

<https://doi.org/10.15407/knit2021.06.098>

УДК 620.3:669.018

Є. О. ДЖУР¹, проф. кафедри технології виробництва, д-р техн. наук,
проф., акад. Міжнародної Академії Біоенерготехнологій

ORCID ID: 0000-0002-9026-0134

E-mail: dzhurya@gmail.com

Н. Є. КАЛІНІНА¹, проф. кафедри технології виробництва, д-р техн. наук, проф.,
Акад. Академії наук Вищої освіти, лауреат премії К. Ф. Стародубова

ORCID ID: 0000-0003-3810-6778

E-mail: kalinina.dnu@gmail.com

О. Є. ДЖУР¹, доцент кафедри маркетингу та міжнародного менеджменту, канд. техн. наук, доцент

ORCID ID: 0000-0003-3307-9985

E-mail: dzhur@i.ua

О. В. КАЛІНІН², наук. співроб. кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів, канд. техн. наук

ORCID ID: 0000-0003-3597-758X

E-mail: vt.kalinin@gmail.com

Т. В. НОСОВА¹, старш. наук. співроб., доцент кафедри технології виробництва, канд. техн. наук, доцент

ORCID ID: 0000-0002-0855-568X

E-mail: amaretanya0512@gmail.com

С. І. МАМЧУР¹, доцент кафедри технології виробництва, канд. техн. наук, доцент

ORCID ID: 0000-0002-8146-8849

E-mail: 1964stella1965@gmail.com

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

пр. Гагаріна 72, Дніпро, Україна, 49010

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

вул. Чернишевського 24 а, Дніпро, Україна, 49005

ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕФОРМОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, МОДИФІКОВАНИХ НАНОКОМПОЗИЦІЯМИ

Мета роботи — одержання дисперсної структури та підвищення механічних та технологічних властивостей деформованих алюмінієвих сплавів шляхом обробки розплавів нанодисперсними модифікаторами. Встановлено вплив модифікування тугоплавкими нанодисперсними композиціями карбонітриду титану і карбїду кремнію на зеренну структуру і властивості алюмінієвих сплавів. Досліджено алюмінієві сплави системи Al-Mg, Al-Mg-Sc. Наукова новизна роботи полягає у встановленні механізму впливу нанодисперсного модифікатора на зеренну структуру та комплекс властивостей алюмінієвих сплавів. Запропоновано склад модифікатора — нанодисперсні порошки карбїду кремнію (SiC) та карбонітриду титану (TiCN) фракцій 50...100 нм. Мікроструктуру сплавів вивчали на оптичних мікроскопах. Міцнісні властивості сплавів визначали на машині TIRAtest300. Рідиннотекучість визначали методом спіральної проби. Досягнуто поліпшення технологічних властивостей алюмінієвих сплавів після модифікування. Рідиннотекучість виявилася підвищеною у сплавах AlMg5 і 1545 у середньому на 10 %. Отримано однорідну дисперсну структуру алюмінієвих сплавів після модифікування.

Цитування: Джур Є. О., Калініна Н. Є., Джур О. Є., Калінін О. В., Носова Т. В., Мамчур С. І. Підвищення властивостей деформованих алюмінієвих сплавів, модифікованих наноконпозиціями. *Космічна наука і технологія*. 2021. Т. 27, № 6 (133). С. 98—104. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.098>

Встановлено подрібнення зерна модифікованого сплаву 1545 в 1.6 рази порівняно із вихідним станом, що сприяло підвищенню міцнісних характеристик. Міцнісні властивості модифікованих сплавів підвищені на 14...20 %. Проведено серію дослідно-промислових плавок сплавів АМг5 та 1545. Доведено ефективний вплив тугоплавкого модифікатора на основі карбиду кремнію та карбонітриду титану на властивості алюмінієвих сплавів. Результати роботи мають практичне значення для виробів авіаційної та космічної техніки.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, наномодифікатор, зерно, межа текучості, структура.

ВСТУП

Мета роботи — одержання дисперсної структури та підвищення механічних властивостей деформованих алюмінієвих сплавів шляхом обробки розплавів нанодисперсними модифікаторами.

