

РОЗРОБКА МЕТАЛОПОРОШКОВОГО ДРОТУ НА ОСНОВІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ T120

С.Л. Шваб, Р.В. Селін, С.Б. Руханський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: serg.schwab@gmail.com

Застосування високоміцних титанових сплавів в сучасному авіабудуванні з кожним роком ставить нові виклики як перед розробниками таких сплавів, так і перед спеціалістами в галузі з'єднання матеріалів. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) дуже перспективна технологія, що дозволяє виготовляти великогабаритні деталі складної форми з матеріалів з високою доданою вартістю. Ця технологія є частиною процесів адитивного виробництва, яка використовує металеві дроти в якості присадного матеріалу, а дугу як джерело енергії. У даній роботі показано застосування розробленого дослідного металопорошкового дроту на основі перспективного вітчизняного високоміцного титанового сплаву T120 при багатощаровому наплавленні аргонодуговим способом. Досліджена мікроструктура з'єднання, його мікротвердість та механічні властивості. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: високоміцні титанові сплави, WAAM, TIG, металопорошковий дріт

Вступ. Серед багатьох металевих матеріалів сплави на основі титану все частіше застосовуються при адитивному виробництві деталей завдяки їх використанню в аерокосмічній промисловості для виробництва планерних конструкцій. Високоміцні двофазні титанові сплави користуються великим попитом в авіакосмічній галузі завдяки високій питомій міцності, корозійній стійкості, стійкості до пошкоджень та сумісності з композитними матеріалами з графітового волокна [1]. З різних доступних підходів процес WAAM має ряд переваг перед іншими технологіями, включаючи: високий коефіцієнт використання матеріалу (99 % [2]) та енергоефективність (~70 % [3]), нижчі капітальні витрати на обладнання, високі показники переносу металу в кілограмі на годину [4].

Розвиток сучасних технологій і розробка нових конструкцій з них потребує впровадження нових конструкційних матеріалів. Одним із таких є титан та сплави на його основі. Особлива увага в цьому напрямку приділяється складнолегованим високоміцним титановим сплавам, які все більше знаходять своє застосування при проектуванні конструкцій, які працюють в умовах високих навантажень [5]. Одним з таких прикладів є високоміцний титановий сплав T120 системи Ti–Al–Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr, розроблений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [6]. Даний сплав має високі механічні характеристики: в стані після прокату та наступної термічної обробки показники межі міцності знаходяться на рівні 1186 МПа, відносно подовження становить 13,3 %, а ударна в'язкість становить 13,5 Дж/см².

Метою даної роботи була розробка металопорошкового дроту на основі титанового сплаву T120, для наступного використання в якості присадного дроту при адитивному виробництві (метод WAAM), а саме пошарового наплавлення способом TIG (Tungsten Inert Gas), та дослідження якості утвореного з'єднання.

Виробництво дротів суцільного перерізу на основі високоміцних титанових сплавів вельми складний та затратний процес, а подекуди і неможливий через високі механічні показники відповідних сплавів титану. Задля вирішення цієї проблеми свого часу було розроблено декілька типів порошкових дротів на основі титану, які знайшли своє застосування як при зварюванні титанових сплавів завтовшки 6...15 мм за один прохід [7], так і при відновлювальному наплавленні [8]. Конструкція цих дротів представляє собою оболонку з чистого титану марки VT1-00 та осердя, склад якого формується в залежності від типу та подальшого призначення дроту. Одним із таких прикладів є дріт марки ППТ-22, який був розроблений як для багатопрохідного зварювання високоміцного титанового сплаву VT22, так і для відновлювального наплавлення деталей із цього сплаву [9].

В якості осердя дроту ППТ-22 використовуються гранули з титанового сплаву VT22, попередньо отримані способом плазмового розпилення заготовки. Варто зазначити, що матеріал у цьому випадку можна отримати високої якості, а вміст атмосферних газів у металі не перевищує допустимих значень. Недоліком такого матеріалу при використанні в якості осердя є сферична форма гранул – під час зварювання вони не щільно утри-

Шваб С.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-4627-9786>, serg.schwab@gmail.com,

Селін Р.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2990-1131>, selinrv@gmail.com

Руханський С.Б. – <https://orcid.org/0009-0002-1260-3688>, rukhansky@gmail.com

© С.Л. Шваб, Р.В. Селін, С.Б. Руханський, 2023

муються в сформованій трубі і під тиском зварювальної дуги розлітаються. Для уникнення таких проблем необхідно проводити попередні роботи зі зміни форми частинок, що є досить тривалим процесом.

