

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ ДЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Ю.Г. Квасницька¹, Г.П. Мьяльница², К.Г. Квасницька¹, І.І. Максютя¹, В.О. Нога¹

¹ФТІМС НАН України, Україна.

03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34/1. E-mail: jul.kvasnitskaja@gmail.com

²ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект».

54018, м. Миколаїв, просп. Богоявленський, 42-А. E-mail: mialniza@gmail.com

З метою підвищення екологічності та безпечності процесу виготовлення виливків охолоджувальних лопаток турбіни енергетичного газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт проведені дослідження по визначенню впливу нової технології на формування структури та забезпечення необхідного хімічного та фазового складу виробів. Виливки лопаток було одержано із жароміцного корозійностійкого сплаву СМ88У у вакуумно-індукційній печі УППФЗ-М литтям за моделями, що витоплюються. Для збереження навколишнього середовища запропоновано використати автоклав щодо видалення керамічного стрижня з внутрішньої порожнини виливків. Керамічні стрижні одержували методом твердофазного спікання з використанням суміші на основі Al_2O_3 . Така технологія одержання виливків лопаток з внутрішніми каналами дозволила на два порядки скоротити час такої важливої операції, як видалення стрижня. Досліджено макро- і мікроструктуру поперечних зразків, вирізаних з перової і хвостової частин п'яти лопаток, аналіз яких після термічної обробки показав, що карбіди у перовій частині мають розмір 10...30 мкм, у хвостовій — 20...50 мкм. Спостерігалось рівномірне виділення зміцнюючої γ' -фази і розчинення значної частки (γ - γ')-евтектики. Виділення γ' -фази мають кубічну форму і групуються в кластери. Встановлено, що макро- і мікроструктура, одержаних за вдосконаленою технологією лопаток, відповідає вимогам діючих стандартів. Бібліогр. 15, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: жароміцний корозійностійкий сплав; лопатка турбіни; газотурбінний двигун; макро- і мікроструктура; сплав СМ88У

Вступ. Стан і розвиток більшості галузей виробництва у всьому світі залежить від рівня розвитку енергетики, як основної сфери економіки. Енергетичне машинобудування — ключова галузь виробництва та обслуговування промислового обладнання, що використовується для розподілу електроенергії, а також для її створення і передачі. Основний фактор, що сприяє зростанню даної галузі, це виготовлення енергетичного обладнання включно з газотурбінними установками.

Розвиток вітчизняного газотурбобудування пов'язано з підвищенням технічних характеристик газотурбінних двигунів (ГТД), насамперед, з їх відповідальними конструктивними елементами — лопатками [1–3]. Підвищення температури газу на вході в турбіну у ГТД останнього покоління вимагає високої надійності властивостей робочих лопаток першого ступеня турбіни. Точне вакуумне литво заготовок з охолоджувальними порожнинами за моделями, що витоплюються, є основним способом виготовлення лопаток. Так як на вході в турбіну повітряно-газовий потік подається з температурою до 1150...1200 °С, у цих лопатках для

інтенсифікації повітряного охолодження передбачені внутрішні спеціальні канали для охолодження основи до температури 900...950 °С.

Сучасні дослідники весь час працюють над вдосконаленням матеріалів та технологій виготовлення складнопрофільних деталей для підвищення експлуатаційних характеристик лопаток ГТД [4–6]. У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України (ФТІМС НАН України) сумісно з співробітниками підприємств, що виробляють газотурбінні установки, розробляються нові склади жароміцних корозійностійких сплавів, матеріали для керамічних оболонкових форм та стрижнів, удосконалюються технології їх одержання [7–11].

