

**Створення методів пластичного формоутворення конструкцій з нового зварювального сплаву системи Al-Mg-ПМ-РЗМ з високими механічними властивостями для авіакосмічного машинобудування**

**Создание методов пластического формообразования конструкций из нового сварочного сплава системы Al-Mg-ПМ-РЗМ с высокими механическими свойствами для авиакосмического машиностроения**

**Creation of methods for plastic shaping of structures from a new welding alloy of the Al - Mg - Transition metals - Rare earth elements system with high mechanical properties for aerospace engineering**

1. **Номер державної реєстрації** 0119U100665
2. **Науковий керівник** – д.т.н., проф. Тітов В.А., Титов В.А., Titov Vyacheslav A.
3. **Суть розробки, основні результати.**

**(Укр.)** Створено методи забезпечення високих механічних властивостей при пластичному формоутворенні конструкцій з нового зварювального сплаву системи Al-Mg-ПМ-РЗМ для авіакосмічного машинобудування. Розроблено двостадійний підхід до деформування, коли на першій стадії виконується деформування в умовах великих деформацій зсуву для більш рівномірного перерозподілення фазових складових та зменшення величини розміру зерен – гомогенізації матеріалу за рахунок механічного впливу, а на другій стадії – формоутворення конструкції. Отримані базові знання щодо впливу пластичної деформації в реалізуємих процесах (пресування штаби, гаряче та холодне прокатування полоси) на модифікацію структури металу і фізико-механічні властивості матеріалу деталей. Розроблено рекомендації щодо корегування складових компонент в системі легування сплаву та запропоновано новий експериментальний алюмінієвий сплав системи Al-Mg-Cr-La. На основі отриманих знань розроблені методи проектування процесів і оснащення для реалізації технології виготовлення ефективних конструкцій з розробленого сплаву для виробів наукоємного машинобудування, в т.ч. газотурбінних двигунів, ракетної техніки, тощо. Впровадження технологій використання нового алюмінієвого сплаву для виробів наукоємного машинобудування забезпечило зниження матеріалоємності на 10-15%, підвищення корозійної стійкості на 12-17%, підвищення ресурсу використання в 1,5...2,0 рази. Новий алюмінієвий сплав пройшов апробацію на підприємствах ДП ЗМКБ “Прогрес” ім. академіка О.Г. Івченка та АТ “Мотор Січ”, м. Запоріжжя при виготовленні експериментальних деталей, що підтверджено відповідними актами.

**(Рос.)**

Созданы методы обеспечения высоких механических свойств при пластическом формообразовании конструкций нового сварочного сплава системы Al-Mg-ПМ-РЗМ для авиакосмического машиностроения. Разработан двухстадийный подход к деформированию, когда на первой стадии выполняется деформирование в условиях больших деформаций сдвига для более равномерного перераспределения фазовых составляющих и уменьшения величины размера зерен – гомогенизации материала за счет механического воздействия, а на второй стадии – формообразования конструкции. Получены базовые знания о влиянии пластической деформации в реализуемых процессах (прессование штабы, горячее и холодное прокатывание полосы) на модификацию структуры металла и физико-механические свойства материала деталей. Разработаны рекомендации по корректировке составляющих компонентов в системе легирования сплава и предложен новый экспериментальный алюминиевый сплав системы Al-Mg-Cr-La. На основе полученных знаний разработаны методы проектирования процессов и оснастки для реализации технологии изготовления эффективных конструкций из разработанного сплава для изделий наукоёмкого машиностроения, в т.ч. газотурбинных двигателей, ракетной техники и

т.д. Внедрение технологий использования нового алюминиевого сплава для изделий наукоемкого машиностроения обеспечило снижение материалоемкости на 10-15%, повышение коррозионной стойкости на 12-17%, повышение ресурса использования в 1,5...2,0 раза. Новый алюминиевый сплав прошел апробацию на предприятиях ГП ЗМКБ "Прогресс" им. академика О.Г. Ивченко и АО "Мотор Сич", г. Запорожье при изготовлении экспериментальных деталей, что подтверждено соответствующими актами.

