

ВИСНОВОК

комісії спеціалізованої Вченої ради Д 26.207.01 про відповідність спеціальності і профілю ради дисертаційної роботи Єфімова Миколи Олександровича **“Фізичні засади зміцнення сплавів алюмінію та покриттів, що містять квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe”**, поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – Фізика твердого тіла.

Комісія у складі членів спецради член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н. Григор'єва О.М., д.ф.-м.н. Васильєва О.Д., д.ф.-м.н. Онопрієнка О.О., розглянувши дисертаційну роботу Єфімова М.О. **“Фізичні засади зміцнення сплавів алюмінію та покриттів, що містять квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe”**, поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, прийшла до наступного висновку:

1. Актуальність теми.

Квазікристали це матеріали, в яких існує чітка впорядкована упаковка атомів і далекий орієнтаційний порядок, але відсутня періодичність у розташуванні атомів. Квазікристали характеризуються ротаційної симетрією 5-, 8-, 10- або 12- порядку, яка заборонена в кристалах. Переважна більшість квазікристалів існує в системах на основі алюмінію, яким притаманна унікальна комбінація фізико-механічних властивостей: аномально високий електричний опір при температурі рідкого гелію, висока твердість та модуль пружності, висока зносостійкість, низький коефіцієнт тертя при порівняно невеликій густині, підвищена корозійна стійкість та низька теплопровідність, на рівні кераміки ZrO_2 . Дослідження механічних властивостей квазікристалів, показало, що при низьких температурах, зокрема при кімнатній, макродеформація в квазікристалах відсутня і їх в'язкість руйнування $K_{Ic} = 1,7 \pm 0,2 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$. Тому спроби отримання об'ємних матеріалів з квазікристалів зустрічаються з труднощами через їх малу пластичність, а механізми деформації цих незвичайних матеріалів вивчено недостатньо. В той же час поєднання високої твердості, високих пружних характеристик та низької щільності зробило наноквазікристали вельми перспективним матеріалом для дисперсійного зміцнення металів і сплавів. Наразі, дослідження алюмінієвих сплавів, зміцнених квазікристалічними частками знаходиться на початковому етапі, але вже отримані дані дають надію на можливість досягнення важливих наукових та практичних результатів. Використання стабільних квазікристалів без в'язкої зв'язки має великі перспективи як матеріалу для захисних покриттів так і в якості зміцнюючих часток в композитних матеріалах. На сьогодні, головним недоліком квазікристалічних покриттів є невисока частка квазікристалічної складової в них та невисока адгезія квазікристалічних часток як в покриттях так і в композитних шарах.

Представлена робота спрямована на вирішення актуальної наукової проблеми розробки фізичних основ створення високоміцних станів у сплавах та композитних матеріалах на основі алюмінію, зміцнених квазікристалічними частками та в квазікристалічних покриттях.

2. Наукова новизна роботи відображена наступними основними положеннями:

1. На основі температурної залежності модуля пружності квазікристалів Al-Cu-Fe та мікроіндентування тригранними пірамідальними інденторами встановлено температурну залежність твердості та характеристики пластичності δ_H . На кривій $HV(T)$ виявлено дві області: область з майже стабільною твердістю та область її різкого зниження. Атермічна ділянка пояснюється фазовим переходом під тиском, що призводить до формування більш пластичної фази, аналогічно явищам, що спостерігаються в напівпровідникових кристалах. Показано, що при $T > 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\approx 0,85 T_{пл}$) квазікристали системи Al-Cu-Fe виявляють макропластичність.

2. Встановлено, що пластичність сплавів алюмінію системи Al-Fe-Cr (на рівні 5 – 8%), які містять 35 – 40% нанорозмірних зміцнюючих часток обумовлена саме їх квазікристалічною будовою, при такому ж вмісті кристалічних часток пластичність складає 0,7%.
3. Показано, що висока пластичність сплавів алюмінію, зміцнених наноквазікристалічними частками обумовлена особливими властивостями міжфазних границь між квазікристалічними частками та матрицею α -Al, що можуть бути як стоками, так і генераторами дислокацій в процесі навантаження, що робить істотний внесок в утворення пор навколо часток наноквазікристалів. В процесі навантаження, дислокації призводять до локальної деформації з фазовим переходом в тонкому поверхневому шарі наноквазікристалічних часток в апроксимантну кристалічну фазу, що релаксує напруження.
4. Доведено, що міцність сплавів системи Al-Fe-Cr, зміцнених наноквазікристалічними частками, забезпечується високою твердістю та високим модулем пружності квазікристалів; високою об'ємною часткою наноквазікристалічних зміцнюючих частинок в алюмінієвій матриці (до 40 об. %); формуванням дрібних зерен α -Al розміром до 200-500 нм та присутністю деякої кількості твердих оксидів Al_2O_3 .
5. Базуючись на дослідженні особливостей високотемпературної деформації стабільних квазікристалів системи Al-Cu-Fe, запропоновано при отриманні покриттів методом високошвидкісного повітряно-паливного напилення нагрівати порошинки до температур $0,85T_{пл}$, при яких квазікристали стають пластичними. При цьому структура покриттів, яка забезпечує високі показники твердості та адгезійної міцності, формується завдяки високій швидкості та високій пластичності часток квазікристалів системи Al-Cu-Fe при температурі 600 °C.
6. Встановлено, що в приповерхневих композитних шарах алюмінію та сплаву АМг6, зміцнених частками стабільного квазікристалу системи Al-Cu-Fe, квазікристалічні зміцнюючі частки діють в якості додаткових джерел дислокацій, сприяють збільшенню щільності дислокацій та утворенню дислокаційних комірок. Такі композитні шари мають підвищений рівень твердості та досить великий рівень внутрішніх стискаючих напружень, що сприяє підвищенню опору зносу модифікованої поверхні.

3. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отримані результати є фундаментальною базою для створення високоміцних сплавів алюмінію, покриттів та композитних шарів з квазікристалічною та наноквазікристалічною структурою. Розроблені алюмінієві сплави, зміцнені наноквазікристалічними частками, відповідають сучасним вимогам до конструкційних матеріалів в авіації і ракетобудуванні та за своїми механічними властивостями при 300 °C перевищують відомі деформівні сплави алюмінію. Захисні квазікристалічні покриття системи Al-Cu-Fe призначені для застосування у багатьох галузях промисловості: від виробництва кухонного посуду до теплозахисних покриттів в машинобудуванні та моторобудуванні. Зміцнення поверхні сплавів алюмінію та його сплавів частками стабільних квазікристалів системи Al-Cu-Fe поліпшить довготривалість роботи виробів в умовах жорсткої експлуатації. Практична реалізація результатів роботи поряд із технічними і технологічними перспективами сприятиме розвитку алюмінієвого виробництва і високотехнологічних галузей на його основі в Україні.

4. Вірогідність і обґрунтованість результатів, положень та висновків забезпечується використанням сучасних експериментальних методів досліджень таких як: металографічний, рентгеноструктурний та хімічний аналізи, скануюча та трансмісійна електронна мікроскопія, дослідження залишкових напружень рентгенівським методом, механічні випробування на розтяг, визначення адгезійної міцності, твердості та мікротвердості в тому числі при локальному навантаженні матеріалу пірамідальними інденторами з різним кутом заточки.

Наукові положення та висновки дисертаційної роботи є надійними та обґрунтованими. Вони спираються на значний обсяг експериментальних даних, отриманих у результаті власних досліджень, а також на їх комплексному аналізі. Достовірність результатів підтверджується їх узгодженістю з актуальними літературними джерелами, апробацією на вітчизняних і

міжнародних наукових конференціях, а також публікаціями основних положень у рецензованих фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних.

5. Особистий внесок здобувача. Формулювання мети, постановка та методи вирішення наукових задач, аналіз і узагальнення отриманих результатів належать автору. Безпосередньо автором виконані рентгеноструктурні дослідження. Металографічний аналіз виконано разом з к.ф.-м.н. Н.П.Захаровою, дослідження методом трансмісійної електронної мікроскопії виконано разом з к.ф.-м.н. М.І.Даниленком, скануючої електронної мікроскопії – з А.В.Самелюком, стандартні механічні випробування та визначення адгезійної міцності виконано разом з к.ф.-м.н. В.А.Гончаруком, визначення механічних властивостей методами індентування разом з к.ф.-м.н. С.І.Чугуновою, к.ф.-м.н. О.А.Голубенком. В поточному обговоренні результатів дисертаційної роботи брали участь академік НАНУ С.О.Фірстов та чл.-кор. НАНУ **Ю.В.Мільман**, яким автор висловлює свою щирю подяку за всебічну підтримку та конструктивні дискусії. Разом з к.т.н. О.Д.Нейковим автор брав участь у розробці методики отримання квазікристалічних порошків методом розпилення розплаву водою високого тиску. Автором проведено дослідження структури, механічних властивостей та визначено механізми деформації сплавів алюмінію зміцнених наноквазікристалічними частками системи Al-Fe-Cr, зливків стабільних квазікристалів та газотермічних покриттів системи Al-Cu-Fe, також визначено властивості та умови формування зміцнених стабільними квазікристалами системи Al-Cu-Fe композитних шарів в алюмінію та сплаві АМг6.

У дисертаційній роботі наведено результати досліджень, які були виконані при безпосередній участі автора в період з 1994 по 2024 р. Під час підготовки експериментів, аналізу результатів, формулювання висновків внесок автора був вирішальним. Автором особисто підготовлені більшість публікацій та зроблені доповіді на конференціях.