Матеріали, обладнання та методики. З вище зазначених причин представляє інтерес використання металеві складові осердя металопорошкових дротів, отриманої іншим способом. Одним із таких прикладів є спосіб HDH (hydrogenation/dehydrogenation) – гідрування та наступне дегідрування металу [10]. Цим способом було отримано порошок зі сплаву Т120 двох фракцій (таблиця). У меншій фракції з розміром частинок порошку в 50 мкм вміст кисню перевищує допустимі значення більш ніж втричі, при цьому кількість водню та азоту знаходиться в допустимих межах (для високоміцних сплавів згідно ГОСТ 19807-91 вміст кисню не може перевищувати 0,2 мас. %, водню – 0,015, азоту – 0,05). У фракції з розміром частинок 200...315 мкм вміст кисню перевищує допустимі значення всього на 0,02 мас. %, тому подальша робота проводилась з порошком даної фракції.

Розробка та виробництво металопорошкового дроту на основі титанового сплаву Т120 відбувалося методом волочіння та наступних перетяжок на установці, яка призначена для виробництва титанових порошкових дротів (рис. 1). В якості обо-

Таблиця. Результати газового аналізу порошку титанового сплаву Т120, отриманого способом HDH (мас. %)

Розмір частинок, мкм	[O]	[N]	[H]
50...75	0,66	0,04	0,0143
200...315	0,22	0,03	0,0104

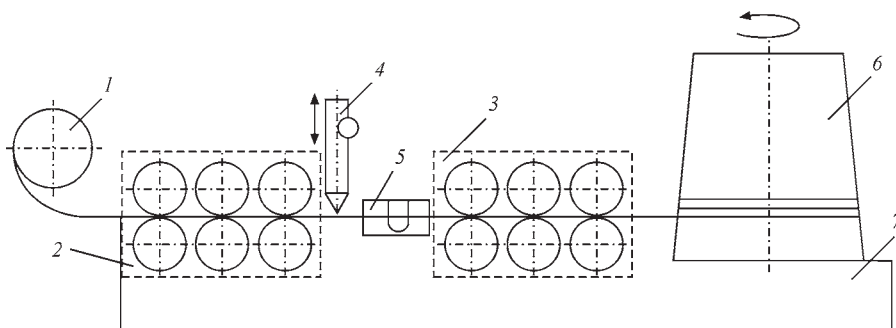


Рис. 1. Схема волочильного верстата для виробництва порошкового титанового дроту: 1 – касета; 2, 3 – роликів кліт; 4 – дозатор; 5 – U-подібна планка; 6 – барабан; 7 – станина



Рис. 2. Загальний вигляд наплавленого з'єднання (а) та його макрошліф (б)

лонки застосовувалась титанова фольга марки ВТ1-00, завтовшки 0,2 мм. Встановлено, що оптимальною лінійною швидкістю при перетягуванні після формування є швидкість 0,4 м/хв, при якій забезпечується оптимальне висипання шихти у сформований жолоб, а також виключається викривлення вихідної трубки. Перетяжка здійснюється за допомогою набору філь'єр з кроком 0,1 мм. Дріт подається у філь'єру таким чином, щоб на барабані він розміщувався швом назовні, оскільки розтягнення зовнішніх волокон призводить до додаткового закриття шва, а також виключає викривлення (гофр). У результаті експериментів було отримано якісний дріт діаметром 2,2 мм з коефіцієнтом заповнення 50 %.

Отриманий дріт був використаний в якості присадки при багатозаровому наплавленні на пластину зі титанового сплаву Т120. Процес наплавлення відбувався аргонодуговим способом неплавким електродом на наступному режимі: $I_{зв} = 160..180$ А, $U_d = 12$ В, $V_{зв} = 6$ м/год, $V_{под} = 40..45$ м/год, $L_d = 2$ мм.

Дослідження якості отриманих з'єднань. У результаті проведених робіт було отримано п'ятишарове наплавлене з'єднання (рис. 2).