В ракетно-космічній техніці алюмінієві сплави систем Al-Mg, Al-Mg-Sc є конструкційними матеріалами для виготовлення силових елементів трубопроводів, сильфонів, що працюють в умовах значних навантажень, коливань температур в агресивних середовищах. Тому до деформованих алюмінієвих сплавів пред'являються вимоги технологічності, підвищеної міцності в поєднанні з пластичністю, а також корозійної стійкості [1, 2, 12, 13]. Досягнення високих якісних показників виробів визначається технологією їхнього виготовлення. Удосконалення технологічних способів виготовлення відповідальних виробів ракетно-космічної техніки з алюмінієвих сплавів пов'язане з мікролегуванням і модифікуванням розплавів. У зв'язку з цим тематика даної роботи, спрямована на підвищення комплексу механічних, технологічних і корозійних властивостей деформованих алюмінієвих сплавів, є актуальною.

Зварювальний сплав АМг5 системи Al-Mg належить до сплавів, які не зміцнюють термічною обробкою [2, 3]. З метою зміцнення проводять нагартування на 10...20 % [1], при цьому межа міцності збільшується, але пластичність зменшується. Одержані зварні з'єднання в цілому задовольняють вимоги щодо механічних властивос-

тей, проте вони характеризуються зменшенням в зоні термічного впливу. На основі сплавів АМг5 і АМг6 розроблено серію алюмінієвих сплавів, мікролегованих скандієм (Sc) [3, 4].

Сплави системи Al-Mg-Sc поєднують високу міцність, питому міцність з задовільною пластичністю. Сплав 1545 створено на базі сплаву АМг5 і містить як мікролегуєчий елемент 0.3...0.5 % Sc.

Згідно з діаграмою стану Al-Sc у системі утворюються чотири інтерметалідні сполуки: Al_3Sc , Al_2Sc , $AlSc$, $AlSc_2$, які забезпечують зміцнення сплаву [3, 5]. Сполука Al_3Sc найбільш дисперсна та здійснює модифікувальну дію при кристалізації сплаву.

Істотний вплив на подрібнення структури сплавів та зміцнення чинить модифікування розплавів [4, 6—8].

Однак відомі роботи з модифікування алюмінієвих сплавів менш дефіцитними рідкоземельними металами. Відомостей з модифікування сплавів систем Al-Mg-Sc дисперсними композиціями недостатньо [9, 10].

МАТЕРІАЛ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджували алюмінієві сплави системи Al-Mg і Al-Mg-Sc. Хімічний склад сплавів наведено в табл. 1.

Порошки модифікатора — карбиду кремнію SiC та карбонітриду титану TiC,N дисперсністю 100 нм отримано методом плазмохімічного синтезу [4, 8]. Мікроструктуру сплавів вивчали на

Таблиця 1. Хімічний склад сплавів системи Al-Mg-Sc

Сплав	Хімічний склад, % мас						
	Mg	Fe	Si	Mn	Cu	Ti	Sc
АМг5	4.8	0.5	0.5	0.3	0.1	0.1	—
1545	4.2	0.3	0.3	—	—	—	0.2