6. Матеріали дисертації повною мірою викладено у 68 наукових працях, з яких 21 стаття (з них 6 статей у реферованих журналах, віднесених до 1-го і 2-го кuartилів (Q1 і Q2), 13 статей в журналах, віднесених до 3-го та 4-го кuartилів (Q3 і Q4) відповідно до класифікації SCImago, 9 статей у журналах, включених до переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»), 32 тези доповідей на міжнародних і українських наукових конференціях, 2 статті в Енциклопедії Сучасної України та Збірнику «Наука про матеріали: досягнення та перспективи».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ: в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

- Iefimov M.O.**, Zakharova N.P., Goncharuk V.A., Samelyuk A. V. Structure and Mechanical Properties of Al-Fe-Si-V Powder Alloys Doped with Cr, Ti, and Zr. Powder Metall Met Ceram (2025). <https://doi.org/10.1007/s11106-025-00463-7> Translated from Poroshkova Metallurgiya, Vol. 63, Nos. 5–6 (557), pp. 61–72, 2024. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
- Neikov O.D., Radchenko O.K., **Iefimov M.O.** Correlation Between Powder Particle Size Distribution and Production Methods and Parameters. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2024. – Vol. 63, No. 3.V P. 123 – 127. DOI: 10.1007/s11106-025-00444-w. (Особистий внесок здобувача: обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
- Iefimov M.O.**, Mordiyuk B.N., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Changliang W., Chonggao Zh., Zhang L. Structure-Phase State, Mechanical Properties, and Corrosion Behavior of Quasicrystalline AlCuFeSc Coating. // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2023. – Vol. 32. – P. 10371-10382. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07844-2>. **Q2**. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
- Iefimov M.O.**, Chugunova S.I., Goncharova I.V., Goncharuk V.A., Golubenko A.A., Grinkevych K.E., Tkachenko I.V., Luk'yanov O.I. Mechanical properties of Al-Fe-Cr aluminum matrix composites in the temperature range 77-573 K. // Low Temperature Physics. –2023. – Vol. 49, No.11. – P. 1289 - 1293. <https://doi.org/10.1063/10.0021376> **Q3**. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).

5. Milman Y.V., **Iefimov M.O.**, Golubenko A.A., Changliang W., Zhang L., Chonggao Z., Haoliang T. Study of the Mechanical Behaviour of Al–Cu–Fe Quasicrystalline Coatings Across a Broad Range of Temperatures. // Powder Metallurgy and Metal Ceramic. – 2023. – Vol. 61, No.9-10. P. 605 - 612, <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00349-6> **Q3**. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
6. W.Changliang, L.Zhang, **M.O. Iefimov**, B.N.Mordyuk. Protection of AA2024 alloy against wear and corrosion by HVOF sprayed AlCuFe coating. // Surface Engineering. – 2023.– Vol.39, No.5. – P. 532-540. DOI: [10.1080/02670844.2023.2242116](https://doi.org/10.1080/02670844.2023.2242116). **Q2**. . (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
7. Li Z., Wang C., Zhu C., Tian H., Grinkevych K.E., **Iefimov M.O.**, Tkachenko I.V., Buchakov S.V. Microstructure and Tribological Properties of AlCuFeSc Coatings: Effects of Surface Roughness and Quasi-Crystalline i-Phase Content. // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2022. – Vol. 44., No12. – P. 1629 – 1642.DOI: 10.15407/mfint.44.12.1629. **Q3**. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
8. Haoliang T., Changliang W., Zhang L., **Iefimov M. O.**, NZakharova. P., Goncharuk V. A. Structure-phase state and properties of Al–Cu–Fe quasicrystalline HVOF coating produced from water-atomized powder. // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2022. – Vol. 44., No11. – P. 1417–1432.<https://doi.org/10.15407/mfint.44.11.1417>.**Q3**. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
9. Мільман Ю.В., Чугунова С. І., Голубенко О. А., Гончарова І. В., **Єфімов М.О.** Термоактиваційний аналіз температурної залежності твердості квазікристалів системи Al–Cu–Fe. // Успіхи матеріалознавства. – 2022. – № 4/5. – С. 51-64. (Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, обробка результатів досліджень).
10. Фролов Г.О., **Єфімов М.О.**, Кисіль В.М., Євдокименко Ю.І., Боровик Д. В., Бучаков С. В. Теплофизические характеристики HVOF-покрытия из квазикристаллического сплава системы Al-Cu-Fe.// Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – С. 61-68.<https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.2.11> (Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, обробка результатів досліджень).
11. Neikov O.D, Naboychenko S.S., **Yefimov N.A.** Engineering/Materials Science. Handbook of non-ferrous metal powders. Technologies and applications. – Elsevier Ltd. – 2019. – 995 p. – ISBN 978-0-08-100543-9. (Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, підготовка рукопису довідника).
12. Мільман Ю.В., Захарова Н.П., **Єфімов М.О.**, Даніленко М.І., Самелюк А.І., Покляцкий А.Г., Федорчук В.Є., Кисла Г.П. Структура та механічні властивості зварних з'єднань сплавів системи Al – Cr – Fe – Ti, що містять квазікристалічну фазу. // Электронная микроскопия и прочность материалов Киев: ИПМ НАНУ. – 2019. – вып. 19. – С.17-26. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
13. Мильман Ю.В., Захарова Н.П., **Ефимов Н.А.**, Даниленко Н.И., Шаровский А.О., Самелюк А.В., Гончарук В.А., Нейков О.Д. Структура и механические свойства сплавов системы Al-Fe-Cr для повышенных температур, упрочненных наноквазикристаллическими частицами, дополнительно легированные Ti, Mo и Nb. // Электронная микроскопия и прочность материалов Киев: ИПМ НАНУ. – 2014, вып. 19. – С.119-126. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
14. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I., Milman Yu.V., **Iefimov M.O.**, Grinkevych K.E., Sameljuk A.V., Tkachenko I.V. Wear assessment of composite surface layers in Al–6Mg alloy reinforced with AlCuFe quasicrystalline particles: Effects of particle size, microstructure and hardness. // Wear. – 2014. – Vol. 319. – P.84-95.<https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.07.011> **Q1**. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
15. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I., Milman Yu.V., **Iefimov M.O.**, Sameljuk A.V. Enhanced fatigue durability of Al-6Mg alloy by applying ultrasonic impact peening: Effects of surface hardening and reinforcement with AlCuFe quasicrystalline particles. // Materials Science & Engineering A. –

