

АНОТАЦІЯ

Грекова М.В. Структура і властивості модифікованих жароміцних нікелевих сплавів для деталей ракетних і реактивних двигунів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство. – Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро, 2021.

Робота виконана на кафедрі технології виробництва фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Дисертаційна робота присвячена матеріалознавчим питанням стабілізації структури і підвищення комплексу фізико-механічних властивостей жароміцних нікелевих сплавів для деталей ракетних та реактивних двигунів.

Мета роботи – підвищення фізико-механічних і корозійних властивостей жароміцних нікелевих сплавів для деталей ракетних та реактивних двигунів на основі встановлених закономірностей формування структури в результаті модифікування нанодисперсними композиціями.

Проведений аналіз сучасних напрямків підвищення властивостей жароміцних нікелевих сплавів, їх хімічних складів, структурної стабільності і фазового складу, режимів термічної обробки, приведена класифікація нікелевих сплавів I, II, III, IV покоління.

Не дивлячись на велику кількість наукових робіт, присвячених різноманітним аспектам матеріалів і сучасним технологіям виготовлення деталей авіаційно-космічної техніки, існує проблема підвищення фізико-механічних властивостей ЖНС. Це викликано тим, що деталі ракетних і авіаційних двигунів під час експлуатації схильні до дії агресивного середовища палива при підвищених температурах.

Найкращим способом підвищення якості сплавів – є спосіб модифікування тугоплавкими сполуками. Також розглянуті способи отримання нанодисперсних композицій. З існуючих методів, інтерес представляє плазмохімічний синтез, який

дозволяє отримувати нанодисперсні порошки з заданим складом і фракціями різних металів і сполук.

Підвищення якості сплавів модифікуванням наноматеріалами залишається не повністю вивченим, хоча наявні розробки і попередні дослідження інших учених свідчать про надзвичайну перспективність методу. Таким чином, дослідження по розробці жароміцних нікелевих сплавів на якісно новому рівні шляхом модифікування нанодисперсними матеріалами мають актуальне значення.

Матеріалами дослідження є ливарні нікелеві сплави ЖС6У-ВІ (ХН57ВКЮТМБЛ) і ЖС6К-ВІ (ХН65МВТКЮЛ), які є найбільш поширеними промисловими жароміцними сплавами для виготовлення робочих лопаток, турбінних дисків, кілець і інших елементів газових турбін, камер згоряння, вузлів деталей печей і інших виробів, які тривалий час працюють при підвищених температурах.

Для визначення впливу модифікатора на якість сплаву, досліджували структуру, фізико-механічні та експлуатаційні властивості досліджуваних сплавів до і після модифікування.

Оцінку макро- і мікроструктури нікелевих сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ до і після модифікування проводили металографічним аналізом. Розподіл легуючих елементів і структурних складових в об'ємі нікелевих сплавів проводили з використанням енергодисперсійного аналізу. Злами ударних зразків вивчали фрактографічним аналізом. Для вивчення показників фізико-механічних властивостей проводили вимір комплексу механічних властивостей. Для оцінки показників експлуатаційних властивостей визначали жаростійкість та довготривалу міцність сплавів до і після модифікування. Застосовані методи статистичної обробки експериментальних результатів, а також методи математичного планування експерименту з використанням Microsoft Office Excel.

При проведенні експериментальних досліджень ливарних ЖНС застосовували стандартні методи: оптичної металографії і електронної мікроскопії з комплексною методикою якісної і кількісної оцінки структурних складових, а також стандартні методи корозійних і механічних випробувань.

У третьому розділі обґрунтовано вибір комплексного модифікатора на основі нанодисперсних карбідів титану та кремнію для обробки жароміцних нікелевих сплавів.

На підставі результатів експериментальних досліджень, з використанням методу математичного планування експерименту розроблено склад модифікатора, що дозволяє отримати однорідну дрібнозернисту структуру і високий комплекс механічних властивостей нікелевих сплавів.

В результаті модифікування сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ нанодисперсним модифікатором на основі TiC та SiC отримана дрібнозерниста структура зразків з покращеним станом меж зерен, морфології карбідної фази без поверхневих дефектів. У модифікованих зразках досягнуто подрібнення зерна до 15...20 мкм тоді як у вихідному стані розмір зерна складав 60...100 мкм, тобто в результаті модифікування розмір зерна зменшується у 4...5 разів.