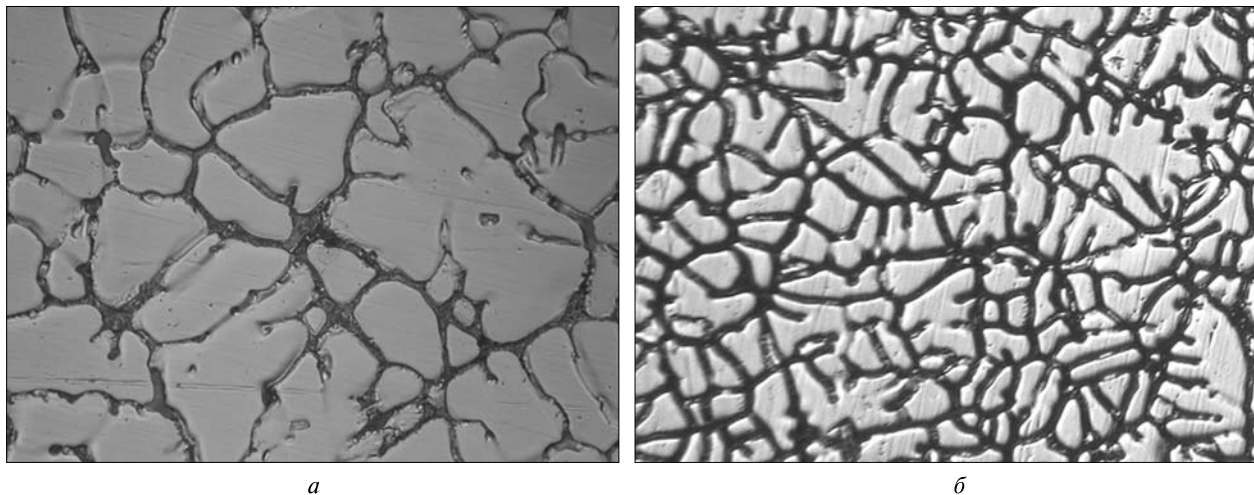


Рис. 1. Мікроструктура алюмінієвого сплаву 1545: а — до модифікування, ×200, б — після модифікування, ×200

Таблиця 2. Фізико-механічні властивості дисперсних модифікаторів [2, 4]

Параметр	Карбід кремнію SiC	Карбонітрид титану TiCN
Щільність, кг/м ³	3200	4950
Температура плавлення, °C	2600	3120
Тип фази	впровадження	впровадження
Кристалічна ґратка	ГЦК	ГЦК
Твердість за Віккерсом, МПа	2800	3600
Межа міцності, МПа	457	560

оптичних мікроскопах. Механічні властивості сплавів визначали на машині TIRAtest300.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отриману порошкову суміш з нанопорошків та алюмінієвої пудри пресували на прес-автоматі ТА-3 при зусиллі 4 МПа. Діаметр таблеток модифікатора становив 15 мм, висота — 8 мм. Дослідження структури і властивостей алюмінієвих сплавів в литому і деформованому стані виконували до і після модифікування.

У промислових умовах виконано дослідні плавки сплавів АМг5 і 1545, модифікованих нанодисперсними порошками. Тонкодисперсні частинки наномодифікатора є активними геттерами у розплаві.

Атоми у сполуках SiC та TiCN пов'язані між собою ковалентним зв'язком, який є найміцні-

шим і зумовлює високу температуру плавлення, достатню твердість і хімічну стійкість дисперсної сполуки (табл. 2).

Через ускладнення з прямим введенням частинок у розплав (ймовірність окислення і загоряння, висока здатність до пилоутворення) таблетки модифікатора вводили в рідкий розплав за спеціально розробленою технологією [13]. Температура розплаву становила 780 °C, час дії модифікатора — 5...7 хв.

Таблиця 3. Результати визначення рідиннотекучості сплавів

Сплав	Рідиннотекучість, мм
АМг5, вихідний	270
АМг5, модифікований	280
1545, вихідний	330
1545, модифікований	350

Оцінку зеренної структури проводили на по-
здовжніх перетинах проб, відлитих у кокіль.

Вивчення мікроструктури сплавів показало
(рис. 1), що у немодифікованому сплаві середній
розмір зерна становить 240 мкм, а у модифікова-
ному стані зменшується до 150 мкм. Зерно у мо-
дифікованих зразках виявилось у 1.6 раза дріб-
нішим, ніж у вихідних, що запобігає утворенню
дендритної структури під час деформування.

Встановлено механізм кристалізації алюмініє-
вих сплавів, що містять наномодифікатори.

Наночастинки SiC і TiCN розмірами 100 нм є
первинними центрами кристалізації алюмініє-
вих сплавів. Їхня кількість у розплаві становить
 $10^{10} \dots 10^{12}$ [4] частинок на 1 кг розплаву. Частин-
ки модифікатора мають температуру плавлення
вище за 3000 °С, вони не розчиняються в алюмі-
нієвому розплаві, але є первинними зародками
кристалізації та сприяють утворенню дрібно-
зернистої структури. В результаті на цих зарод-
ках кристалізації утворюються дрібнодисперсні
кристали матричного сплаву. Наночастинки SiC
і TiCN змінюють і внутрішню будову сплавів,
призводять до виділення зміцнювальних фаз в
об'ємі зерен. Утворення дисперсної, модифіко-
ваної структури забезпечує підвищення механіч-
них властивостей сплавів, зокрема межі текучос-
ті, яка є структурно-чутливим параметром.

