

- through spark plasma sintering. *Mater. Chem. Phys.*, 285, 126126.
10. Sheppard, L.R., Zhang, H., Liu, R., et al. (2019). Reactive sputtered TiXNYNZ thin films. I. Basic processing relationships. *Mater. Chem. Phys.*, 224, 308–313.
 11. Cicek, H., Baran, O., Keles, A., et al. (2017). A comparative study of fatigue properties of TiVN and TiNbN thin films deposited on different substrates. *Surf. and Coat. Technol.*, 332(25), 296–303.
 12. Chang, Yin-Yu, & Cheng-His, Chung. (2022). Tribological and Mechanical Properties of Multicomponent CrVTiNbZr(N) Coatings. *Coatings*, 11(1). 41.
 13. Gonzalez-Carmona, J.M., Mambuscay, C.L., Ortega-Portilla, C., et al. (2023) *Effect of Substrate Temperature on Adhesion and Tribological Properties of Tinbn Coatings Deposited by Cathodic Arc*. Available at SSRN. (b.d.) https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4342237.
 14. Dempwolf, H., Proft, M., Baumann, A., et al. (2022). The Impact of Bias and Nitrogen Pressure on TiNbN Coatings in Arc-PVD Processes—A Multifactorial Study. *Coatings*, 12(7). 935.
 15. Azarenkov N.A., Sobol', O.V., Pogrebhjak, A.D., & Beresnev, B.M. (2011). *Inzheneriia vakuum-plazmennyykh pokrytii [Vacuum Plasma Coating Engineering]*. KhNU imeni V.N. Karazina [in Russian].
 16. Kunchenko, V.V., Andreev, A.A., Kunchenko, Yu.V., & Kartmazov G.N. (2004). *CrNx pokrytiia, poluchennye vakuumno-dugovym metodom [CrNx coatings obtained by vacuum-arc method]*. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. – Physics of Radiation Damage and Radiation Material Science*, 3. 87–95.

УДК 623.4:621.785.6

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-319-326

А.Ю. Сірий, магістр

Національна Металургійна Академія України, просп. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СТВОЛІВ ГАУБИЦЬ ДЛЯ ВИТРИМАННЯ ІНТЕНСИВНОГО ВОГНЮ

Метою цього дослідження є вивчення впливу різних методів термічної обробки на характеристики стволів артилерійських гаубиць, зокрема на їх твердість, міцність, в'язкість і зносостійкість. Дослідження спрямоване на визначення оптимальних технологій обробки для підвищення витривалості та ефективності стволів під час інтенсивного вогню. В роботі використаний аналітичний підхід на основі опрацювання інформаційних джерел з теми дослідження. Результати дослідження показують, що різні методи термічної обробки мають суттєвий вплив на характеристики стволів гаубиць. Зокрема, гартування та відпускання значно підвищують твердість і міцність металу, а відпускання додатково збільшує в'язкість, роблячи стволи більш стійкими до тріщин і ударів. Азотування та цементация підвищують зносостійкість, що подовжує термін служби стволів. Так визначено, що процес теплової обробки має кілька етапів.

Ключові слова: гаубиця; ствол артилерійської системи; термічна обробка; механічний знос; експлуатаційна стійкість.

Вступ

Сучасна війна між Україною та Росією характеризується інтенсивним застосуванням артилерії. Адже саме артилерія залишається єдиним всепогодним і цілодобовим засобом, здатним виконувати основну частину вогневих завдань. Така ситуація ставить підвищені вимоги до надійності та зносостійкості артилерійських стволів гаубиць. Термічна обробка є ефективним методом підвищення експлуатаційних характеристик сталевих артилерійських стволів, здатних витримувати високі температури та тиск під час інтенсивного вогню.

Дослідження впливу різних режимів термічної обробки на фізико-механічні властивості сталей, що використовуються для виготовлення артилерійських стволів, є актуальним науковим завданням в умовах сучасного збройного конфлікту. Особливої уваги потребують питання підвищення міцності, зносостійкості та теплостійкості матеріалу ствола, що дозволить збільшити ресурс його експлуатації та бойову ефективність артилерійських систем.