2013. – Vol. 563. – P. 138–146. **Q1.** (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень)
16. Кубич В.И., Ищенко Л.И., Мильман Ю.В., Кисель В.М., **Ефимов Н.А.**, Коржова Н.П., Гринкевич К.Э., Евдокименко Ю.И. Применение квазикристаллического покрытия для повышения жаростойкости поршневого алюминиевого сплава. // Вісник двигунобудування. – 2013. – №2. – С. 256-260. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень)
 17. [Neikov O. D.](#), [Sirko A. I.](#), [Zakharova N. P.](#), [Efimov N. A.](#), [Vasil'eva G. I.](#), [Sharovskii A. O.](#), [Samelyuk A. V.](#), [Goncharuk V. A.](#), [Ivashchenko R. K.](#) Effect of starting powder properties on the structure and mechanical characteristics of Al–8Cr–1.5Fe alloy for high-temperature applications. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, No. 3-4. – P. 144-153. <https://doi.org/10.1007/s11106-013-9507-9> **Q3** (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень)
 18. Мильман Ю.В., Захарова Н.П., **Ефимов Н.А.**, Даниленко Н.И. Шаровский А.О., Нейков О.Д. Влияние структурного состояния упрочняющих наночастиц на механические свойства сплава $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$. // Электронная микроскопия и прочность материалов Киев: ИПМ НАНУ. – 2013, вып. 19. – С.36-43. (Особистий внесок здобувача: аналіз структури, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
 19. Подрезов Ю.Н., Мильман Ю.В., Евич Я.И., **Ефимов Н.А.**, Коржова Н.П., Легкая Т.Н., Кисель В.М., Евдокименко Ю.И., Мельник В.Х. Прочностные свойства квазикристаллического покрытия, нанесенного на литейный эвтектический сплав алюминия. // Электронная микроскопия и прочность материалов Киев: ИПМ НАНУ. – 2013, вып. 19. – С. 44-50. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень).
 20. Мильман Ю.В., **Ефимов М.О.** Квазікристали нова атомна структура твердого тіла і матеріали з комплексом незвичайних властивостей. Вісник НАН України. 2012. – № 1. – С. 41- 48. (Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, підготовка рукопису статті)
 21. Mordyuk B.M., Prokopenko G.I., **Iefimov M.O.**, Sameljuk A.V. Properties of AMr6 aluminium alloy covered with surface layer reinforced by Quasi-Crystalline AlCuF particles. // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. 2012. – Vol. 34., No 5. – P. 671 - 685. **Q3.** (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень)
 22. Мильман Ю.В., Захарова Н.П., **Ефимов М.О.**, Шаровський А.О., Даниленко М.І. Наноструктурні сплави системи Al-Fe-Cr, що зміцнені квазікристалічними частками для використання при підвищених температурах. // Электронная микроскопия и прочность материалов. Киев: ИПМ НАНУ. 2012.– вып.18. – С.16-24. (Особистий внесок здобувача: аналіз структури, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
 23. Мильман Ю.В., **Ефимов Н.А.**, Гончарова И.В. Квазикристаллы – новый класс твердых тел с уникальными физическими свойствами. // Электронная микроскопия и прочность материалов Киев: ИПМ НАНУ. 2012.– вып.18. – С.3-15. (Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, підготовка рукопису статті).
 24. Mordyuk B.N., **Iefimov M.O.**, Grinkevych K.E., Sameljuk A.V., Danylenko M.I. Structure and wear of Al surface layers reinforced with AlCuFe particles using ultrasonic impact peening: Effect of different particle sizes. // Surface & Coatings Technology. 2011. – Vol. 205. – P. 5278–5284. **Q1.** (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
 25. Mordyuk B.N., **Iefimov M.O.**, Prokopenko G.I., Golub T.V., Danylenko M.I. Structure, microhardness and damping characteristics of Al matrix composite reinforced with AlCuFe or Ti using ultrasonic impact peening. // Surface & Coatings Technology. 2010. – Vol. 204. – P. 1590 – 1598. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.009> **Q1.** (Особистий внесок здобувача: аналіз структури, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
 26. Mil'man Yu.V., **Efimov N.A.**, Ul'Shin S.V., Bykov A.I., Neikov O.D., Samelyuk A.V. Mechanical properties of Al-Cu-Fe alloys sintered at high pressure. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2010. – Vol., 49 No. 5-6. – P. 280 – 288. DOI: 10.1007/s11106-010-9234-4. **Q3.** (Особистий

внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).