Використання керамічних стрижнів для формування внутрішньої охолоджувальної порожнини сприяє високій розмірній точності та чистоті поверхні виливків. На підприємствах газотурбобудування України (ВАГ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес», м. Запоріжжя; ДП НВКГ «Зоря-Машпроект», м. Миколаїв) для одержання охолоджуваних лопаток ГТД зі складнолегованих жароміцних сплавів методом лиття за моделями,

Ю.Г. Квасницька — <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>, Г.П. Мьяльница — <https://orcid.org/0000-0003-2144-4519>,

К.Г. Квасницька — <https://orcid.org/0000-0001-8712-9285>, І.І. Максютя — <https://orcid.org/0000-0001-9517-9709>,

В.О. Нога — <https://orcid.org/0009-0002-0796-3240>

Таблиця 1. Види браку охолоджуваних лопаток ГТД, %*

Тип лопаток	Відхилення від геометричних розмірів	Засмічування	Рихлість	Плівки	Тріщини
Робоча I ступеня	24...50	20...30	2,5...8,0	1,5...8,5	2,0...14,0
Соплова I ступеня	→→	22...33	2,0...2,5	1,2...6,0	0,5...7,5

Примітка. *Кількість відлитих лопаток — 100.

що виплавляються, використовують переважно керамічні стрижні на основі корунду та плавленого кварцу [12]. Незважаючи на значні досягнення у технології виробництва литих охолоджуваних лопаток, брак деталей сягає значних обсягів. Аналіз його видів показує, що до 40 % припадає на різностінність, термічні тріщини та жолоблення стрижнів при їх багаторазовому прожарюванні в процесі виготовлення та отримання виливків. В табл. 1 наведено аналіз видів браку охолоджуваних лопаток ГТД [13]. Видно, що для підвищення виходу придатного литва потрібно отримати внутрішні поверхні лопаток з мінімальним гідродинамічним опором, відсутністю водню в процесі видалення кераміки та виключення шкідливих фторвміщуючих компонентів. Зниження частини браку можливо оптимізацією складу та властивостей стрижневої маси, удосконаленням технологій формування внутрішньої порожнини.

ФТІМС НАН України веде роботи щодо удосконалення технологій одержання стрижнів на основі плавленого кварцу, електрокорунду, циркону та діоксиду цирконію [14]. Дуже важливим моментом на етапі виготовлення стрижня є можливість його видалення з виливка. Видалення стрижня на основі корунду з лопатки з розвиненими внутрішніми каналами можливе тільки хімічним шляхом у фториді калію, що екологічно шкідливо і небезпечно. У зв'язку з цим запропоновано використати автоклавну технологію видалення стрижнів. Вона дозволила відмовитися від екологічно шкідливого та на два порядки більш дорогого (який на цей час використовується) — фториду калію.

Метою цієї роботи було дослідження макро- та мікроструктури охолоджувальних лопаток турбіни першого ступеня газотурбінного двигуна для енергетики (потужність 25 МВт), що виготовлені з жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву CM88Y за вдосконаленою екологічною технологією.

Матеріали та методика випробувань. Для проведення досліджень було використано жароміц-

ний корозійностійкий сплав CM88Y(Ni57Cr16Co11W6Ti4Al4Mo2Hf) на нікелевій основі, з якого одержують лопатки турбіни ГТД. Хімічний склад сплаву показано в табл. 2 [8]. Для визначення вмісту головних компонентів та кількості домішок використовували стандартні методи хімічного аналізу. Контроль мікролегуючих добавок РЗМ проводили за допомогою хіміко-спектрального методу з точністю до 0,001 %. Для визначення вмісту вуглецю використовували аналізатор «Лесо» (США).

Робочі лопатки були виготовлені за допомогою технології з використанням вакуумної індукційної плавки в ливарному агрегаті УППФ-3М. Ця технологія передбачала розливання металу у керамічні форми, що дозволяло отримати лопатки з потрібними характеристиками. Для цього використовувалися керамічні форми, створені на основі електрокорунду, які нагрівалися до 800 °С. Також важливою умовою була певна температура заливання, яка становила 1540...1560 °С, та тиск у печі — 1,2...2,5 Па.

Для зменшення кількості відбракованих охолоджувальних лопаток ГТД і збереження довкілля розроблена вдосконалена технологія, яка полягає в використанні автоклавної методики з 30...40%-ним розчином КОН або NaOH для видалення керамічного стрижня на основі корунду з лопаток з розвиненими внутрішніми каналами. Цей метод дозволяє скоротити на два порядки час видалення керамічного стрижня та не містить небезпечних для довкілля речовин, що робить процес більш екологічним. Стрижні виготовляли з керамічної суміші на основі корунду (Al₂O₃) методом твердофазного спікання.