**(Eng)** Methods have been developed to ensure high mechanical properties during plastic forming of structures of a new welding alloy of the Al - Mg- Transition Metals - Rare earth elements system for aerospace engineering. A two-stage approach to deformation has been developed, when at the first stage deformation is performed under conditions of large shear deformations for a more uniform redistribution of phase components and a decrease in the size of the grains - homogenization of the material due to mechanical action, and at the second stage - the formation of the structure. Basic knowledge of the effect of plastic deformation in the processes being implemented (pressing of staffs, hot and cold rolling of the strip) on the modification of the metal structure and the physical and mechanical properties of the material of the parts has been obtained. Recommendations for adjusting the constituent components in the alloying system were developed and a new experimental aluminum alloy of the Al-Mg-Cr-La system was proposed. On the basis of the knowledge gained, methods for designing processes and tooling have been developed for the implementation of the technology for the manufacture of efficient structures from the developed alloy for high-tech engineering products, incl. gas turbine engines, rocket technology, etc. The introduction of technologies for the use of a new aluminum alloy for high-tech machine-building products provided a decrease in material consumption by 10-15%, an increase in corrosion resistance by 12-17%, an increase in the resource of use by 1.5÷2.0 times. The new aluminum alloy has been tested at the enterprises of the State Enterprise ZMKB "Progress" them. Academician O.G. Ivchenko and Motor Sich JSC, Zaporozhye in the manufacture of experimental parts, which is confirmed by the relevant acts.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

1. Патент на корисну модель № 141502 Україна. Спосіб виготовлення виробів з подвійною обшивкою дифузійним зварюванням та надпластичним формуванням / Тітов В.А., Вишневський П.С.; Кондратюк Е.В.; Гараненко Т.Р.; Рехта О.С. КПІ ім. Ігоря Сікорського. – № u201910303 Оpubл. 10.04.2020, Бюл. №7 <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=267547>

2. Патент на корисну модель № 121502 Україна. Спосіб зміцнення заготовок пластичним деформуванням / Івахов А.А.; Тітов В.А.; Вишневський П.С.; Кондратюк Е.В. КПІ ім. Ігоря Сікорського. – № a201800551 Оpubл. 10.06.2020, Бюл. №11 <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=268738>

3. Патент на корисну модель № 140364 Україна. Спосіб виготовлення гнутих деталей несиметричного перерізу / Тітов В.А., Мозговий В.Ф., Вишневський П.С., Качан О.Я., Сохан Д.В. (Україна) КПІ ім. Ігоря Сікорського – № u 2019 06529 Оpubл. 25.02.2020, Бюл. №4. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=266128>

4. Патент на корисну модель № 124745 Україна. Спосіб виготовлення виробів з подвійною обшивкою дифузійним зварюванням та надпластичним формуванням / Тітов В.А.; Вишневський П.С.; Кондратюк Е.В.; Гараненко Т.Р.; Рехта О.С. (Україна) КПІ ім. Ігоря Сікорського. – № a 2019 10301 Оpubл. 10.11.2021, Бюл. №45. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278926>

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Науково технічний рівень виконаної роботи **відповідає світовому рівню** та перевищує його за окремими показниками. Алюмінієві сплави системи Al-Mg мають

високу корозійну стійкість, забезпечують отримання рівномірних зварних з'єднань. Їх широко використовують для виготовлення виробів авіакосмічного комплексу і в криогенній техніці (-253 градусів Цельсія). Істотним недоліком цих сплавів є низькі характеристики міцності (уявна межа текучості менше або дорівнює 170...180 МПа; тимчасовий опір руйнуванню дорівнює 340...360 МПа). В світовій практиці ставиться задача підвищення міцності алюмінієвих сплавів базової системи Al-Mg. Зокрема на заміну відомого сплаву 5063 (уявна межа текучості дорівнює 220 МПа) в США розробляють сплави типу Smart, але відомості про них відсутні. В Україні проводять розробки в цьому напрямку в Інституті проблем матеріалознавства НАН України та в Дніпровському національному університеті спільно з КБ «Південне» розробкою сплаву системи Al-Mg-Sc (01570) уявна межа текучості якого дорівнює 250 МПа.

Вперше у світовій практиці показано вплив на характеристики пластичності алюмінієвого сплаву легуючих елементів Cr та La. Встановлено, що визначений вміст легуючих елементів, що забезпечують високий рівень механічних, пластичних та корозійних властивостей, впливає на реологічні властивості сплаву, що визначає специфіку ізотермічного деформування та нові технологічні підходи. На основі наукових результатів розроблені технічні рекомендації по використанню нового алюмінієвого сплаву в монолітних та зварних конструкціях, технологічні рекомендації по проектуванню процесів виготовлення конструкцій з розробленого алюмінієвого сплаву, а також рекомендації для конструкторів щодо технологічності сплаву. Розроблені принципово нові способи та пристрої захищені патентами України для обробки пластичним деформуванням заготовок, що мають зварні шви. Наукові результати будуть впроваджені на підприємствах машинобудівного комплексу, що підтверджується попередніми та діючими госпдоговірними роботами. Зацікавленість у використанні результатів підтверджена офіційними листами Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства Національної академії наук України а також промисловими замовниками АТ «Мотор Січ», ЗМКБ «Прогрес ім. О.Г. Івченко.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок.**

Впровадження технологій використання нового алюмінієвого сплаву для виробів наукоємного машинобудування забезпечило зниження матеріалоемності на 10-15%, підвищення корозійної стійкості на 12-17%, підвищення ресурсу використання в 1,5...2,0 рази.