27. Мильман Ю.В., **Ефимов Н.А.**, Чугунова С.И., Голубенко А.А., Самелюк А.В. Исследование влияния температуры на механическое поведение квазикристаллов системы Al-Cu-Fe методом индентирования. // Электронная микроскопия и прочность материалов. Киев: ИПМ НАНУ. 2009. – вып.16. – С.60-67. (Особистий внесок здобувача: аналіз структури, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
28. Neikov O.D., Mil'Man Yu.V., Sirko A.I., Samelyuk A.V., Krainikov A.V., **Efimov N.A.** Al-Fe-Ce alloys based on water-atomized powders for high-temperature applications. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2007. – Vol. 46, No. 9-10.. – P. 429 – 435. <https://doi.org/10.1007/s11106-007-0067-8> **Q3**(Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень).
29. Semenov M.V., Kiz M.M., Sirko A. I., **Iefimov M.O.**, Byakova A.V., Milman Yu. V. Effect of plastic deformation on structure and mechanical properties of high-temperature strength Al-Fe-Cr powder alloys reinforced by submicroscaled quasicrystalline particles. // Nanosystem, Nanomaterials, and Nanotechnologies, 2007. – Vol.. 4, No. 4.– P.767– 783. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз).
30. **Iefimov M.O.**, Lotsko D.V., Milman Yu.V., Borisova A.L., Chugunova S.I., Astakhov Ye.A., Neikov O.D. Structure and high-temperature properties of the alloyed quasicrystalline Al-Cu-Fe powders and thermal-sprayed coatings from them. // High Temperature Materials and Processes. 2006. – Vol. 25, No.1-2. –P.31-38. <https://doi.org/10.1515/HTMP.2006.25.1-2.31>**Q3-2** (Особистий внесок здобувача: аналіз структури, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
31. Sirko A. I., Milman Yu. V., **Iefimov M.O.**, Neikov O. D., Zakharova N.P.High strength aluminum alloys reinforced by nanosize quasicrystalline particles for elevated temperature application. // High Temperature Materials and Processes. 2006. – Vol. 25, No.1-2. –P.19-29. <https://doi.org/10.1515/HTMP.2006.25.1-2.19>**Q3-2** (Особистий внесок здобувача: аналіз структури, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
32. **Yefimov M.**, Lotsko D., Milman Yu., Sameljuk A., Opanasenko O., Krapivka M. Structure peculiarities of Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂ ingots with a quasicrystalline component. // NATO Science Series, II: Mathematics, Physics and Chemistry, 2004. – Vol. 146. – P. 125-130. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2112-7> **12** (Особистий внесок здобувача: аналіз структури, обробка результатів досліджень, підготовка рукопису статті).
33. Slipenyuk A., Lotsko D., Milman Y. Kuprin V., **Yefimov M.**, Danylenko M. Influence of Scandium on Amorphization of Aluminum Alloys. // NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2004.– Vol. 146. – P. 199-124. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2112-7> **11** (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень)
34. Milman Yu. V., Lotsko D. V., Neikov O. D., Sirko A. I., **Iefimov M.O.**, Bilous A. N., Miracle D. B., Senkov O. N.. Processing, structure and mechanical behavior of rapidly solidified aluminum alloys containing quasicrystalline particles. // Materials Science Forum, 2002. – Vol. 396.-402. – P. **Q3-2**(Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень)
35. Neikov O. D., Milman Yu. V., Miracle D. B., Lotsko D. V., Sirko A. I., **Yefimov M.O.**, Sameljuk A. V. Properties of rapidly solidified powder aluminum alloys for elevated temperatures produced by water atomization. // Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 2002. P. 7/14-7/27.(Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень)

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

36. **Єфімов М.О.**, Хращевський О.Д., Єфімова. К.О., Поперенко Т.В. Вплив скандію на корозійну стійкість сплаву алюмінію системи Al-Cu-Fe, що містять квазікристалічну складову. // XV Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем 2025», 22 - 23 травня 2025. Чернігів, Україна (т.2). – С. 64 – 80. (Особистий внесок здобувача: обробка результатів досліджень, підготовка тез).