Карбідна фаза у вихідних зразках сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ присутня у вигляді крупних включень на стиках меж зерен, які є очагами розвитку тріщин та концентраторами напруг при експлуатації деталей. Після модифікування відбувається подрібнення і глобуляризація карбідних фаз, що сприяло зміцненню сплавів за механізмом дисперсійного твердіння. Карбідні включення та інтерметалідні фази розміром 1...5 мкм у модифікованих зразках рівномірно розподілені по об'єму.

Мікрорентгеноспектральним аналізом модифікованих зразків встановлено підвищений вміст карбідів титану, а також карбідних фаз типу MeC, Me₂₃C₆, Me₆C в спектрах включень. Наявність дисперсних карбідів TiC підтверджує ефект модифікування.

Проведені дослідження зміни механічних та експлуатаційних властивостей сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ в результаті модифікування. Проведені випробування зразків сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ на жароміцність, жаростійкість та довготривалу міцність. Встановлено підвищення комплексу механічних властивостей модифікованих сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ в порівнянні з немодифікованим станом. Досягнуто однорідний розподіл легуючих елементів в

структурі сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ, та збільшення мікротвердості матриці сплавів на 17...24%.

Фрактографічні дослідження зламів показали, що в немодифікованому стані руйнування зразків інтеркристалітне, по границях крупних зерен. В модифікованих зразках присутній змішаний, переважно ямковий злам, що свідчить про в'язкий характер руйнування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. *Отримали подальший розвиток* уявлення про вплив модифікування розплавів на параметри структури та властивості жароміцних нікелевих сплавів. Підтверджено, що використання комплексних нанодисперсних модифікаторів дозволяє активно впливати на макро- і мікроструктуру, фізико-механічні та корозійні властивості нікелевих сплавів та деталей з них.

2. *Вперше запропоновано* механізм поетапної дії комплексного наномодифікатора на основі TiC та SiC при кристалізації сплавів, що полягає в тому, що на першому етапі відбувається кристалізація матричної γ -фази, наночастинки карбідів розміром 50...100 нм служать первинними центрами кристалізації; на подальших етапах відбувається утворення та ріст кристалів γ' -фази на основі Ni₃Ti, Ni₃Al та утворюється карбідна фаза на основі карбідів Ti, Cr, W, Mo, Nb.

Реалізація цього механізму сприяє подрібненню зерна сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ в 4...5 разів, підвищенню дисперсності структурних складових в 2...3 рази і рівномірному розподілу їх в матриці сплавів.

Досягнуто підвищення комплексу механічних властивостей сплавів у модифікованому стані: границі міцності σ_B – на 10...12%, границі плинності $\sigma_{0,2}$ – на 12...14 %, відносного подовження δ – на 14 %, ударної в'язкості KCU – на 43%.

3. *Вперше встановлено* існування перерозподілу легуючих елементів та утворення перехідного шару між зміцнюючими фазами та матрицею сплавів, в якому вміст W і Mo перевищує їх вміст у матриці. Утворення перехідного шару перешкоджає дифузії титану з карбїду титана в матрицю, що забезпечує стабільність фаз та ефективність зміцнення досліджуваних сплавів при

підвищених температурах.

4. Вперше встановлено, що зміцнююча γ' -фаза в модифікованих сплавах займає об'єм 75%, однорідно розподілена в матриці, не схильна до коагуляції й розчинення при температурах експлуатації лопаток ГТД. γ' -фаза в модифікованих сплавах збагачена атомами Si, що дозволило підвищити жаростійкість модифікованих сплавів при температурах до 1000°C та зменшити глибину міжкристалітної корозії на 15...20% в порівнянні з немодифікованим станом.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено раціональний склад комплексного модифікатора на основі наночасток TiC та SiC розміром до 100 нм, одержаних плазмохімічним синтезом. З використанням методу регресійного аналізу розраховано кількість комплексного модифікатора 0,1% від маси розплаву у складі, мас. %: 30...40% карбіда титану, 10...15% карбіда кремнію, 10...20% - порошок алюмінієвого сплаву АМг6, решта – подрібнений порошок нікелевого сплаву.

2. Розроблено технологічну схему модифікування нікелевих сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ, експериментально встановлено температурно-часові параметри дії модифікатора: $t=1560^\circ\text{C}$, 5...7 хв. Технологічна схема проведена відповідно до розробленої в даній дисертаційній роботі технологічної інструкції №102.25210.00138 (Додаток Б).