Отримані заготовки піддавали термічній обробці, яка включала кілька етапів. Спочатку проводили гомогенізацію при температурі 1170 °С протягом 4 год, охолоджували їх за допомогою аргону зі швидкістю 60...80 °С/хв. Потім проводили термічну обробку при температурі 1050 °С протягом 4 год з охолодженням в вакуумі при залишко-

Таблиця 2. Хімічний склад жароміцного сплаву на основі нікелю, мас. %

C	Cr	Co	Mo	Ti	Al	W	Nb	B	Zr	Si	Hf
0,07	15,6	11,0	2,0	4,2	3,8	5,9	0,2	0,07	0,05	0,04	0,3

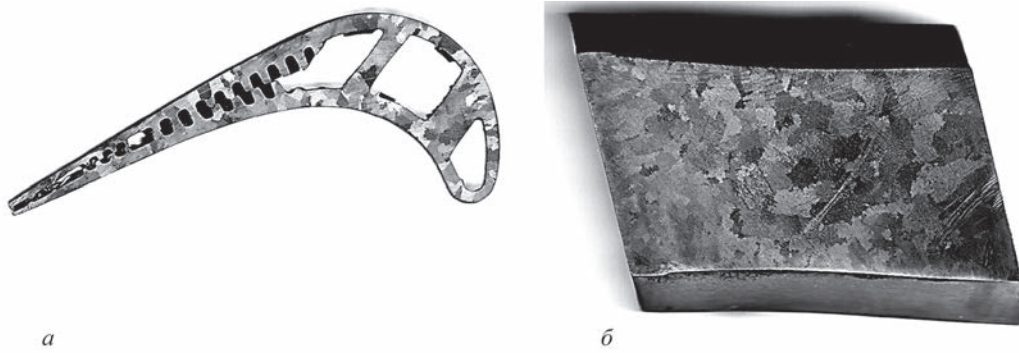


Рис. 1. Макроструктура ($\times 2$) лопатки 3 турбіни першого ступеня: *a* — перо лопатки; *б* — замок

вому тиску від 0,133 до 0,00133 Па. Після цього зразки витримували при температурі 850 °С протягом 16 год і охолоджували їх до кімнатної температури в динамічному вакуумі не менш як 80 хв. Для проведення термообробки використовувалася вакуумна установка фірми «TAV» (Італія), що має вентилятор, який спрямовує інертний газ на кошик з виливками, що термооброблюються, для забезпечення необхідної швидкості охолодження.

В роботі досліджували макроструктуру двох зон лопатки, де була найбільша вірогідність утворення усадкових рихлот, тріщин та інших дефектів. Макроструктуру вивчали на темплетях, виготовлених з поперечних перерізів перової та хвостової частин. Травлення макротемплетів проводили у водному розчині соляної кислоти та хлорного заліза (1 частина FeCl_3 + 1 частина HCl + 1 частина H_2O). Макроструктуру зразків лопаток вивчали за допомогою бінокюляра марки МБС-10.

Для проведення дослідження мікроструктури шліфи були піддані травленню реактивом Васи́льєва наступного складу: 150 г мідного купоросу, 35 cm^3 сірчатої кислоти з питомою вагою не менш 1,8 г/см^3 , 500 cm^3 соляної кислоти з питомою вагою не менш 1,17 г/см^3 , 400 cm^3 води, ортофосфорної кислоти (H_3PO_4) 500 мл + 50 г оксиду хрому (CrO_3), час витримки ≤ 10 с. Дослідження проводили на оптичному мікроскопі Neofot-3М, Німеччина (точність вимірювання 0,5...1,0 $\mu\text{м}$) і рентгенівському спектрометрі з дисперсією за енергією рентгенівських квантів (модель INCA Energy-350 фірми «Oxford Instruments», Великобританія).

Результати досліджень. В роботі досліджено 5 лопаток першого ступеня турбіни енергетичного ГТД потужністю 25 МВт. Середній хімічний склад показано в табл. 2.

Макроструктура робочих лопаток щільна, відсутні дефекти такі як несучільність (рис. 1). У пері всіх дослідних лопаток макроструктура складається з рівноосних зерен діаметром не більше 7 мм, у хвостовій частині — не більше 10 мм (табл. 3), що відповідає вимогам [15].