37. **Iefimov M.**, Zakharova N., Chugunova S., Golubenko A., Goncharuk V. Production of nanosized composite Al-Fe-Cr-Ti alloys and study of their plasticity in the temperature range. // IX міжнародна Самсонівська конференція MSRC-2024: “Матеріалознавство тугоплавких сполук”, 27 – 30 травня 2024. Київ, Україна. – С. 85. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
38. **Iefimov M.O.**, Zakharova N.P., Goncharuk V.A., Melnik V.Kh. Nanoquasicrystalline composite Al-Fe-Cr alloys for elevated temperature application. // Наноструктурні композитні сплави 12-та Міжнародна конференція «Нанотехнології та наноматеріали» (НАНО-2024). 21–24 серпня 2024. Ужгород, Україна. – С. 139. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
39. Yevdokymenko Yu., **Iefimov M.**, Frolov G., Iefimova K. Properties of HVOF-coatings from Al-Cu-Fe quasicrystalline alloy. //IX міжнародна Самсонівська конференція MSRC-2024: “Матеріалознавство тугоплавких сполук”. 27 – 30 травня 2024. Київ, Україна. – С.74. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень).
40. **Iefimov M.**, Zakharova N., Golubenko A., Kuprin V. Study of the structure, physical and chemical properties of Al-Cu-Fe quasicrystalline materials. // II International Scientific and Technical Conference an innovative solution to the pressing problems of the chemical mining industry. May 17, 2024. Nukus, Uzbekistan. – P.85. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
41. **Iefimov M.**, Goncharova I., Iefimova K., Kuprin V. Corrosion and electrochemical behavior of Al-Cu-Fe ingots containing quasicrystalline phase. // IX International Scientific and Practical Conference “Current Issues and Prospects for the Development of Science Research. June 19-20, 2024. Orléans, France. – P.359 – 356. (Особистий внесок здобувача: обробка результатів досліджень, підготовка тез).
42. Polishchuk S., Ustinov A., Skorodzievskii V., **Efimov N.**, Ulshin S., Demchenkov S., Kremenchutskii O. Mechanical and dissipative properties of Al-Cr-Fe coatings based on approximant phases. // International conference on welding and related technologies WRT-2024», 7–10 жовтня 2024. Яремча, Україна. – С.34. (Особистий внесок здобувача: обробка результатів досліджень).
43. **Єфімов М.О.**, Голубенко О.А., Чугунова С.І., Гончарова І.В. Дослідження твердості та пластичності квазікристалічних покриттів системи Al–Cu–Fe при різних температурах. // XIII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем 2023», 25 - 26 травня 2023. Чернігів, Україна. – С. 79 – 80. (Особистий внесок здобувача: обробка результатів досліджень, підготовка тез).
44. Ю.В.Мільман, Н.П.Захарова, **М.О.Єфімов**, Ю.В.Фальченко, А.Г.Покляцький, В.Є.Федорчук, Г.П.Кисла. Особливості зварювання сплавів системи Al – Cr – Fe – Ti, що містять квазікристалічну фазу. // X Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем -2020», 23-24 вересня 2020. Чернігів, Україна. – С.39 – 40. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень).
45. **Ефимов Н.А.**, Мильман Ю.В., Захарова Н.П., Шаровский А.О., Даниленко Н.И., Семенов Н.В. Алюминиевые сплавы, упрочненные наноквазикристаллическими частицами для работы при температурах до 300 °С. // Конференція „Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем”, присвяченої 70-річчю від дня заснування Інституту металофізики ім.Г.В.Курдюмова НАН України. 25-27 травня 2016, Київ, **Україна**. – С. 10. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
46. Мильман Ю.В., **Ефимов Н.А.**, Кисель В.М. Евдокименко Ю.И. Квазикристаллические термобарьерные покрытия системы Al-Cu-Fe полученные высокоскоростным воздушно-топливным напылением. // Конференція „Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем”, присвяченої 70-річчю від дня заснування Інституту металофізики ім.Г.В.Курдюмова НАН України. 25-27 травня 2016. Київ, **Україна**. – С. 140. (Особистий внесок здобувача: дослідження структури, обробка результатів досліджень, підготовка тез).