Досвід ведення війни між Росією та Україною в 2022–2024 роках показав, що одним із найефективніших аргументів у сучасних наземних бойових протистояннях є потужні артилерійські системи. За радянських часів, попри серійне виробництво бронетехніки – танків і самохідних артилерійських установок – в Україні стволи до їхніх гармат не виготовлялися, а імпортувалися з Російської Федерації. У другій половині 1990-х років, коли росіяни, що були конкурентами українського танка Т – 84 на тендері для Пакистану, відмовилися постачати танкові гармати, намагаючись зірвати виконання українськими підприємствами іноземного замовлення, Україна швидко освоїла виробництво стволів [1, с. 53].

Дослідження процесів зношування стволів стрілецької зброї виконували такі вчені, як Чернов Д. К., Благонравов А. А., Слухоцький В. Є., Дроздов Н. Ф., Цибуляк Б. З. та інші [2; 3]. Питаннями технологій термічної обробки заготовок для стволів артилерійських систем займаються такі науковці, як Л. М. Дейнеко, В. М. Надтока, П. І. Лобода, Д. В. Гарбуз, Shabatura Yu., Seredyuk V., Balandin M. [4; 5]. Технології для покращення зносостійкості робочих поверхонь нарізних стволів артилерійських систем і підвищення їх ресурсу розробляють О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, П. А. Болкот, П. І. Ванкевич [1].

На сьогоднішній день дослідження зосереджені на розробці ефективних методів термічної обробки сталевих артилерійських стволів, спрямованих на підвищення їх міцності, зносостійкості та теплостійкості під час інтенсивного вогню.

Зокрема, дослідження вказують на важливість вибору хімічного складу сталі, способу виробництва рідкого металу, якісної обробки тиском злитка та термічної обробки поковки і виробу для забезпечення оптимальних характеристик артилерійських стволів. Результати досліджень підтверджують необхідність підвищення міцності, пластичності та в'язкості металу ствола для ефективної роботи в умовах експлуатації та витримання інтенсивного вогню.

Ці дослідження відображають важливість постійного вдосконалення технологій термічної обробки артилерійських стволів гаубиць для забезпечення їх надійності та ефективності в умовах сучасних збройних конфліктів.

У статті представлено комплексний підхід до вирішення проблеми термічної обробки артилерійських стволів гаубиць, спрямований на забезпечення їх здатності витримувати інтенсивний вогонь в умовах війни з Росією. Проаналізовано фізико-механічні процеси, що відбуваються в матеріалі ствола під впливом високих температур, та запропоновано оптимальні режими термічної обробки, спрямовані на підвищення експлуатаційних характеристик сталевих артилерійських стволів.

Метою дослідження є вивчення сучасних методів термічної обробки артилерійських стволів гаубиць для витримання інтенсивного вогню в умовах війни з Росією та визначення їх переваг та недоліків.

Методи та методологія дослідження

В ході роботи над темою статті були використані такі науково-дослідницькі методи:

Аналіз наукової літератури, присвяченої термічній обробці артилерійських стволів гаубиць, з акцентом на методи, що застосовуються для витримання інтенсивного вогню.

Синтез інформації, в тому числі узагальнення результатів аналізу наукової літератури та формування уявлення про сучасний стан знань у цій галузі.

Абстрагування, що полягає у виокремленні ключових факторів, що впливають на термічну обробку артилерійських стволів гаубиць. Формулювання загальних принципів та закономірностей, що лежать в основі методів термічної обробки.

Узагальнення та формулювання висновків щодо найбільш ефективних методів термічної обробки артилерійських стволів гаубиць для витримання інтенсивного вогню.

Результати дослідження та їх обговорення

Основною і найбільш навантаженою частиною будь-якої артилерійської системи (гармати) є ствол, який являє собою порожнистий циліндр, що працює під великим внутрішнім тиском, що діє протягом тисячних часток секунди. Внутрішня поверхня каналу ствола може бути гладкою або з нарізами. Поверхня каналу ствола зазнає зусиль зрізу під дією снаряда, що рухається, піддається ерозійному та високотемпературному впливу порохових газів, а також тиску провідного паска снаряда, який повинен деформуватися, щоб прийняти форму профілю



Рис. 1. Гаубиці M777 британського виробництва для озброєння ЗСУ [6]

нарізів каналу ствола. Функціональний термін служби артилерійських систем вимірюється кількістю пострілів, яка, наприклад, для танкових гармат в останні десятиліття складає приблизно ≥ 500 (рис. 1) [4, с. 37].