Була досліджена мікроструктура наплавленого з'єднання. Вихідна структура основного металу (рис. 3, а) складається переважно з рівновісних зерен β -фази різних розмірів, що вказує на деформований стан основи. Деформація відбувалась в β -області, після чого метал охолоджувався на повітрі. Ближче до початку зони термічного впливу (ЗТВ) спостерігається специфічна структура зі слабо вираженими поодинокими зонами існування пластин α -фази, що може відповідати зоні часткової струк-

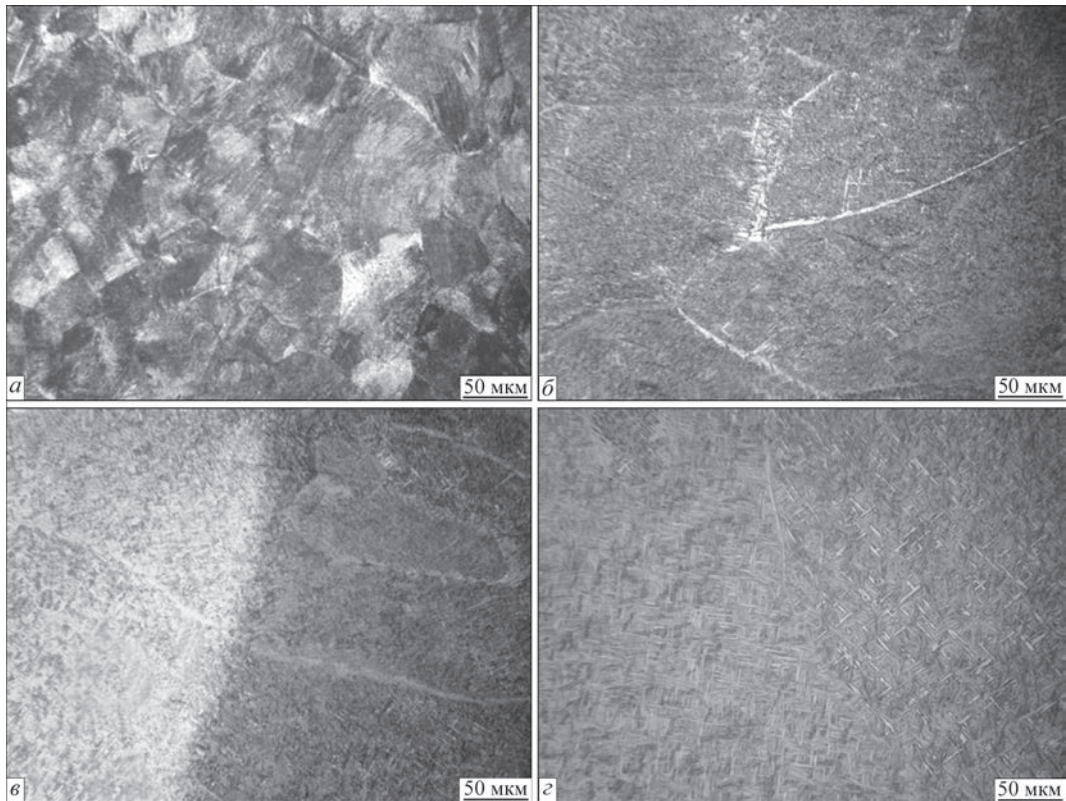


Рис. 3. Мікроструктура наплавленого з'єднання: *a* – основний метал; *b* – зона термічного впливу; *v* – зона сплавлення; *z* – наплавлений метал

турної трансформації, яка знаходиться перед зоною рекристалізації. На це вказує одночасна присутність структури, схожої на метал-основу і більш дрібнозерниста β -фаза. У ЗТВ (рис. 3, *b*) біля основного металу і більшою мірою в центральній частині можна виділити зону рекристалізації, що виражається в подрібненні вихідної деформованої структури та проходженню фазової перекристалізації, в результаті чого відбувається доволі рівномірне виділення дисперсної α -фази всередині. В області сплавлення (рис. 3, *v*) спостерігається зона плавного градієнтного переходу. Збільшення кількості α -фази відбувається поступово від металу основи до наплавленого металу, який має менший вміст легуючих, в основному β -стабілізуючих, елементів. Найявна незначна пористість газоусадкового походження та формування α -фази на межах первинних зерен. Ці дві ознаки є факторами зниження міцності, але структурну складову можна виправити термічною обробкою. Структура крайової зони сплавлення формується схожим чином, проте за рахунок більш тривалого охолодження спостерігається виділення α -фази на межах первинних β -зерен, що може призвести до зниження ударної в'язкості. Область з'єднання основного металу та наплавленого металу в зоні формування кута змочування має більш грубу будову межі сполучення та ярко виражені ознаки насичення поверхневих об'ємів газами.