47. Мильман Ю.В., Захарова Н.П., Шаровский А.О., **Ефимов Н.А.**, Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е., Гончарук В.А. Свариваемые сплавы системы Al-Fe-Cr упрочненные наноквазикристаллическими частицами для работы при температурах до 300 °С. // 5 Міжнародна конференція HighMatTech. 5 – 8 жовтня 2015. Київ, **Україна**. – С.143. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурний аналіз, обробка результатів досліджень).
48. Milman Yu.V., **Iefimov M.O.** New Quasicrystalline Materials: Powders, Coatings and Bulk Materials // USA-Ukraine Workshop “Advanced Materials for Extreme Environment” 31 October - 2 November 2012 Kyiv, Ukraine. – P.35. (Особистий внесок здобувача: дослідження структури, обробка результатів досліджень).
49. Мильман Ю.В., Кисель В.М., Ефимов Н.А. Евдокименко Ю.И., Фролов Г.А., Нейков О.Д., Бучаков С.В. Квазикристаллические покрытия системы Al-Cu-Fe, полученные методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления. // Седьмая международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». 24–28 вересня 2012. Кацивелі, **Україна**. – С.154. (Особистий внесок здобувача: дослідження структури, обробка результатів досліджень).
50. Мильман Ю.В., Сирко А.И., Захарова Н.П., **Ефимов Н.А.**, Гончарук В.А., Шаровский А.О., Воропаев В.С., Нейков О.Д. Сплавы системы Al-Fe-Cr, дополнительно легированные тугоплавкими металлами - V, Nb, Mo для работы при температурах 300-400°С. // Конференция «ПМ-2012: Порошковая металлургия: її сьогодні і завтра, присвячена 60-річчю ПМ НАНУ». 27 – 30 листопада 2012. Київ, **Україна**. – С.171. (Особистий внесок здобувача: дослідження структури, обробка результатів досліджень).
51. Сирко А.И., Захарова Н.П., **Ефимов Н.А.**, Семенов Н.В., Мильман Ю.В., Федорчук В.Е., Фальченко Ю.В., Ищенко А.Я. Разработка методов сварки высокопрочных алюминиевых сплавов, упрочненных наноразмерными квазикристаллическими частицами. // 49 Международная конференция «Актуальные проблемы прочности 2010». 14 – 18 червня, 2010 Київ, **Україна**. – С.260. (Особистий внесок здобувача: дослідження структури, обробка результатів досліджень).
52. Музыка А.А., Сирко А.И., Захарова Н.П., **Ефимов Н.А.**, Нейков О.Д., Чайкина Н. Г. Исследование влияния способа получения порошков сплава Al-Cr-Fe на структуру и механические свойства полуфабрикатов. // 49 Международная конференция «Актуальные проблемы прочности 2010». 14 – 18 червня, 2010. Київ, **Україна**. – С.259. (Особистий внесок здобувача: дослідження структури, обробка результатів досліджень).
53. Iefimov M.O., Milman Yu.V., Ulshin S.V., Bykov O.I., Neikov O.D. Sintering of icosahedral quasicrystalline Al-Cu-Fe powders using high quasihydrostatic pressure. // International conference of sintering “Sintering-2009”. September 7 – 11, 2009. Kyiv, Ukraine.– P.66. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
54. Мильман Ю.В., Ефимов Н.А., Ульшин С.В. Наноквазикристаллы. Структура, механические свойства и применение. // Конференция «НАНСИС 2007, Наноразмерные системы. Будова-властивості-технології». 21-23 листопада 2007. Київ, **Україна**. – С.141. (Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, підготовка тез).
55. Ефимов Н.А., Мильман Ю.В., Куприн В.В., Даниленко Н.И. Формирование нано-размерных метастабильных квазикристаллов в быстро закаленном сплаве Al-13%Sc. // Конференция «НАНСИС 2007, Наноразмерные системы. Будова-властивості-технології». 21-23 листопада 2007. Київ, **Україна**. – С. 82. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
56. Мильман Ю.В., Ульшин С.В., **Ефимов Н.А.**, Устинов А.И. Полишук С.С. Механические свойства субмикронных и наноразмерных квазикристаллических покрытий. // Міжнародна конференція «HighMatTech 2007», 15-19 жовтня 2007. Київ, **Україна**. – С.309. (Особистий внесок здобувача: дослідження структури, обробка результатів досліджень).
57. Голубенко А.А., **Ефимов Н.А.**, Мильман Ю.В., Чугунова С.И. Температурная зависимость механических свойств квазикристаллов Al – Cu – Fe при индентировании. Міжнародна