Згідно з даними виробників, вітчизняні зразки артилерійського озброєння мають подібні характеристики живучості до російських, а також до зразків з ЄС і США. Це становить не більше 6000

пострілів для автоматичних 30 мм гармат, 4000 – для крупнокаліберних 12,7 мм кулеметів, і приблизно 10 000 для дрібнокаліберного озброєння калібру 5,45–7,62 мм. Живучість стволів безпосередньо пов'язана з інтервалами стрільби, необхідними для охолодження металу, щоб уникнути температурних деформацій, термоциклічних тріщин у каналі ствола та швидкого зношування калібру, яке також відбувається через хімічну ерозію. Збільшення ресурсу досягається шляхом конструктивного збільшення жорсткості стволів і тепловіддачі, нанесення захисних покриттів на поверхню каналу стволів, а також регламентуванням темпу та інтервалів стрільби [2, с. 199].

В умовах ведення війни та здійснення переозброєння ЗСУ необхідно застосовувати найбільш прогресивні технології і обладнання для виготовлення стволів артилерійського та стрілецького озброєння.

Термічна обробка артилерійських стволів гаубиць є важливим процесом, спрямованим на підвищення їхньої зносостійкості та довговічності. Цей процес включає різні методи, такі

як гартування, відпуск, азотування, цементация та інші. Метою цих методів є поліпшення механічних властивостей сталі, з якої виготовлені стволи, для витримання високих температур та навантажень, що виникають під час інтенсивного вогню. Розглянемо детальніше деякі з цих методів [4, с. 42].

Гартування полягає у нагріванні сталі до високої температури (вище критичної точки) з подальшим швидким охолодженням. Це призводить до збільшення твердості та міцності сталі. Після гартування матеріал стає більш стійким до зносу та динамічних навантажень, що дуже важливо для артилерійських стволів.

Відпуск є процесом, що застосовується після гартування для зменшення крихкості сталі. Під час відпуску сталь нагрівають до певної температури (нижчої, ніж при гартуванні) і повільно охолоджують. Це дозволяє зберегти високу міцність, але зменшити крихкість, роблячи матеріал більш витривалим при інтенсивному використанні.

Азотування – це процес дифузійного насичення поверхні сталі азотом при підвищених температурах. Це підвищує твердість поверхневого шару, зносостійкість та корозійну стійкість. Стволи, оброблені азотом, краще витримують високі температури і тиск під час стрільби.

Цементация передбачає насичення поверхневого шару сталі вуглецем при високій температурі. Цей процес створює на поверхні дуже твердий шар, що підвищує зносостійкість і міцність ствола. Цементовані стволи мають високу стійкість до ерозії та термічних навантажень.

Поверхнєве покриття, зокрема хромування, передбачає нанесення на внутрішню поверхню ствола шару хрому. Це значно збільшує зносостійкість, стійкість до корозії і покращує теплопровідність, що важливо для відведення тепла під час стрільби.

Завдяки ефективним способам термічної обробки артилерійських стволів гаубиць сучасні гармати мають істотне збільшення вогневої потужності:

дулова енергія збільшилася на 4–6 разів за останні 50–60 років

максимальний тиск в каналі збільшився в 2–3 рази

рівень міцності металу ствола збільшився в 2,2–2,5 рази [1].

Правильно підібрана термічна обробка дозволяє стволам витримувати навантаження інтенсивного вогню, роблячи їх надійними та довговічними. Сам процес термообробки включає кілька ключових кроків:

Перший етап – нагрівання ствола до високої температури. Це дозволяє змінити структуру металу, знижуючи його твердість та підготовлюючи до подальших обробок. Після нагрівання ствол піддається контрольованому охолодженню. Швидке або повільне охолодження може вплинути на мікроструктуру металу та його властивості. Один з найважливіших етапів – закалка. Цей процес забезпечує високу твердість та міцність металу, що необхідно для витримання великих навантажень під час стрільби. Останній етап – відпускання, яке дозволяє зменшити внутрішні напруження в металі та покращити його механічні властивості [7]

Термічна обробка артилерійських стволів гаубиць існує кількох видів, кожен з яких має певну мету та очікуваний результат (рис. 2).