3. Отримана однорідна дрібнозерниста структура сплавів зі зменшенням зерна в 4...5 разів. Підвищено комплекс механічних властивостей сплавів у порівнянні з не модифікованим станом:

- границя міцності σ_B з 990 до 1152 МПа (на 10...12%),
- границя плинності $\sigma_{0,2}$ з 731 до 825 МПа (на 12...14 %),
- відносне подовження δ з 3,3 до 4,2 (на 14%),
- ударна в'язкість КСУ з 340 до 490 кДж/м² (на 43%),
- тривала міцність на 10%.

4. Підвищено жаростійкість нікелевих сплавів при температурах до 1000°C зі зменшенням глибини міжкристалітної корозії на 15...20%.

5. В умовах ДП «ВО ПМЗ ім. О.М. Макарова» проведено опробування

технологічної схеми модифікування нанодисперсними композиціями жароміцних нікелевих сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ для деталей двигунів.

Експериментальне випробування в умовах ДП «ВО Південний машинобудівний завод ім. Л.М. Макарова» (Додаток А) показало, що використання комплексного модифікування дозволило підвищити механічні та експлуатаційні властивості виробів авіаційних і ракетних двигунів.

Стендові випробування в умовах «Харківського механічного заводу» (Додаток В) показали підвищення механічних властивостей досліджуваних жароміцних нікелевих сплавів.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджені в освітній процес кафедри технології виробництва ДНУ імені Олеся Гончара при викладанні дисциплін «Спеціальні матеріали в авіа- та ракетобудуванні» і «Наноматеріали та нанотехнології в РКТ» для бакалаврів та магістрів за спеціальністю 132 Матеріалознавство (Додаток Г).

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, модифікування, жароміцність, жаростійкість, механічні властивості, структура, нанодисперсний модифікатор, робочі лопатки, газотурбінний двигун.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Грекова М.В., Калинин А.В., Джур Е.А., Носова Т.В. Комплексное модифицирование многокомпонентных сплавов. *Космическая наука и технология*. 2019. №25(3). С.25-31 [**Index Copernicus, Web of Science**].

2. Технологічні особливості обробки наноконпозиціями ливарних жаростійких сплавів для авіаційних двигунів / Грекова М.В., Калинина Н.Е., Калинин В.Т. и др.// *Авиационно-космическая техника и технология*, №7(159). 2019. С.134-138 [**Index Copernicus, Google Scholar**].

3. Механические и коррозионные свойства многокомпонентных сплавов, модифицированных дисперсными композициями / Калинина Н.Е., Калинин В.Т., Грекова М.В., Мамчур С.И., Носова Т.В. // Строительство, материаловедение, машиностроение. 2018. Вып. 104. С. 146-150.

4. Влияние легирования и наномодифицирования на структурообразование и свойства жаропрочных никелевых сплавов / А.Е. Калиновская, Н.В. Калинина, В.Т. Калинин, М.В. Грекова // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка». Вип. 17. Том 2. 2013. №4(21). С. 52-55.

5. Підвищення структурної стабільності та властивостей жароміцних нікелевих сплавів для лопаток ГТД обробкою наноматеріалами / Грекова М.В. // Вестник ХНАДУ, вып. 82. 2019. С. 108-113. [[Google Scholar](#)].

Статті в міжнародних виданнях:

6. Investigation of the influence of nanodispersed compositions obtained by plasmochemical synthesis on the crystallization processes of structural alloys / Джур Е.А., Калинин А.В., Грекова М.В., Гученков М.В. // Eureka: physics and engineering. 2017. №6. P. 56-61 [[Scopus](#)].

7. M. Hrekova, «Method of heat-proof nickel alloys mechanical properties improvement for rocket engines» // 70th International Astronautical Congress, Washington, D.C. 2019. P. 124 [[Scopus](#)].

Тези в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій:

8. Ресурсосбережна технологія модифікування жароміцних нікелевих сплавів / Грекова М.В., Калинина Н.Е., Давидюк А.В. // Науково-практична конференція «Дніпровська орбіта», Дніпро. 2018. С. 101-102.

9. Калинин А.В., Грекова М.В., Давидюк А.В.Є, Юшкевич О.П. Повышение коррозионной стойкости конструкционных сплавов обработкой тугоплавкими модификаторами Міжнародна конференція «Інноваційні технології

в науці та освіті. Європейський досвід»: Матеріали у 2-х томах. Том II. – Дніпро-Відень, 2017. С. 51-55.