Оскільки присадний металопорошковий дріт має оболонку з чистого титану і є менш легова-

ним у порівнянні з металом-осною, в наплавленому металі (рис. 3, *z*) можна спостерігати більшу кількість α -фази та її більш крупні розміри. Зона наплавленого металу характеризується крупнозернистою структурою, подібною до структури направленої кристалізації. В наплавленому металі часто зустрічаються пори усадкового походження, на що вказує відсутність навколо них більш вираженого газонасиченого ореолу α -фази. При цьому, структура основного металу та наплавленого металу залишаються досить схожими, що вказує на їх повноцінне перемішування та дифузії елементів. Такий характер структури є позитивним з точки зору гомогенності з'єднання. В середній області наплавленого шару спостерігається схожа та доволі рівномірна структура, в якій за рахунок доволі повільного охолодження відбувається зростання пластин α -фази в кілька разів, порівняно з ділянками, які знаходяться ближче до лінії сплавлення. У верхніх шарах наплавленого з'єднання на межах первинних β -зерен формуються області дисперсних щільних α -пластин і мікропор, що може вказувати на незначно збільшений уміст газів у даних областях. Схожу структуру мають бокові зони наплавленого металу, але в них спостерігається більше забруднення газами, що виражається в більшій кількості пор та більшій неоднорідності будови α -зерен та їх колоній.

Дослідження мікротвердості (рис. 4) показало підвищення показників основного металу в на-

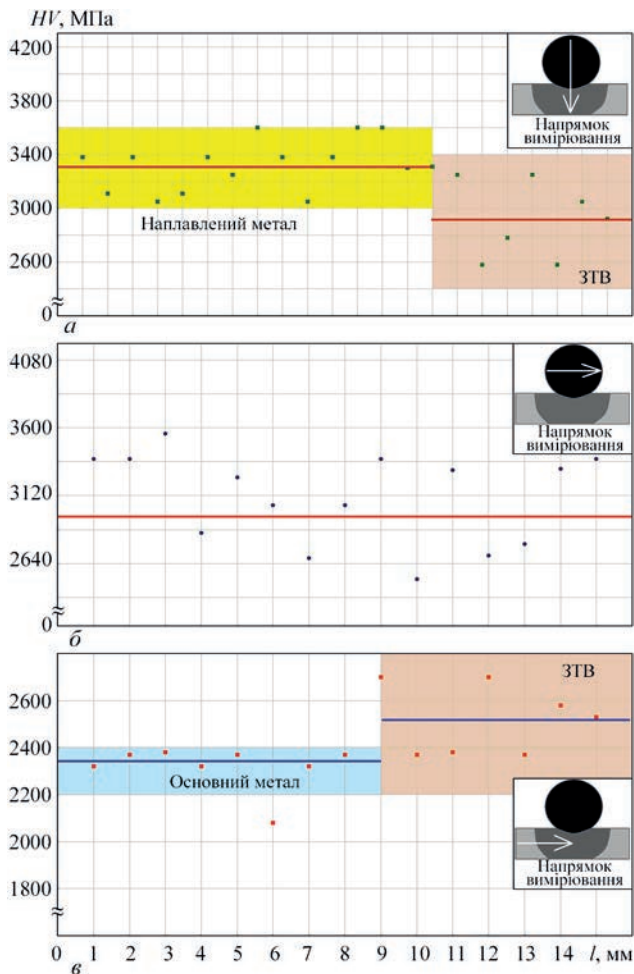


Рис. 4. Мікротвердість наплавленого з'єднання: *a* – в повздовжньому напрямку (наплавлений метал та ЗТВ); *b* – в поперечному напрямку наплавленого шару; *v* – в повздовжньому напрямку (основний метал та ЗТВ)