Фото типових мікроструктур перової та хвостової частин натурних робочих лопаток I ступеня зі сплаву СМ88У після термічної обробки представлено на рис. 2. Видно, що сплави мають дендритно-коміркову структуру, яка складається з γ -твердого розчину, зміцнюючої γ' -фази та карбідів. В структурі СМ88У присутні карбіди на основі Cr, Ti, Nb і Hf, які збагачують границі комірок. Розміри зміцнюючих карбідів у перовій частині становлять 10...30 $\mu\text{м}$, хвостовій — 20...50 $\mu\text{м}$. У міжвісних просторах дендритів розташовуються виділення евтектик ($\gamma+\gamma'$)-фази, їх розміри становлять: у пері — 40...60 $\mu\text{м}$, хвості — 60...120 $\mu\text{м}$. Спостерігається рівномірне виділення зміцнюючої γ' -фази і розчинення значної частки ($\gamma-\gamma'$)-евтектики. Мікроструктура металу усіх дослідних лопаток ідентична і задовольняє вимогам до матеріалів. Завдяки обраному режиму термічної обробки у лопатках усунуто неоднорідність. Ливарних дефектів у досліджених перерізах не виявлено.

Головною метою процесу гомогенізації, необхідної для забезпечення експлуатаційних характеристик сплавів даного типу, є розчинення нерівноважних сегрегацій ($\gamma+\gamma'$)-евтектики і подальше виділення вторинної, більш дисперсної та рівномірно розподіленої γ' -фази переважно кубічної морфології в аустенітній матриці. За літературними даними [3] і власними дослідженнями авторів [6] така морфологія є найбільш сприятливою для гальмування процесів повзучості. Проведені дослідження показали, що виділення γ' -фази складу Ni_3 (Al, Ti) мають кубічну форму і групуються в

Таблиця 3. Макроструктура лопатки турбіни ГТД

Номер лопатки	Розмір зерна, мм	
	перо	замок
1	3...5	6...10
2	3...6	5...9
3	—»—	5...10
4	2...6	6...8
5	2...5	5...9

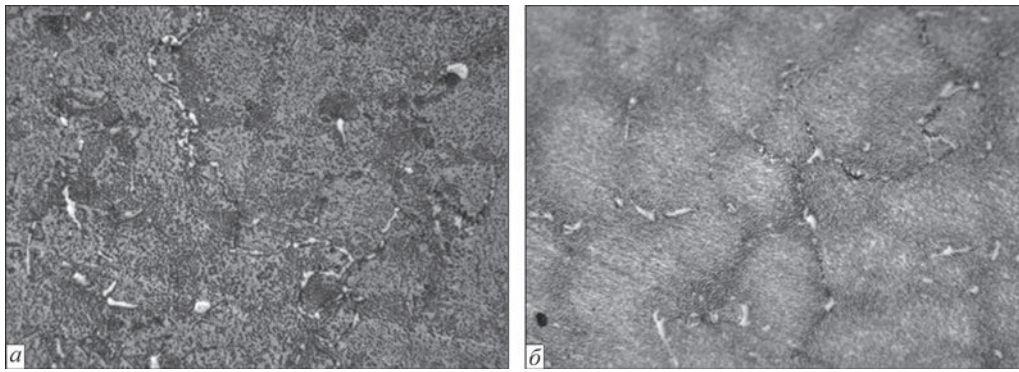


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 400$) зразків сплавів CM88Y після термічної обробки (лопатка 3): а — перо лопатки; б — замок

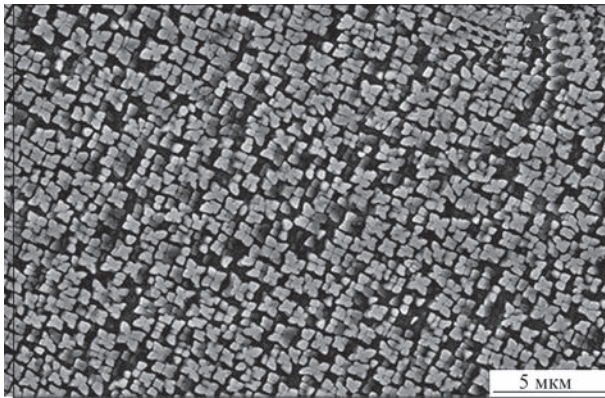


Рис. 3. Мікроструктура ($\times 10000$) перової частини лопатки

кластери з чотирьох частинок (рис. 3). Середні розміри частинок становлять, мкм: у перовій частині — 0,40; хвостовій — 0,45.