#### **7. Потенційні користувачі.**

Створені методи пластичного формоутворення можуть застосовуватись на підприємствах і в організаціях різних галузей промисловості: машинобудуванні, металургійному і гірничому комплексах, авіа- і суднобудуванні, теплоенергетиці та підприємствах авіакосмічного комплексу України, де широко розповсюджені конструкції машинобудування створені методами пластичного формоутворення і гостро стоїть проблема підвищення ефективності їх виробництва.

Наукові результати будуть впроваджені на підприємствах машинобудівного комплексу, що підтверджується попередніми та діючими госпдоговірними роботами. Зацікавленість у використанні результатів підтверджена офіційними листами Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства Національної академії наук України а також промисловими замовниками АТ «Мотор Січ», ЗМКБ «Прогрес ім. О.Г. Івченко.

#### **8. Стан готовності розробки.**

Розроблені методи пластичного формоутворення конструкцій з нового зварювального сплаву системи Al-Mg-ПМ-РЗМ з високими механічними властивостями для авіакосмічного машинобудування, розроблено двостадійний підхід до деформування конструкцій з нового зварювального сплаву системи Al-Mg-ПМ-РЗМ, розроблено рекомендації щодо корегування складових компонент в системі легування сплаву та

запропоновано новий експериментальний алюмінієвий сплав системи Al-Mg-Cr-La, розроблені методи проектування процесів і оснащення для реалізації технології виготовлення ефективних конструкцій з розробленого сплаву для виробів наукоємного машинобудування, в т.ч. газотурбінних двигунів, ракетної техніки, тощо. Можлива розробка дослідно-промислових зразків нового устаткування, що може бути впроваджено у промислове виробництво.

#### 9. Існуючі результати впровадження.

Розроблені методи пластичного формоутворення конструкцій з нового зварювального сплаву системи Al-Mg-ПМ-РЗМ з високими механічними властивостями для авіакосмічного машинобудування впроваджено на ЗМКБ „Прогрес” ім. ак. Івченко О.Г. та АТ „Мотор Січ” (м. Запоріжжя).

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail. КПІ ім. Ігоря Сікорського, механіко-машинобудівний інститут, кафедра технології виробництва літальних апаратів, (044) 204-80-33, [vat.kpi@gmail.com](mailto:vat.kpi@gmail.com)

#### 11. Фото розробки.



Рис. 1. Зразки отримані пресуванням



Рис. 2. Зразки отримані прокатуванням

#### 12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання.

1. Конструкторсько-технологічні рішення типових елементів порожнистих лопаток // Тітов В.А., Гараненко Т.Р. / Проблеми тертя та зношування – 2019, - 3(84), - с. 69-75. – ISSN 0370-2197
2. Тітов В.А. Экспериментально-аналитический метод построения модели вязкопластичного материала для титанового сплава ВТ6 на основе испытаний на изгиб / В.А. Титов, Т.Р.Гараненко, А.В. Титов // Mechanics and Advanced Technologies – 2019, - №3 (87), - с. 26-37.- ISSN 2521-1943.
3. Гараненко Т.Р. Розробка конструкторсько-технологічних рішень виготовлення порожнистої лопатки з титанових сплавів / Т.Р. Гараненко / Обработка материалов давлением. – 2019. - №2 (45). – С. 128-135. – ISSN 2076-2151.