прямку від краю до зони термічного впливу, що пояснюється збільшенням кількості α -фази та її стабілізації. Як відомо, ГЦУ (гексагональна щільноупакована) кристалічна ґратка має вищу твердість, ніж ОЦК (об'ємноцентрована кубічна), до того ж, в найбільш наближеній до наплавленого металу зоні ймовірно могло відбуватися незначне насичення металу газовими домішками. Підвищення мікротвердості від ЗТВ металу-основи до наплавленого металу не відбувається і спостерігається тільки в зоні розплавлення, що можна пояснити також збільшенням вмісту газів у металі. Подальше підвищення мікротвердості в наплавленому металі відбувається поступово, що пов'язано більшою мірою з особливостями формування структурно-фазового стану, відмінного від основного металу. Високі показники мікротвердості в найвищому об'ємі наплавки (8 мм зверху) може пояснюватись підвищеним вмістом кисню в металі шихти, а також швидким охолодженням наплавленого металу, що призводить до формування більш твердих фаз мартенситного типу α' .

Межа міцності наплавленого металу становить 878,7 МПа, ударна в'язкість – 15,1 Дж/см², що значно нижче значень механічних характеристик основного металу: $\sigma_b = 1145,8$ МПа, $KCV = 30,6$ Дж/см². Це пояснюється наявністю пористості в наплавленому металі. Задля попередження зародження пор в наплавленому металі необхідно вводити флюсову складову в метал осердя. Також високоміцні двофазні титанові сплави та отримані з ними з'єднання піддаються обов'язковій термічній обробці, що в свою чергу дозволяє підвищити рівень механічних характеристик.

Висновки

1. Було розроблено дослідний присадний металопорошковий дріт на основі титанового сплаву Т120. В якості осердя дроту використовувався порошок сплаву Т120, отриманий способом HDH.

2. Отриманий дріт було використано в якості присадки при багатозаровому аргонодуговому наплавленні. Наплавлений метал має досить однорідну мікроструктуру, при цьому часто зустрічаються мікропори, що є наслідком підвищеного вмісту газів в порошок. Як результат – невисокі показники механічних характеристик наплавленого металу в порівнянні з основним металом.

3. Для запобігання утворенню таких дефектів необхідно вводити флюсову складову в осердя металопорошкового дроту. Для підвищення механічних характеристик наплавленого з'єднання зі сплавом Т120, як і для подібних йому високоміцних сплавів ВТ22, ВТ23 та Т110, необхідно проводити термічну обробку.

Список літератури/References

1. Martina, F., Colegrove, P. A., Williams, S. W. et al. (2015) Microstructure of interpass rolled wire arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(12), 6103–6118.
2. Ríos, S., Colegrove, P. A., Martina, F. et al. (2018) Analytical process model for wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, 651–657.
3. Bekker, A.C., Verlinden, J.C. (2018) Life cycle assessment of wire arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. *Journal of Cleaner Production*, 177, 438–447.
4. Lütjering, G., Williams, J.C. (2007) *Titanium. Fundamental aspects. 2nd Edition*, Springer, Berlin Heidelberg.
5. Williams, J.C., Boyer, R.R. (2020) Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components. *Metals*, 10(6), 705.
6. Ахонин С.В., Селин Р.В., Березос В.А. и др. (2016) Разработка нового высокопрочного титанового сплава. *Современная электрометаллургия*, 4, 22–27.
Akhonin, S.V., Selin, R.V., Berezos, V.A. et al. (2016) Development of new high-strength titanium alloy. *Sovrem. Elektrometall.*, 4, 22–27.
7. Prilutsky V.P., Akhonin S.V. (2014) TIG welding of titanium alloys using fluxes. *Welding in the World*, 58(2), 245–251.

8. Schwab, S., Selin, R., Voron, M. (2023) *Welding materials for TIG welding, surfacing, and WAAM technology of titanium alloys*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-023-01464-z>
9. Yanko, T., Brener, V., Ovchinnikov, O. (2020) Production of spherical titanium alloy powders used in additive manufacturing from titanium scrap. In *MATEC Web of Conferences. EDP Science. Nantes, France, 10–14 June 2020*, 321, 07008.
10. Prilutsky, V.P., Akhonorin, S.V., Schwab, S.L. et al. (2018) Effect of heat treatment on the structure and properties of titanium alloy VT22 welded joints produced by TIG-welding with flux-cored wire. In *Materials Science Forum*, 927, 119–125.