10. Грекова М.В. Получение многокомпонентных сплавов для изделий РКТ с применением нанотехнологий // XXI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», Дніпро. 2019. С. 278.

11. Грекова М.В. Вопросы наноструктурного материаловедения при получении многокомпонентных сплавов для изделий РКТ // VII Міжнародна конференція «Космічні технології: сьогодення й майбутнє», Дніпро. 2019. С. 75.

12. Грекова М.В. Вплив гомогенності шихтових матеріалів які містять наноконпозиції на структуру відливок нікелевих сплавів // XXII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», Дніпро. 2020. С. 280.

SUMMARY

M. Hrekova Structure and properties of modified heat-resistant nickel alloys for parts of rocket and jet engines. - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

PhD thesis for the scientific degree of Philosophy Doctor in a specialty 132 Materials Science. - Oles Honchar Dnipro National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2021.

The work was performed at the Department of Production Technology of the Faculty of Physics and Technology of Oles Honchar Dnipro National University.

The dissertation work is devoted to material science issues of stabilization of structure and increase of complex of physical and mechanical properties of heat - resistant nickel alloys for details of rocket and jet engines.

The purpose of the work is to increase the physico-mechanical and corrosion properties of heat-resistant nickel alloys for parts of rocket and jet engines based on the rules of structure formulation as a result of modified nanodisperse compounds.

The analysis of modern directions of increase of properties of heat-resistant nickel alloys, their chemical compositions, structural stability and phase composition, modes of heat treatment is carried out, the classification of nickel alloys of I, II, III, IV generation is resulted.

Despite the large number of scientific papers on various aspects of materials and modern technologies for the manufacture of aerospace parts, there is a problem of improving the physical and mechanical properties of the alloy. This is because the parts of rocket and aircraft engines during operation are exposed to aggressive fuels at elevated temperatures.

The best way to improve the quality of alloys is to modify the refractory compounds. Also considered are methods for producing nanodispersed compositions. Of the existing methods, of interest is plasma chemical synthesis, which allows obtaining nanodispersed powders with a given composition and fractions of various metals and compounds.

Improving the quality of alloys by modifying nanomaterials remains not fully understood, although the available developments and previous studies of other scientists indicate the extreme prospects of the method. Thus, research on the development of heat-resistant nickel alloys at a qualitatively new level by modifying nanodispersed materials is of great importance.

The research materials are foundry nickel alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI, which are the most common industrial heat-resistant alloys for the manufacture of blades, turbine discs, rings and other elements of gas turbines, combustion chambers, components of furnaces and other products that operate for a long time at elevated temperatures.

To determine the effect of the modifier on the quality of the alloy, the structure, physico-mechanical and operational properties of the studied alloys before and after modification were investigated.

Evaluation of the macro- and microstructure of nickel alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI before and after modification was performed by metallographic analysis. The distribution of alloying elements and structural components in the volume of nickel

alloys was performed using energy dispersion analysis. Fractures of impact specimens were studied by Fractography analysis. To study the indicators of physical and mechanical properties, a complex of mechanical properties was measured. Heat resistance and long-term strength of alloys before and after modification were determined to evaluate the performance properties. Methods of statistical processing of experimental results, and methods of mathematical planning of experiment with use of Microsoft Office Excel are applied.

In conducting experimental studies of foundry, ZhNS used standard methods: optical metallography and electron microscopy with a comprehensive method of qualitative and quantitative assessment of structural components, as well as standard methods of corrosion and mechanical testing.

The third section substantiates the choice of a complex modifier based on nanodispersed titanium and silicon carbides for the processing of heat-resistant nickel alloys.

Based on the results of experimental research, using the method of mathematical planning of the experiment, the optimal composition of the modifier was developed, which allows obtaining a homogeneous fine-grained structure and a high set of mechanical properties of nickel alloys.

As a result of modification of alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI by the nanodispersed modifier based on TiC and SiC the fine-grained structure of samples with the improved condition of grain boundaries, morphology of a carbide phase without surface defects is received. In the modified samples, grain grinding was achieved up to 15... 20 mkm, while in the initial state the grain size was 60... 100 mkm, as a result of modification the grain size decreases by 4 ... 5 times.