Повне гартування	Неповне гартування	Об'ємне гартування	Місцеве гартування
<ul style="list-style-type: none"> Застосовується для стволів, які потребують максимальної твердості та міцності 	<ul style="list-style-type: none"> Стовбур гартується не до кінця, що робить його більш в'язким та стійким до ударів. 	<ul style="list-style-type: none"> Стовбур гартується цілком 	<ul style="list-style-type: none"> Тільки певні частини стовбура гартуються, наприклад, казенна частина.

Рис. 2. Види термічної обробки [7]

Під час лабораторних та дослідницько-промислових досліджень використовувалися сталі з базовим хімічним складом, що відповідає сталі 0ХНЗМФА згідно з ГОСТ В 5192–78, що використовується в СНД. Цей вид сталі подібний до сталі типу 4340 (ASTM). Основною метою досліджень було досягнення в металі готової трубної заготовки нормованих властивостей, які наведені в таблиці.

Перспективний рівень нормованих властивостей металу трубної заготовки [1]

Рівень міцності	Ефективність використання енергії	Ударна пластичність	Ударна в'язкість	Твердість
$\sigma_{ПЦ}$, кгс/мм ²	φ , %	КСУ ⁺²⁰ , кгс м/см ²	КСУ ⁻⁵⁰ , кгс м/см ²	HRC
≥ 140	≥ 30	$\geq 3,5$	≥ 2	≤ 45

Дослідження, як вітчизняні, так і зарубіжні, показали, що досягнення високого рівня механічних властивостей можливе лише при обмеженні вмісту вуглецю в сталі до $\leq 0,4\%$, значному зменшенні розміру аустенітного зерна та мартенситних пакетів, а також уникненні декорування границь зерен крихкими частинками вторинної фази (наприклад, карбідами, нітридами і т.д.), як під час нагрівання для загартування, так і в процесі подальшого відпуску.

Термічна обробка має значний вплив на характеристики ствола артилерійської системи. По-перше, гартування суттєво збільшує твердість металу, роблячи його більш стійким до зношування. Це особливо важливо для стволів, які піддаються інтенсивним механічним та термічним навантаженням під час стрільби. По-друге, процеси гартування та відпускання підвищують міцність металу, що дозволяє стволу витримувати більші навантаження без деформацій. Крім того, відпускання збільшує в'язкість металу, роблячи його більш стійким до ударів та тріщин, що також сприяє довговічності ствола. Завдяки гартуванню також значно підвищується зносостійкість металу, що подовжує термін служби ствола, зменшуючи частоту його заміни та обслуговування. Всі ці покращення характеристик забезпечують надійну та ефективну роботу артилерійських систем у складних бойових умовах [8].

Висновки

Термічна обробка є критично важливим етапом у виробництві артилерійських стволів гаубиць. Вона значно впливає на їхню міцність, зносостійкість, стійкість до тріщин та загальний термін служби. Правильно підібрана термічна обробка дозволяє стволам витримувати навантаження інтенсивного вогню, роблячи їх надійними та довговічними.

Основними етапами термічної обробки є відпал, гартування та відпускання. Кожен з цих етапів має свої особливості та впливає на характеристики стовбура. Існує декілька видів термічної обробки, які застосовуються до артилерійських стволів гаубиць. Вибір виду термічної обробки залежить від матеріалу стовбура, його геометрії та бажаних характеристик. Сучасне обладнання та технології дозволяють з більшою точністю контролювати режим термічної обробки, що забезпечує кращі результати. Термічна обробка є одним з ключових факторів, що забезпечують боєздатність артилерії. Ретельне дотримання технології термічної обробки на всіх етапах виробництва гарантує надійність та довговічність артилерійських стволів.

Важливо зауважити, що термічна обробка не є єдиним фактором, що впливає на характеристики артилерійських стволів гаубиць. Важливу роль також відіграють якість матеріалу, конструкція стовбура та умови його експлуатації.