В роботі визначали рідиннотекучість сплавів
методом спіральної проби. Температура заливки

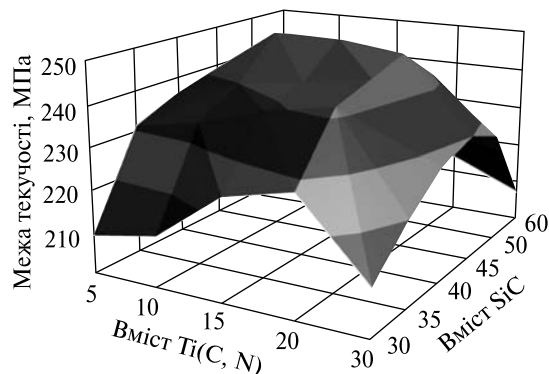


Рис. 2. Залежність межі текучості сплаву 1545 від
складу модифікатора

перевищувала температуру плавлення досліду-
ваних сплавів на 100 °С. Значення рідиннотеку-
чості сплавів до і після модифікування наведено
в табл. 3.

Таким чином, модифікування підвищує рі-
диннотекучість досліджуваних сплавів АМг5 і
1545 на 9.4 % і 10.3 % відповідно.

Для перевірки дії комплексного модифікато-
ра та оптимізації його складу було проведено 10
лабораторних і дослідно-промислових плавок
алюмінієвого сплаву 1545. Склад комплексного
модифікатора та результати механічних випро-
бувань литих зразків сплаву 1545 представлено в
табл. 4.

Таблиця 4. Межа текучості і розмір зерна алюмінієвого сплаву 1545, обробленого комплексним модифікатором

Номер плавки	Склад модифікатора, мас. %			$\sigma_{0,2}$, МПа	Розмір зерна, мкм
	SiC	Ti(C,N)	Al-пудра		
0	0	0	0	197	241
1	30	5	65	209	204
2	40	10	50	240	195
3	30	15	55	224	196
4	40	15	45	242	188
5	40	20	40	245	181
6	40	30	30	227	196
7	45	5	50	227	195
8	45	10	45	249	166
9	35	15	50	239	174
10	45	15	40	250	152

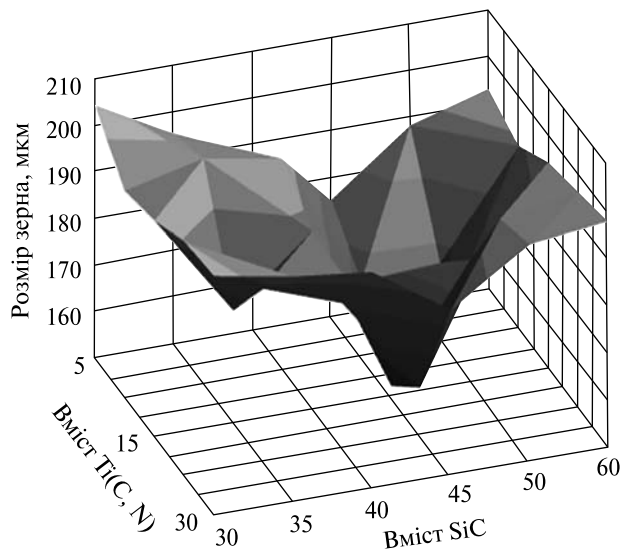


Рис. 3. Залежність розміру зерна сплаву 1545 від складу модифікатора

Проведені експерименти свідчать, що найменше зерно (152...160 мкм) і найбільшу межу текучості (245...250 МПа) мають зразки сплаву 1545 із таким вмістом компонентів: 40...45 % SiC, 15...20 % Ti (C,N), алюмінієва пудра — інше.

Пластичність (відносне подовження) модифікованого сплаву зберігалася на рівні 12...14 % відносно вихідного стану.

За експериментальними даними у програмі Microsoft Office Excel 2007 побудовано графіки залежності межі текучості (рис. 2) і розміру зерна (рис. 3) сплаву 1545 від складу комплексного модифікатора. Як випливає з рис. 2, пік межі текучості становить 250 МПа. На рис. 3 показано, що найменший розмір зерна 152 мкм відповідає оптимальному складу комплексного модифікатора.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що перспективним способом підвищення властивостей деформованих алюмінієвих сплавів є модифікування тугоплавкими наноконпозиціями.

2. Для обробки деформованих алюмінієвих сплавів запропоновано комплексний модифікатор на основі нанодисперсного карбїду кремнію та карбонїтриду титану розміром часток 50...100 нм.

3. В результаті дослідження одержано подрібнення зерна модифікованих сплавів та підвищення міцнісних властивостей. Запропоновано механізм кристалізації модифікованих сплавів.