DEVELOPMENT OF METAL-CORED WIRE BASED ON T120 TITANIUM ALLOY

S.L. Schwab, R.V. Selin, S.B. Rukhanskyi

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv. Ukraine
E-mail: serg.schwab@gmail.com

Application of high-strength titanium alloys in modern aircraft construction poses new challenges every year both to the developers of such alloys and to specialists in the field of joining materials. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a highly promising technology, which allows manufacturing complex-shaped large-sized parts from high added value materials. This technology is part of additive manufacturing processes, which uses metal wires as filler materials and the arc - as the energy source. The paper shows the application of the developed experimental metal-cored wire based on a promising local high-strength titanium alloy T120 in multilayer argon-arc surfacing. The joint microstructure, its microhardness and mechanical properties were studied. 10 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: high-strength titanium alloys, WAAM, TIG, metal-cored wire

Надійшла до редакції 28.02.2023



Гранти НАН України для підтримки наукової молоді



З метою підтримки молодих науковців установ НАН України, які мають вагомі наукові результати та підвищення ролі і виявлення майбутніх перспективних наукових керівних кадрів, а також для підтримки наукових досліджень, що спрямовані на створення нових технологій, матеріалів, іншої наукоємної продукції кожного року Національна академія наук України проводить конкурс на здобуття грантів НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки (далі – гранти НАН України). Гранти НАН України фінансуються за рахунок коштів, передбачених у бюджеті НАН України за бюджетною програмою «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» за КПКВК 6541230. Відповідно до Положення про гранти НАН України вони надаються з метою заохочення до активної діяльності в наукових установах НАН України молодих вчених, які мають вагомі наукові результати, підтвержені публікаціями в провідних вітчизняних і закордонних фахових виданнях та досвід участі в міжнародних проєктах або тривалого стажування у провідних наукових центрах за кордоном. Також надання грантів НАН України має на меті запобігти від'їзду талановитої молоді за кордон та створення умов для повернення в Україну молодих науковців, що працюють за кордоном; виявлення перспективних майбутніх наукових керівних кадрів; підтримки і розвитку співпраці молодих вчених НАН України з зарубіжними партнерами шляхом надання можливості стажування за кордоном та участі в міжнародних конференціях. Гранти НАН України спрямовані на проведення молодими вченими фундаментальних наукових досліджень, а також досліджень, які спрямовано на створення нових технологій, матеріалів, іншої наукоємної продукції.

Грант може отримати колектив молодих вчених, всі учасники якого, на момент оголошення конкурсу, відповідають визначенню терміну «молодий вчений» відповідно до Закону України «Про наукову і науково-технічну діяльність». Гранти надаються на конкурсній основі, щорічно розмір гранту не може перевищувати 1 млн. грн. Керівник проєкту за грантом повинен мати досвід участі в міжнародних проєктах не менше двох років та/або аналогічний період стажування в провідних наукових центрах за кордоном, та/або вагомі наукові результати, підтвержені публікаціями в провідних міжнародних виданнях. Колектив молодих вчених не може перевищувати п'яти осіб. Кошти гранту можуть включати витрати на проведення наукових відряджень, придбання витратних матеріалів, реактивів. Варто зазначити, що накладні витрати по даним проєктам не можуть перевищувати 10 % від розміру наданого гранту. Строк проведення наукових досліджень за грантом – до двох років.

Від початку створення грантів НАН України проведено 4 конкурси, що загалом дало можливість профінансувати 139 наукових проєктів. З початком повномасштабної війни та скорочення бюджетного фінансування гранти НАН України у 2022 р. були профінансовані в повному обсязі, що склало 50 млн грн. Черговий конкурс на здобуття грантів НАН України має відбутися у вересні 2023 р.

Крім цих грантів НАН України існують й інші форми підтримки молодих вчених НАН України. Зокрема це конкурс проєктів науково-дослідних робіт молодих учених НАН України; заслуховування наукових повідомлень молодих вчених на засіданнях Президії НАН України, вчені-доповідачі яких мають змогу відкрити додаткові річні відомчі теми. Заслужують на увагу стипендіальні програми НАН України та нова програма постдокторальних досліджень. Детальніше про гранти НАН України та інші форми підтримки молодих вчених, оголошення конкурсів та умови їх проведення можна дізнатись на сайтах Наукової молоді НАН України (www.nas.gov.ua/young) та Ради молодих вчених України (<https://ysc-nasu.org.ua/>).

Повідомлення підготували: асоційований член Ради молодих вчених НАН України Сергій Шваб та секретар Комісії по роботі з науковою молоддю НАН України Олександр Дуброва.