Висновки

1. За результатами досліджень макро- та мікроструктури отриманих за автоклавною технологією робочих лопаток встановлено, що ливарні дефекти у вигляді плен, недоливів як на зовнішніх, так і внутрішніх поверхнях лопатки відсутні. Розмір і конфігурація макрозерен та мікроструктура зразків лопаток відповідає діючому стандарту [15].

2. Запропонована в роботі автоклавна технологія видалення залишків кераміки із виливків дозволяє відмовитись від екологічно шкідливого та на два порядки більш дорогого хімічного травлення у фториді калію.

3. Для остаточного визначення інтервалів робочих параметрів процесу в подальших дослідженнях необхідно встановити фізико-механічні властивості та тривалу міцність матеріалу дослідних лопаток, одержаних за автоклавною технологією.

Список літератури/References

1. Khalatov, A.A., Yushchenko, K.A., Isakov, B.V. et al. (2013) Gas turbine construction in Ukraine: State-of-the-art and prospects of development. *Visnyk NANU*, **12**, 40–49 [in Ukrainian].
2. Coakley, J., Whittaker, M.T., Kolisnychenko, S. (2020) *Ni-based superalloys*. Switzerland, Trans. Tech. Publ. Ltd.
3. Sims, C.T., Stoloff, N.S., Hagel, W.C. (1987) *Superalloys II: High-temperature materials for aerospace and industrial power*. New York, John Wiley & Sons.
4. Rame, J., Caron, P., Locq, D. et al. (2020) Development of AGAT, a third-generation nickel-based superalloy for single crystal turbine blade applications. *Superalloys*, 31–40. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51834-9_106
5. Swain, B., Mallick, P., Patel, S. et al. (2020) Failure analysis and materials development of gas turbine blades. *Materials Today: Proceedings*, **33(8)**, 5143–5146.
6. Balitskii, O.I., Kvasnytska, Y.H., Ivaskevych, L.M. et al. (2022) Fatigue fracture of the blades of gas turbine engine made of a new refractory nickel alloy. *Materials Sci.*, **57(5)**, 475–483. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00568-z>
7. Glotka, A.A., Ol'shanetskii, V.E. (2022) Forecasting the properties of heat-resistant nickel alloys equiaxial crystallization. *Archives of Metallurgy and Materials*, **67(1)**, 51–56. DOI: <https://doi.org/10.24425/amm.2022.137471>.
8. Balyts'kyi, O.I., Kvasnytska, Yu.H., Ivaskevych, L.M., Mialnitsa, H.P. (2018) Corrosion and hydrogen resistance of heatproof blade nickel-cobalt alloys. *Materials Sci.*, **54(2)**, 289–294. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0178-z>.
9. Balitskii, A.I., Kvasnytska, Y.H., Ivaskevich, L.M., Mialnitsa, H.P. (2018) Hydrogen and corrosion resistance of Ni–Co superalloys for gasturbine engines blades. *Archives of Materials Sci. and Eng.*, **91(1)**, 5–14. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.1380>
10. Wiehczynski, A., Lisiewicz, M., Kwasnicka, J., Kostrica, W. (2015) *Method of the directional solidification of the castings of gas turbine blades and a device for producing the castings of gas turbine blades of the directional solidified and monocrystalline structure*. Pat. Appl. Espacenet EP2921244A1.
11. Balitskii, A.I., Kvasnytska, Y.H., Ivaskevych, L.M. et al. (2023) Hydrogen and corrosion resistance of nickel superalloys for gas turbines, engines cooled blades. *Energies*, **16**, 1170–1154. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16031154>
12. Repyakh, S.I. (2006) *Technological principles of investment casting*. Lira LTD [in Russian].
13. Bratukhin, A.G., Yazov, G.K., Karasev, B.E. (1997) *Modern technologies in production of gas turbine engines*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
14. Simanovsky, V.M. (2006) Technology and materials of molds and cores for producing of GTE cast blades. *Metall i Litio Ukrainy*, **6**, 47–48 [in Russian].
15. (2016) Specification Z88YF1-S2 for supplying remelting stocks of alloy CM-88Y: *Technical Specifications of «Zorya»-«Mashproek» GTRPC*.