The carbide phase in the initial samples of alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI is present in the form of large inclusions at the joints of grain boundaries, which are the centers of crack development and stress concentrators in the operation of parts. After modification, the carbide phases are ground and globularized, which contributed to the strengthening of alloys by the mechanism of dispersion hardening. Carbide inclusions

and intermetallic phases with a size of 1... 5 mkm in the modified samples are evenly distributed by volume.

Micro-X-ray spectral analysis of the modified samples revealed an increased content of titanium carbides, as well as carbide phases such as MeC, Me₂₃C₆ and Me₆C in the spectra of inclusions. The presence of dispersed TiC carbides confirms the modification effect.

Studies of changes in mechanical and operational properties of ZhS6K-VI and ZhS6U-VI alloys as a result of modification are carried out. Tests of samples of alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI on heat resistance, heat resistance and long-term durability are carried out. An increase in the complex of mechanical properties of modified alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI in comparison with the unmodified state is established. A homogeneous distribution of alloying elements in the structure of alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI was achieved, and an increase in the microhardness of the matrix of alloys by 17...24%.

Fractography studies of fractures showed that in the unmodified state the destruction of the samples is intercrystalline, within large grains. In the modified samples there is a mixed, mainly pit fracture, which indicates the viscous nature of the fracture.

Based on the conducted researches and the received results application of ZhNS and the nomenclature of details of rocket engines and aviation equipment is presented.

Scientific novelty:

1. *Got further development of* idea about influence of retrofitting of fusions on the parameters of structure and property of heatproof nickeliferous alloys. It is confirmed, that the use of complex nanodispersible modifiers allows actively to influence on macro and microstructure, mechanical and corrosive properties of nickeliferous alloys and details from them.

2. The mechanism of stage-by-stage action of complex nanomodifier *is first offered* on the basis of TiC and SiC during crystallization of alloys, that consists in that on the first stage there is crystallization of matrix γ phase, nanoparticle of carbides the size of 50...100 nm serve as by the primary centers of crystallization; on the further

stages there are formation and height of crystals γ' of phase on the basis of Ni_3Ti , Ni_3Al and a carbidic phase appears on the basis of carbides of Ti, Cr, W, Mo, Nb.

Realization of this mechanism assists growing of grain of alloys of ZhS6K-VI and ZhS6U-VI shallow in 4...5 times, to the increase of dispersion of structural constituents in 2...3 times and even distribution them in the matrix of alloys.

The increase of complex of mechanical properties of alloys is attained in the modified state: σ_B - by 10...12%, $\sigma_{0.2}$ - by 12...14%, δ - by 14%, KCU - by 43%.

3. Existence of redistribution of alloying elements and formation of transitional layer *is first set* between strengthening phases and matrix of alloys, in that content of W and Mo exceeds their content in a matrix. Formation of transitional layer prevents to diffusion of titan from the carbide of titan in a matrix that provides stability of phases and efficiency of strengthening of the investigated alloys at increase temperatures.

4. *It is first set* that a strengthening γ' phase in the modified alloys occupies a volume 75% homogeneously up-diffused in a matrix, not apt to coagulation and dissolution at the temperatures of exploitation of shoulder-blades of GTE. γ' a phase in the modified alloys is enriched by the atoms of Si, that allowed to promote heat-tolerance of the modified alloys at temperatures to 1000°C and to decrease the depth of corrosion on 15...20 comparing to the unmodified state.

The practical significance of the results:

1. A rational composition of a complex modifier based on TiC and SiC nanoparticles up to 100 nm in size obtained by plasma chemical synthesis has been developed. Using the method of regression analysis, the optimal amount of complex modifier 0.1% by weight of the melt in the composition, wt. %: 30...40% titanium carbide, 10 ... 15% silicon carbide, 10... 20% - powder aluminum alloy AMg6, the rest - crushed powder of nickel alloy.

2. The technological scheme of modification of nickel alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI is developed, the temperature-time parameters of action of the modifier are experimentally established: $t = 1560^\circ\text{C}$, 5...7 min. The technological scheme is carried out in accordance with the technological instruction №102.25210.00138 developed in this dissertation.

3. The homogeneous fine-grained structure of alloys with grain reduction in 4... 5 times is received. The complex of mechanical properties of alloys in comparison with not modified condition is increased:

- σ_B from 990 to 1152 MPa (10... 12%),
- $\sigma_{0.2}$ from 731 to 825 MPa (by 12... 14%),
- δ from 3.3 to 4.2 (by 14%),
- KCU from 340 to 490 kJ/m² (43%)
- long-lasting strength by 10%.

