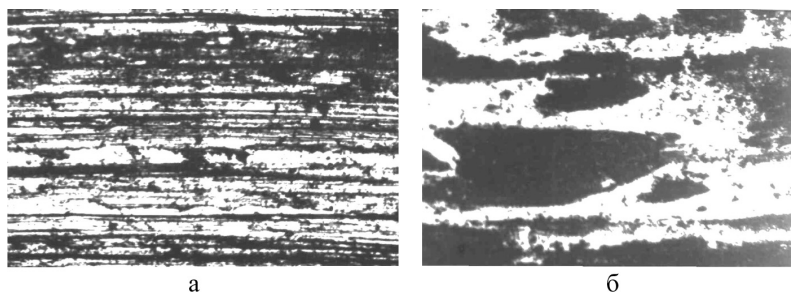


Рис. 4. Поверхности трения покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ после испытаний в парах трения с образцами из бронзы БрОЦС6-6-3 при скоростях:

а – 0,2 м/с; б – 1,5 м/с (x240)

шению качества и долговечности машин и механизмов, снижению затрат на ремонтные работы, производство запасных частей и значительной экономии металлов и сплавов.

Выводы

1. На основании методики испытаний, максимально приблизившей процессы физико-химической механики трения и изнашивания к реальным режимам эксплуатации, установлено, что применение нанокomпозиционных покрытий системы FeAl₂-Ti-Si, не содержащей дорогостоящих и дефицитных компонентов, в подвижных сопряжениях с контртелами из конструкционных сталей и антифрикционных бронз обеспечивает одно из основных требований, предъявляемых к узлам трения, а именно, стабильность триботехнических параметров.

2. Определен современными методами физико-химического анализа структурно-фазовый состав тонкопленочных структур, образующихся на рабочих поверхностях покрытий в результате взаимодействия с активным компонентом среды в условиях внешних воздействий, к которым относится скорость относительного перемещения, нагрузка и производная от них — температура поверхности трения. Показано при этом, что физической основой контактного взаимодействия, реализующего структурную приспособляемость, является обеспечение совместимости пар трения за счет структуры и свойств ультрадисперсного поверхностного слоя нанокomпозиционных покрытий.

3. Проведенные испытания показали, что легирующие добавки нанокomпозиционного покрытия

FeAl₂-Ti-Si в значительной степени обуславливают трибохимическую кинетику образования и комплекс кислородосодержащих вторичных структур, выполняющих роль твердой смазки и, таким образом минимизирующих параметры трения, обеспечивая устойчивость процессов нормального износа. Кроме того, определено, что на структурную совместимость нанокomпозиций в парах трения с высокопрочными авиационными сталями и бронзами значительное влияние оказывает внешняя среда. Экспериментально подтверждено, что в условиях смазки диапазон минимизации параметров трения увеличивается в 7—9 раз.

4. В целом проведенные исследования показали, что триботехническое применение нанокomпозиционных покрытий является перспективным направлением инженерии поверхности, обеспечивающим структурную приспособляемость материалов пар трения.

Литература

- [1] Отчет о НИР. Исследование эксплуатационных повреждений типовых узлов трения авиационной техники. — К.: НАУ, 2008. — 143 с.
- [2] Zgalat-Lozynskyy O.B. Nanostructural composites based on high-melting nitrides / O.B. Zgalat-Lozynskyy, A.V. Ragulya // Silicates Industries. — 2004. — Vol. 69, №7-8. — P.147-152.
- [3] Dubois I.M. New prospects from potential application of quasicrystalline materials // Mater. Sel. and Eng. 2002, №294. — P. 4-9.
- [4] Glaiter B. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / Acta mater. 2006, Vol. 48. — P. 1-29.

Babak V.P.¹, Shepetov V.V.¹, Astahov E.A.², Yakovleva M.S.³

¹ Institute for Technical Thermal Physics of National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kiev

² Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

³ Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kiev

WEAR RESISTANCE OF NANOCOMPOSITE COATINGS BY FRICTION WITH ANTI-FRICTION AND COMPOSITE MATERIALS

The work presents the results of studies of compatibility tribotechnical nanocomposite coatings deposited detonation-gas method in mobile mating surfaces of high aviation steel type chromansil (30XГЧН) and nitriding structural steel (38ХМЮА), as well as samples of aluminum bronze БрАЖН10-4-4 and tin bronze БрОЦС6-3-3. It was noted that one of the problems of modern tribology is the optimal selection of materials of friction couple and ensure the stability of performance under different operating conditions.

Modern methods of physical and chemical analysis have been investigated the friction surface of the test materials.



Studied the main factors affecting the development of the phenomenon of structural adaptability while ensuring compatibility of the materials of friction pairs. It is noted that the defining of them are mechanical loads, the external environment and interacting materials, their structure and properties. It was emphasized that minimizing normal wear and tear caused by generalized spontaneously irreversible process of dynamic formation of the thin film objects resulting from tribointeraction elements that make up the coating, with the active components of the environment.

Research demonstrated, that the developed nanocomposite wear-resistant coatings are promising direction surface engineering, providing a significant increase in the durability of products.

Keywords: detonation coating; wear resistance; surface layer; structural adaptability; alloying.

References

- [1] Report on research project. Investigation of operational damages of typical friction units of aircraft. K: NAU, 2008. – 143 p.
- [2] Zgalat-Lozynskyy O.B. Nanostructural composites based on high-melting nitrides/ O.B.Zgalat-Lozynskyy, A.V.Ragulya // Silicates Industries.-2004. - Vol.69, №7-8. - P. 147-152.
- [3] Dubois I.M. New prospects from potent application of quasicrystalline materials// Mater. Sel. and Eng. 2002, №294. - P. 4-9.
- [4] Glaiter B. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure /Acta mater. 2006, Vol.48. - P. 1-29.

УДК 621.45.037

Мітрахович М. М., Кисляк М. М., Комаров В. В.

Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНІ ВЕНТИЛЯТОРА ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ANSYS

Розглянуто основні математичні моделі турбулентності, що використовуються при моделюванні складних систем та проведено їх порівняння при вирішенні задачі отримання характеристик ступені вентилятора осьового компресора газотурбінного двигуна за допомогою програмного комплексу для чисельного тривимірного термодинамічного моделювання ANSYS Fluent.

Ключові слова: осьовий компресор ГТД; характеристики компресора; лопатковий вінець, ступінь компресора, тривимірне моделювання, турбулентність.

Вступ

Нині обчислювальна гідрогазодинаміка (в зарубіжній літературі Computational Fluid Dynamics – CFD) є популярним інженерним інструментом [1, 2]. Це обумовлено такими її якостями, як формальна простота постановки завдання і незалежність методики його рішення від робочого процесу досліджуваного вузла. Тобто, освоївши методику рішення простих завдань, інженер може переходити до більш

складних, реалістичних завдань, підвищивши кваліфікацію тільки в галузі нового способу завдання граничних умов або параметрів розрахунку.

Одним з ключових моментів в газодинамічному розрахунку є підбір та вибір найбільш раціональної з точки зору тривалості розрахунку та адекватності одержуваних результатів розрахункової сітки і моделі турбулентності. Кожній моделі турбулентності відповідає своє коло завдань, для яких вона добре себе зарекомендувала. Крім того, кожна