INVESTIGATIONS OF THE STRUCTURAL FEATURES OF A HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY FOR GAS TURBINE ENGINE BLADES

Yu.G. Kvasnitska¹, G.P. Myalnitsa², K.G. Kvasnytska¹, I.I. Maksyuta¹, V.O. Noga¹

¹PTIMA of the NAS of Ukraine, Ukraine.

34/1 Acad. Vernadskyi Ave., 03142, Kyiv. E-mail: jul.kvasnitskaja@gmail.com

²SC SPCG «Zorya»-«Mashproekt».

42-A Bohoyavlenskyi Ave., 54018, Mykolayiv. E-mail: mialniza@gmail.com

In order to improve the environmental safety of the process of producing castings of cooled turbine blades of a 25 MW power gas turbine engine, investigations were conducted to determine the influence of the new technology on structure formation and to ensure the required chemical and phase composition of the products. Blade castings were produced from high-temperature corrosion-resistant CM88Y alloy in vacuum-induction furnace UPPF3-M by investment casting. For environmental safety it was proposed to use an autoclave to remove the ceramic rod from the ingot inner cavity. The ceramic rods were produced by solid-phase sintering using Al_2O_3 -based mixture. Such a technology of producing blade castings with inner channels allowed reducing by two orders of magnitude the time of such an important operation as rod removal. The macro- and microstructure of transverse metal samples cut out from the airfoil and tail parts of five blades was studied. Their analysis after heat treatment showed that the size of carbides in the airfoil part is 10...30 μm , in the tail part it is 20...50 μm . Homogeneous precipitation of the strengthening γ' -phase and dissolution of a considerable portion of $(\gamma-\gamma')$ -eutectic was observed. Precipitates of γ' -phase are of a cubic form and are grouped in clusters. It is found that the macro- and microstructure of blades produced by the improved technology meets the requirements of the current standards. 15 Ref., 3 Tables, 3 Figures.

Keywords: high-temperature corrosion-resistant alloy; turbine blade; gas-turbine engine, macro- and microstructure, CM88Y alloy

Надійшла до редакції 20.02.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2023



Журнал «**Автоматичне зварювання**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень за напрямками: матеріалознавство та металургія зварювання, наплавлення та інших споріднених технологій; технології та матеріали для зварювання конструкційних матеріалів; виробництво зварних металоконструкцій для різних галузей промисловості; відновлювальний ремонт для подовження ресурсу зварних конструкцій і вузлів; проблеми міцності, конструювання та оптимізації зварних конструкцій; технології 3D друку, які базуються на зварювальних процесах; гібридні технології зварювання. В журналі публікується також інформація про нові зварювальні матеріали, джерела живлення та технології; звіти про виставки, конференції та семінари, анонси нових книг та винаходів, новини від відомих компаній та інше.



Журнал «**Сучасна електрометалургія**» є міжнародним науково-теоретичним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень у сферах: металургія чорних і кольорових металів та сплавів; спеціальна електрометалургія (електрошлакова, електронно-променева, плазмова- та вакуумно-дугова технології); нові матеріали; енерго- і ресурсозбереження; матеріалознавство, 3D технології у спеціальній електрометалургії. Публікується також допоміжна інформація з тематики журналу.



Журнал «**Технічна діагностика та неруйнівний контроль**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень з діагностики матеріалів і конструкцій та методи неруйнівного контролю для оцінки стану матеріалів і конструкцій; теорія, методи і засоби технічної діагностики. Розміщуються матеріали з моніторингу конструкцій та подовження ресурсу та працездатності засобами НК. Публікується супутня інформація з тематики журналу, а також інформація про події та новини в Українському товаристві НК та ТД.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм.

Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм. А5 – 185x130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥК, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

Ціна договірна. Передбачена система знижок. Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі. Публікується тільки профільна реклама з тематики журналів. Відносно вартості, знижок та термінів публікації прохання звертатися у видавництво.

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: 38044 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

https://patonpublishinghouse.com