4. Встановлено залежності впливу кількості наномодифікатора на міцнісні властивості та розмір зерна алюмінієвого сплаву системи Al-Mg-Sc.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богуслаєв В. О., Качан О. Я., Калініна Н. Є., Мозговий В. Ф., Калінін В. Т. *Авіаційно-космічні матеріали і технології*. Запоріжжя: Мотор Січ, 2010. 385 с.
2. Большаков В. І., Куцова В. З., Котова Т. В. *Наноматеріали і нанотехнології*. Д.: ПДАБА, 2016. 220 с.
3. Грекова М. В., Калінін А. В., Джур Е. А., Носова Т. В. Комплексное модифицирование многокомпонентных сплавов. *Космічна наука і технологія*. 2019. 25, № 3. С. 25—31.
4. Калініна Н. Є., Никифорчин Г. М., Калінін О. В., Маруха В. І., Кирилів В. І. *Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів*. Львів: Простір-М, 2017. 230 с.
5. Костин В. А., Григоренко Г. М., Жуков В. В. Модифицирование структуры сварных швов высокопрочных низколегированных сталей наночастицами тугоплавких металлов. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2016. Вып. 89. С. 93—98.
6. Куцова В. З., Погребна Н. Е., Хохлова Т. С. та ін. *Алюміній та сплави на його основі*. Дніпропетровськ: Пороги, 2004. 136 с.
7. Мильман Ю. В. Влияние скандия на структуру, механические свойства и сопротивление коррозии сплавов алюминия. *Прогресивні матеріали і технології*. Київ: Академперіодика, 2003. Т. 1. С. 335—360.
8. *Неорганическое материаловедение. Энциклопедическое издание в 2 т.* Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. Киев: Наук. думка, 2009. Т. 2. 854 с.
9. Сабуров В. П., Черепанов А. Н., Жуков М. Ф., Галевский Г. В. и др. *Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов*. Новосибирск: Наука, 2005. 344 с.

10. Суругин А. Г. Кинетика образования малых частиц при объемной конденсации. *Физико-химия нанодисперсных систем*: Сб. тр. Ин-та металлургии им. А. А. Байкова. 1997. С. 15—21.
11. Dron' M., Golubek O., Dubovik L., et al. Analysis of the ballistic aspects of the combined method of deorbiting space objects from the near-Earth orbits. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* 2019. **2**, № 5. P. 48—54.
12. Golubek O., Dron' M., Dubovik L., et al. Development of the combined method to de-orbit space objects using an electric propulsion system. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* 2020. **4**, № 5. P. 78—87.
13. T.S.O.H.K. Guarni. *Scanning ProboVritrography*. Dordrect: Klivet Academic Plenum Rublishers. 2011. 224 p.

REFERENCES

1. Bohuslaiev V. O., Kachan O. Ia., Kalinina N. Ie., Mozghovyi V. F., Kalinin V. T. (2010). *Aerospace materials and technologies*. Zaporizhzhia: Motor Sich.
2. Bolshakov V. I., Kutsova V. Z., Kotova T. V. (2016). *Nanomaterials and nanotechnologies*. Dnipropetrovsk.
3. Grekova M. V., Kalinin A. V., Dzhur E. A., Nosova T. V. (2019). Complex modification of multicomponent alloys. *Space Science and Technology*, **25** (3), 25—31.
4. Kalinina N. Ie., Nykyforchyn H. M., Kalinin O. V., Marukha V. I., Kyryliv V. I. (2017). *Structure, properties and use of structural nanomaterials*. Lviv: Prostir-M.
5. Kostin V. A., Grigorenko G. M., Zhukov V. V. (2016). Modification of the structure of welds of high-strength low-alloy steels with nanoparticles of refractory metals. *Construction, materials science, mechanical engineering*, No. 89, 93—98.
6. Kutsova V. Z., Pohrebna N. E., Khokhlova T. S., et al. (2004). *Aluminum and alloys based on it*. Dnipropetrovsk.
7. Milman Yu. V. (2003). Influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. *Advanced materials and technologies*. Kyiv: Academic Periodicals, Vol. 1.
8. Hnesyna H. H., Skorokhoda V. V. (2009). *Inorganic materials science*. Encyclopedic edition in 2 vol. Kyiv: Naukova dumka, Vol. 2.
9. Saburov V. P., Cherepanov A. N., Zhukov M. F., Galevskij G. V., et al. (1995). *Plasma-chemical synthesis of ultrafine powders and their application for the modification of metals and alloys*. Novosibirsk: Nauka.
10. Sutugin A. G. (1987). Kinetics of formation of small particles during volumetric condensation. *Physicochemistry of nanodispersed systems: Proceedings of the A. A. Baikov Institute of Metallurgy*.
11. Dron' M., Golubek O., Dubovik L., et al. (2019). Analysis of the ballistic aspects of the combined method of deorbiting space objects from the near-Earth orbits. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.*, **2** (5), 48—54.
12. Golubek O., Dron' M., Dubovik L., et al. (2020). Development of the combined method to de-orbit space objects using an electric propulsion system. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.*, **4**, (5), 78—87.
13. T.S.O.H.K. Guarni. (2011). *Scanning ProboVritrography*. Dordrect: Klivet Academic Plenum Rublishers.