4. Increased heat resistance of nickel alloys at temperatures up to 1000 ° C with a decrease in the depth of intergranular corrosion by 15... 20%.

5. In terms of SE "VO PMZ O.M. Makarov" tested the technological scheme of modification by nanodisperse compositions of heat-resistant nickel alloys ZhS6K-VI and ZhS6U-VI for engine parts.

Experimental test in the conditions of SE "VO PMZ O.M. Makarov" showed that the use of complex modifications has improved the mechanical and operational properties of aircraft and rocket engines.

Bench tests in the conditions of the Kharkiv Mechanical Plant showed an increase in the mechanical properties of the studied heat-resistant nickel alloys.

The materials of the dissertation are introduced into the educational process of the Department of Production Technology of Oles Honchar National University in teaching disciplines "Special materials in aircraft and rocketry" and "Nanomaterials and nanotechnologies in RKT" for bachelors and masters in 132 Materials Science.

Keywords: heat-resistant nickel alloys, modification, heat resistance, mechanical properties, structure, nanodisperse modifier, blades, gas turbine engine.

LIST OF PhD-STUDENT PULICATIONS

Articles in scientific professional publications of Ukraine:

1. Grekova M.V., Kalinin A.V., Dzhur E.A., Nosova T.V. Complex modification of multicomponent alloys. Space science and technology. 2019. No. 25 (3). P. 25-31 [**Index Copernicus, Web of Science**].

2. Technological features of processing by nanocompositions of foundry heat-resistant alloys for aircraft engines / Grekova M.V, Kalinina N.E, Kalinin V.T // Aerospace Engineering and Technology, №7 (159). 2019. P.134-138 [**Index Copernicus, Google Scholar**].

3. Mechanical and corrosion properties of multicomponent alloys modified with dispersed compositions / Kalinina N.Ye., Kalinin V.T, Grekova M.V, Mamchur S.I, Nosova T.V. // Construction, materials science, mechanical engineering. 2018. Issue 104.P.146-150.

4. Influence of alloying and nanomodification on structure formation and properties of heat-resistant nickel alloys / A.E. Kalinovskaya, N.E., Kalinina, V.T. Kalinin, M.V. Grekova // Bulletin of the Dnipropetrovsk University. The series "Rocket and space technology". V. 17. Volume 2. 2013. No. 4 (21). P. 52-55.

5. Improving the structural stability and properties of heat-resistant nickel alloys for gas turbine blades by processing nanomaterials / Grekova M.V // Bulletin of KhNADU, issue. 82. 2019. P. 108-113. [**Google Scholar**].

Articles in international publications:

6. Investigation of the influence of nanodispersed compositions obtained by plasmochemical synthesis on the crystallization processes of structural alloys / Dzhur E.A, Kalinin A.V, Grekova M.V, Guchenkov M.V // Eureka: physics and engineering. 2017. №6. P. 56-61 [**Scopus**].

7. M. Hrekova, "Method of heat-proof nickel alloys mechanical properties improvement for rocket engines"//70th International Astronautical Congress, Washington, D.C. 2019. P. 124. [**Scopus**].

Abstracts in the materials of domestic and international conferences:

8. Resource-saving technology of modification of heat-resistant nickel alloys / Grekova M.V, Kalinina N.E, Davydyuk A.V // Scientific-practical conference "Dnieper Orbit", Dnipro. 2018. P.101–102.

9. Kalinin A.V., Grekova M.V., Davidyuk A.V., Yushkevich O.P. Increasing the corrosion resistance of structural alloys by treatment with refractory modifiers International conference "Innovation technologies in science and technology. European dosvid": Materials in 2 volumes. Volume II. - Dnipro-Vienna, 2017. P.51-55.

10. Grekova M.V. Obtaining multicomponent alloys for RKT products using nanotechnologies // XXI International Youth Science and Practice Conference "Human and Space", Dnipro. 2019. P. 278.

11. Grekova M.V. Issues of nanostructured materials science in the production of multicomponent alloys for RKT products // VII International Youth Science and Practice Conference " Human and Space ", Dnipro. 2019. P. 75.

12. Grekova M.V. Infusion of homogeneity of charge materials as to place nanocompositions on the structure of nickel alloys // XXII International Youth Science and Practice Conference "Human and Space", Dnipro. 2020. P.280.