4. Т. Р. Гараненко Оцінка деформуємості титанового сплаву в умовах ізотермічного формоутворення // Гараненко Т. Р., Тітов А. В. / *Mechanics and Advanced Technologies* #2 (89), 2020. – С. 131-137.
5. Anton Lavrinenkov, Nataliia Zlochevska Influence of complex ultrasound vibrations and composite lubricants on wear resistance of materials of endoprosthesis «*Machines. Technologies. Materials.*», Vol. 14 (2020), Issue 3. PP 117-119
6. Borys R., Titov V. Ensuring the quality of the connection of layers from different metals in the manufacture of bi-metallic tubular elements by drawing *Mechanics and Advanced Technologies* #1 (85), 2019. P. 63-70
7. Луговський О.Ф. Експериментальне дослідження стійкості конструкційних матеріалів до кавітаційної ерозії / О.Ф. Луговський, А. І. Зілінський, А.Д. Лаврінєнков // *Mechanics and Advanced Technologies* – 2020. – № 90. – с. 29-33. ISSN 2521-1943.
8. Тітов В.А. Моделювання технологічного процесу видавлювання заготовок компресорних лопаток/ Тітов В.А., Бень А.М // *Обробка металів тиском.* – 2019. - №1(48). –с.53-57
9. Алієва Л.І., Тітов А.В. Корденко М.Ю. Моделювання процесів поперечного бокового видавлювання // *Обробка металів тиском.* – 2019. -№1(48). –с. 35-44
10. Мозговий О. Розповсюдження механічної енергії гібридними композитами з полімерною матрицею / Олександр Мозговий, Ольга Герасимова, Андрій Тітов // *Актуальні проблем математики, фізики і технологій, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського.*- Вінниця, 2019.- вип.16.- с.129-135.
11. Герасимова О. Особливості процесу вигладжування за наявності проміжного шару на поверхні деталі / Ольга Герасимова, Олександр Мозговий, Андрій Тітов // *Актуальні проблем математики, фізики і технологій, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського.*- Вінниця, 2019.- вип.16.- с.123-125.
12. Герасимова О.В. Определение площади контактного сферического индентора с поверхностью детали при выглаживании / Ольга Герасимова, Андрій Тітов // *Проблеми тертя та зношування*, 2019 –с.46-50
13. Орлюк М.В. Снижение вероятности гофрообразования при многопереходной вытяжке деталей из нержавеющей стали 08X18H10T (фахове) / Орлюк М.В., Пиманов В.В., Савченко А.В. // *Обработка материалов давлением:– Краматорск: ДГМА,* – 2019. – № 1 (48). – С. 138-145.
14. N. Zlochevska Investigation of different deformation schemes for obtaining fine-grain structure of cast aluminum alloy ak 7// N. Zlochevska, A. Lavrinenkov, V. Koreva, V. Pasichnyk / *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайло Остроградського* № 6/2021(131)
15. Sergey Sheyko, Valerii Mishchenko, Anton Matiukhin, Olha Bolsun, Anton Lavrinenkov, Elena Kulabneva. Universal equation of metal resistance dependence to deformation on conditions of thermoplastic processing. *Metal 2021. 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials. Conference Proceedings*, pp. 329-334
16. V. Titov, N. Zlochevska, A. Lavrinenkov, V. Skrypnikova, D. Korotin Study of the kinematics of the movement of solid inclusion in plastic flow *Journal of the Technical University of Gabrovo* P. 42-46.
17. V. A. Titov, V. O. Koreva Increasing the resource of plasticity of aluminum alloy amg6 by thermomechanical treatment under uniaxial tension conditions *Journal of the Technical University of Gabrovo* P. 39-42.

**Кандидатські дисертації**

1. Гараненко Тетяна Романівна «Розробка процесу формоутворення порожнистої лопатки з титанових сплавів для газотурбінних двигунів» Спеціальність 05.03.05 – Процеси обробки металів тиском, Керівник: д.т.н., проф. Тітов Вячеслав Андрійович, 2019р., м. Київ

### Статті у виданнях, що входять до бази Scopus (основні)

1. Effect of rolling parameters on forming quality of flat cross wedge rolling thread shafts Shao, Y., Peng, W., Yu, X., Oleksandr, M., Titov, V. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering this link is disabled, 2021, 235(2), pp. 230–237  
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954408920952597>  
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56182050400>
2. Development of an experimental technique and evaluate limit of plastic deformation of titanium alloy OT-4 under superplastic conditions / Vyacheslav Titov, Tetiana Garanenko // Solid State Phenomena – 2019, vol. 291, pp. 183-192  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.183>  
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56182050400>
3. Міцність і циклічна тріщиностійкість термодетформованих сплавів системи Al-Mg-Sc / О.П. Остап, Р.В. Чепіль, В.А. Тітов, С.Л. Полівода, В.Я. Подгурська // Фізико-хімічна механіка матеріалів – 2021, -57 №3.- с.118-125  
<http://pcmm.ipm.lviv.ua/pcmm-2021-3u.pdf>  
<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/218>  
<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=17804&tip=sid&clean=0>
4. Вплив РЗМ на структуру і властивості литих та деформованих сплавів системи Al-Mg-Sc / О.П. Остап, С.Л. Полівода, Р.В. Чепіль, В.А. Тітов та ін// Фізико-хімічна механіка матеріалів – 2021, -57 №6.- с.120-127  
<http://pcmm.ipm.lviv.ua/>
5. Lavrinenkov A. Method for Calculating a Cylindrical Ultrasonic Cavitation Filter Chamber with a Regeneration Effe //Luhovskyi, O. F., Zilinskyi, A. I. Shulha A.V., Gryshko I. A. та інші / Visnyk NTUU KPI Seriiia-Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia – 2020 – № 82 – pp. 62-60. ISSN 2310-0389 DOI: [10.20535/RADAP.2020.82.52-60](https://publons.com/publon/35283959/)  
<https://publons.com/publon/35283959/>

13. **Ключові слова.** Алюмінієвий сплав, зварювальний сплав, перехідні метали, рідкоземельні метали, механічні властивості, мікроструктура, термомеханічна обробка, пресування, прокатування, моноколеса.