Стаття надійшла до редакції 06.05.2021
Після доопрацювання 15.11.2021
Прийнято до друку 22.11.2021

Received 06.05.2021
Revised 15.11.2021
Accepted 22.11.2021

Y. O. Dzhur¹, Dr. Sci. in Tech., Professor, Professor at the Department of Production Technology

ORCID ID: 0000-0002-9026-0134

E-mail: dzhurya@gmail.com

N. E. Kalinina¹, Dr. Sci. in Tech., Professor, Professor at the Department of Production Technology

ORCID ID: 0000-0003-3810-6778

E-mail: kalinina.dnu@gmail.com

O. Y. Dzhur¹, Ph.D. in Tech., Associate Professor, Associate Professor

at the Department of Marketing and International Management

ORCID ID: 0000-0003-3307-9985

E-mail: dzhur@i.ua

O. V. Kalinin², Ph.D. in Tech., Researcher at the Department of Materials Science and Materials Processing

ORCID ID: 0000-0003-3597-758X

E-mail: vt.kalinin@gmail.com

T. V. Nosova¹, Ph.D. in Tech., Associate Professor, Associate Professor

at the Department of Production Technology, Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0002-0855-568X

E-mail: amaretanya0512@gmail.com

S. I. Mamchur¹

Ph.D. in Tech., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Production Technology

ORCID ID: 0000-0002-8146-8849

E-mail: 1964stella1965@gmail.com

¹Oles Honchar Dnipro National University

72, Gagarina Ave, Dnipro, 49010 Ukraine

²Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture

24a, Chernyshevskogo Str., Dnipro, 49005 Ukraine

IMPROVEMENT OF PROPERTIES OF DEFORMED ALUMINUM ALLOYS MODIFIED BY NANOCOMPOSITIONS

The objective of the work is to obtain a dispersed structure and increase the mechanical and technological properties of deformed aluminum alloys by treating melts with nanodispersed modifiers. The effect of the modification by refractory nanodispersed compositions of titanium carbonitride and silicon carbide on the grain structure and properties of aluminum alloys has been established. Aluminum alloys of the Al-Mg, Al-Mg-Sc system have been studied. The scientific novelty of the work lies in the establishment of the mechanism of influence of the nanodispersed modifier on the grain structure and the set of properties of aluminum alloys. The composition of the modifier is proposed — nanodispersed powders of silicon carbide (SiC) and titanium carbonitride (TiCN) with fractions of 50...100 nm. The microstructure of alloys was studied under optical microscopes. The strength properties of the alloys were determined on a TIRAtest300 machine. Fluidity was determined using the spiral test method. In the modified samples of aluminum alloys, improved technological properties were achieved. It was found that, in alloys AMg5 and 1545, the fluidity increased by an average of 10 %. After the modification, we obtained a homogeneous dispersed structure of aluminum alloys. It turned out that the average grain size in the modified samples of alloy 1545 decreased 1.6 times in comparison with the initial state due to the increase of strength characteristics by 14...20 %. A series of experimental-industrial melting of AMg5 and 1545 alloys has been carried out. The effective influence of a refractory modifier based on silicon carbide and titanium carbonitride on the properties of aluminum alloys has been proved. The results of the work are of practical importance for aviation and space technology products.

Keywords: aluminum alloy, nanomodifier, grain, liquid fluidity, fluidity limit, structure.