Дослідження та розробка нових методів термічної обробки є постійним процесом, спрямованим на покращення характеристик артилерійських стволів. Термічна обробка артилерійських стволів гаубиць є складною науково-технічною задачею, яка потребує глибоких знань та досвіду. Правильне вирішення цієї задачі робить артилерію більш надійною та ефективною.

A. Siryi, Master,

National Metallurgical Academy of Ukraine

THERMAL TREATMENT OF ARTILLERY HOWITZER BARRELS FOR WITHSTANDING INTENSIVE FIRE

The purpose of this study is to study the influence of various methods of heat treatment on the characteristics of the barrels of artillery howitzers, in particular on their hardness, strength, viscosity and wear resistance. The research is aimed at determining the optimal processing technologies to increase the endurance and effectiveness of barrels during intense fire. The work uses an analytical approach based on the processing of information sources on the research topic. The results of the study show that various methods of heat treatment have a significant effect on the characteristics of howitzer barrels. In particular, quenching and tempering significantly increase the hardness and strength of the metal, and tempering further increases the viscosity, making the barrels more resistant to cracks and impacts. Nitriding and cementation increase wear resistance, which extends the service life of barrels. Thus, it is determined that the heat treatment process has several stages.

Key words: *howitzer; the barrel of the artillery system; heat treatment; mechanical wear; operational stability.*

Література

1. Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Болкот П. А., Ванкевич П. І. Розробка технології для покращення зносостійкості робочих поверхонь нарізних стволів артилерійських систем і підвищення їх ресурсу. Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2023. № 2 (2). С. 50–56. <https://doi.org/10.37701/ts.02.2023.06>.
2. Крот П. В., Бобирь С. В., Приходько І. Ю., Жарков І. П., Ханнолайнен В. Т., Дихановський В. М. Технологія і обладнання криогенної обробки стволів

- артилерійського і стрілецького озброєння. Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід. Київ, 22–23 вересня 2015. С. 197–201.
3. Цибуляк Б. З. Деградація параметрів стволів артилерійського озброєння в процесі експлуатації. Військово-технічний збірник. 2016. № 14. С. 121–126. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.14.2016.121-126>.
 4. Дейнеко Л. М., Надтока В. М., Лобода П. І., Гарбуз Д. В. Основні напрями розвитку технологій термічної обробки заготовок для стволів артилерійських систем. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 2. С. 36–44. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.230419.36.291.
 5. Shabatura Yu., Seredyuk B., Balandin M. Method of temperature control and forced cooling of the barrel of an artillery gun using a thermoelectric generator. *The Scientific Heritage*. 2020. № 47. P. 26–30.
 6. Що таке гаубиці та САУ, які так важливі у війні Росії проти України. BBC News Ukraine. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-61266396> (дата звернення: 26.05.2024).
 7. Дерев'яничук А. Й. Основи будови артилерійських гармат та боєприпасів: підручник. Суми: Сумський державний університет, 2011. 716 с.
 8. Jakorčić M., Grilec K. Influence of artillery weapon barrel superheat on erosion wear resistance of material. *Tehnicki Vjesnik*. 2011. 18 (2).

Надійшла 26.05.24

References

1. Andreikiv, O. Ye., Dolinska, I. Ya., Bolkot, P. A., & Vankevych, P. I. (2023). Rozrobka tekhnolohii dlia pokrashchennia znosostiikosti robochykh poverkhon nariznykh stvoliv artyleriiskykh system i pidvyshchennia yikh resursu [Development of technology to improve the wear resistance of the working surfaces of threaded barrels of artillery systems and increase their resource]. *Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut vyprobuvan i serytyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki – State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*, 2(2), 50–56 [in Ukrainian].
2. Krot, P. V., Bobyr, S. V., Prykhodko, I. Yu., et al. (2015). Tekhnolohiia i obladnannia kriohennoi obrobky stvoliv artyleriiskoho i striletskoho ozbroiennia [Technology and equipment for cryogenic processing of artillery and small arms barrels]. *Perspektyvy naukovo-tekhnolohichnoho zabezpechennia oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiino-komunikatyvnyi zakhid [Prospects of scientific and technological support of the defense-industrial complex of Ukraine: Information and communication event]*. (s. 197–201) Kyiv. [in Ukrainian].
3. Tsybuliak, B. Z. (2016). Dehradatsiia parametriv stvoliv artyleriiskoho ozbroiennia v protsesi ekspluatatsii [Degradation of artillery barrel parameters during operation]. *Viiskovo-tekhnichniy zbirnyk – Military and technical collection.*, 14, 121–126. [in Ukrainian].
4. Deyneko, L. M., Nadтока, V. M., Loboda, P. I., & Harbuz, D. V. (2019). Osnovni napriamy rozvytku tekhnolohii termichnoi obrobky zahotivok dlia stvoliv artyleriiskykh system [The main directions of development of technologies for heat treatment of blanks for the barrels of artillery systems]. *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv – Metallurgy and heat treatment of metals*, 2, 36–44 [in Ukrainian].
5. Shabatura, Yu., Seredyuk, B., & Balandin, M. (2020). Method of temperature control and forced cooling of the barrel of an artillery gun using a thermoelectric generator. *The*