- конференція «HighMatTech 2007», 15-19 жовтня 2007. Київ, Україна. – С.497. (Особистий внесок здобувача: рентгеноструктурне дослідження с, обробка результатів досліджень).
58. Milman Yu.V., **Efimov M.O.** Features of mechanical behaviour of nanocrystalline quasicrystalline materials. // International Conference “Clusters and nanostructured materials” (CNM’2006). 2006. Kyiv, Ukraine. – P.95-96. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень).
 59. Мильман Ю.В., Лоцко Д.В., **Ефимов Н.А.**, Самелюк А.В. Эффект легирования скандием в литых Al-Cu-Fe-квазикристаллах. // Міжнародна конференція «Современное материаловедение: достижения и проблемы MMS-2005». 26 – 30 вересня 2005. Київ, Україна. – С.72-73. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
 60. Мильман Ю.В., Лоцко Д.В., Ульшин С.В., Быков А.И., Тимофеева И.И., **Ефимов Н.А.** Исследование компактных материалов из легированных порошков системы Al-Cu-Fe, полученных под высоким давлением. // Міжнародна конференція «Современное материаловедение: достижения и проблемы MMS-2005». 26 – 30 вересня 2005. Київ, Україна. – С. 493-494. (Особистий внесок здобувача: обробка результатів досліджень).
 61. Мильман Ю.В., Сирко А.И., Самелюк А.В., **Ефимов Н.А.**, Даниленко Н.И., Гончарук В.А., Шаровский А.О., Воропаев В.С., Нейков О.Д., Лоцко Д.В., Миракл Д.Влияние различных методов сварки на структуру и механические свойства жаропрочных алюминиевых сплавов системы Al-Fe-Cr. // Міжнародна конференція «Современное материаловедение: достижения и проблемы MMS-2005». 26 – 30 вересня 2005. Київ, Україна. – С.772-773. (Особистий внесок здобувача: обробка результатів досліджень).
 62. Мордюк Б.Н., **Ефимов Н.А.** Получение дисперсных порошков AlCuFe квазикристалла с использованием ультразвуковых технологий. // Міжнародна конференція «Современное материаловедение: достижения и проблемы MMS-2005». 26 – 30 вересня 2005. Київ, Україна. – С.243-244. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень).
 63. Slipenjuk A., Lotsko D., Milman Yu., Kuprin V., **Yefimov N.**, Danylenko N. Influence of scandium on amorphization of aluminum alloys. // NATO Advanced Research Workshop "Metallic Materials with High Structural Efficiency". September 7-13, 2003. Kyiv, Ukraine. – P. 67. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень).
 64. **Yefimov M.**, Milman Yu., Lotsko D., Sameljuk A., Opanasenko O., Krapivka M. Structural peculiarities of Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂ ingots with quasicrystalline component // NATO Advanced Research Workshop "Metallic Materials with High Structural Efficiency". September 7-13, 2003. Kyiv, Ukraine. – P. 68. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
 65. Grinkevych K.E., Lotsko D.V., Milman Yu.V., Bykov O.I., Shurygina Z.P., Ponomarev S.S., Bilous A.M., **Yefimov M.O.** Influence of tribosystem components on the friction behavior of Al-Cu-Fe quasicrystal. // International Conference “Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges”. November 4 -8, 2002. Kyiv, Ukraine. – P. 12-13. (Особистий внесок здобувача: обробка результатів досліджень).
 66. **Yefimov M.O.**, Miracle D.B., Milman Yu.V., Slipenyuk A.N., Kuprin V.V., Danylenko M.I. Structure of rapidly solidified Al – 13 at. % Sc alloy. // International Conference “Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges”. November 4 -8, 2002. Kyiv, Ukraine. – P. 533-534. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).
 67. Lotsko D.V., Milman Yu.V., Miracle D.B., Sirko O.I., **Yefimov M.O.**, Bilous A.M., Danylenko M.I., Neikov O.D., Voropayev V.S. High strength aluminum-based alloys hardened by quasicrystalline nanoparticles. // International Conference “Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges”. November 4 -8, 2002. Kyiv, Ukraine. – P. 371–372. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін, обробка результатів досліджень, підготовка тез).

які додатково відображають наукові результати дисертації

68. Мільман Ю.В., Єфімов М.О. Матеріали квазікристалічні. Енциклопедія Сучасної України, Київ: Інститут енциклопедичних досліджень 2018, т.19, с.499.(Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, підготовка рукопису).
69. Мільман Ю.В., Єфімов М.О. Квазікристаллы. Структура, свойства и применение. Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2-х т., Київ: Академперіодика, ред. Л.М.Лобанов та ін. 2018, т.1. С. 311-338. (Особистий внесок здобувача: аналіз літературних джерел, підготовка рукопису).

Вважаємо, що дисертація Єфімова М.О. “Фізичні засади зміцнення сплавів алюмінію та покриттів, що містять квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe”, поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 (Фізика твердого тіла), виконана на високому науковому рівні і відповідає паспорту спеціальності 01.04.07 – “Фізика твердого тіла” та профілю спеціалізованої вченої

ради Д26.207.01. У докторській дисертації та наукових працях, які розкривають її результати, відсутні академічний плагіат, фабрикації та фальсифікації.

Робота може бути рекомендована до захисту на спеціалізованій вченій раді Д26.207.01 в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

Рекомендуються офіційні опоненти:

1. Член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України **Сидоренко Сергій Іванович** - професор кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки, Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона КПП ім. Ігоря Сікорського
2. Доктор фізико-математичних наук, професор **Рудь Олександр Дмитрович** - завідувач відділу «Будови і властивостей твердих розчинів» Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України
3. Доктор фізико-математичних наук, професор **Семенко Михайло Петрович** - професор кафедри фізики металів Фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Автореферат відповідає змісту дисертації і може бути надрукований у поданому вигляді.

Висновок комісії затверджено на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.207.01 від “ 15 ” листопада 2025 р., протокол № 4.

Члени комісії:

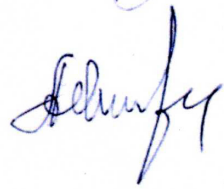
Член-кореспондент НАН України
доктор фізико-математичних наук

 Олег ГРИГОРЬЄВ

доктор фізико-математичних наук

 Олександр ВАСИЛЬЄВ

доктор фізико-математичних наук

 Олексій ОНОПРИЄНКО