- Scientific Heritage*, 47, 26–30.
6. *Shcho take haubytsi ta SAU, yaki tak vazhlyvi u viini Rosii proty Ukrainy [What are howitzers and self-propelled guns, which are so important in Russia's war against Ukraine]*. (b.d.). VVS News Ukraine. <https://www.bbc.com/ukrainian/news-61266396> [in Ukrainian].
 7. Derevianchuk, A. Y. (2011). *Osnovy budovy artyleriiskykh harmat ta boieprypasiv: pidruchnyk [Basics of the structure of artillery guns and ammunition: a textbook]*. Sumskyi derzhavnyi universytet [in Ukrainian].
 8. Jakopčić, M., & Grilec, K. (2011). Influence of artillery weapon barrel superheat on erosion wear resistance of material. *Tehnicki Vjesnik*, 18(2).

УДК 621.537.528:621.762.3

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-326-336

О. М. Сизоненко, д-р техн. наук, **А. С. Торпаков**, **М. С. Присташ**,
кандидати технічних наук

*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, просп. Богоявленський, 43-а,
54018, Миколаїв, e-mail: olgasizonenko43@gmail.com*

ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНИХ ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ Al – Ti – C

Метою роботи є створення поліфункціональних композиційних матеріалів із використанням висококонцентрованих потоків енергії.

В роботі використані методи фізичного експерименту, реєстрації швидкоплинних електричних процесів, рентгенофазового аналізу, оптичної мікроскопії, а також експериментальні методи визначення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів (твердість, зносостійкість, жаростійкість). Робота ґрунтується на новому підході до отримання метало-матричних композитів (ММК), у якому дисперснозміцнюючі вclusions не додаються механічно у порошкову суміш як додатковий компонент, а синтезуються під час обробки високовольтним електричним розрядом (ВЕР) та досягається гомогенне змішування компонентів. Подальша консолідація підготованих порошків методом іскрового плазмового спікання (ІПС) дозволяє запобігти зростанню зерна та отримувати консолідований матеріал за відносно невеликий час при менших енергозатратах, ніж у традиційних методах.

ВЕР обробка порошкової системи вихідного складу 85 % Ti + 15 % Al у етанолі при $W_{num} = 10$ МДж/кг дозволяє диспергувати вихідні порошки від середнього діаметру 33 мкм до середнього діаметру ~ 6 мкм та синтезувати в них дисперснозміцнюючі фази TiC, Ti₂AlC, та Ti₃AlC₂. Консолідація підготовленої шихти методом ІПС дозволяє отримати наноламінат-композит Ti₃AlC₂ – TiC твердістю HV5 = 4 ГПа. Абсолютна інтенсивність зношування матеріалу складала 0,007 г/км.

Практичне значення роботи полягає в тому, що підготовка порошків за допомогою ВЕР із наступною консолідацією методом ІПС дозволяє отримати ММК із підвищеним рівнем твердості, зносостійкості та жаростійкості для отримання інструментів різного призначення та конструкційних матеріалів для використання у авіакосмічній галузі та машинобудуванні.

Оригінальність роботи випливає з того, що нові ММК отримують шляхом підготовки вихідних порошків ВЕР, що сприяє диспергуванню порошків та реакційному синтезу дисперснозміцнюючих включень під впливом мікроплазмових розрядів, а подальше ІПС забезпечує керовану зміну фазового складу та структури.