УДК 621,41/42:669.14:623.454.21:621.78
DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.230419.36.291

ОСНОВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗАГОТІВОК ДЛЯ СТВОЛІВ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ

ДЕЙНЕКО Л. М.[1*], *д. т. н., проф.*,
НАДТОКА В. М.[2], *к. т. н., пр. н. с.*,
ЛОБОДА П. І.[3], *д. т. н., проф.,*
ГАРБУЗ Д. В.[4], *аспірант*

[1]* Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055
[2] Конструкторське бюро «Південне», вул. Кріворізька 3, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 632-39-45, e-mail: vnadtoka@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-9653-5127
[3] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна, тел. +38 (044) 236-79-89, ORCID ID: 0000-0001-6718-9635
[4] Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 559-33-60, e-mail: dmitriy_harbuz@outlook.com, ORCID ID: 0000-0002-3603-1242

Анотація. ***Мета роботи*** − визначити умови експлуатації стволів артилерійських систем, які являються найбільш складними їх елементами з технологічної точки зору, основні фактори, які у процесі виготовлення зливку, трубної заготівлі, ствола, та при експлуатації систем знижають якісні показники металу, а також визначити основні тенденції у виробництві конкурентоспроможних артилерійських систем, що характерні для розвитку артилерійського озброєння за останні 50−60 років, у т. ч. і в умовах України. ***Методики дослідження:*** аналітична та експериментальна. ***Результати досліджень*** показали, що до основних факторів, які суттєво підвищують експлуатаційну стійкість стволів артилерійських систем відносять: використання для виготовлення якісного металу, збільшення рівня міцності металу ствола (рівня межі пропорційності), використання ефективних захисних покриттів поверхні каналу ствола, які протидіють прискоренню ерозії, зносу та знеміцненню металу поверхні каналу при підвищенні енергії порохових зарядів. ***Наукова новизна*** результатів досліджень визначається параметрами технологій термічної обробки (попередньої для деформованих трубних заготівль та фінішної для готових стволів) та конструктивно-технологічних параметрів гартівного обладнання, які забезпечують отримання в металі стволів рівня межі пропорційності $\geq$ 140 кгс/мм^2 (1 400 МПа), а також параметрами технології і обладнання для нанесення шару захисного покриття (хромового, танталового або інших) методом фізичного осадження з газової фази PVD (physical vapor deposition) на поверхню каналу, що дозволяє досягати нормованої експлуатаційної стійкості стволів артилерійських систем (до рівня вимог країн НАТО). ***Практична значимість*** результатів досліджень полягає у промисловій апробації розробок і можливості їх використання для створення промислових потужностей для виробництва конкурентоспроможних виробів, які спроможні забезпечити потреби армії та експорт цієї продукції на зовнішній ринок. Дослідження виконувалися за рахунок держбюджетних та господарських тем.

Ключові слова: ствол артилерійської системи; температура; тиск; механічний знос; ерозія; експлуатаційна стійкість

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ДЛЯ СТВОЛОВ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ

ДЕЙНЕКО Л. Н.[1*], *д. т. н., проф.*,
НАДТОКА В. Н.[2], *к. т. н., вед. н. с.,*
ЛОБОДА П. И.[3], *д. т. н., проф.*,
ГАРБУЗ Д. В.[4], *аспирант*

[1]* Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055
[2] Конструкторское бюро «Южное», ул. Криворожская, 3, Днипро, Украина, тел. +38 (067) 632-39-45, e-mail: vnadtoka@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-9653-5127
[3] Национальний технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, 03056, Киев, Украина, тел. +38 (044) 236-79-89, ORCID ID: 0000-0001-6718-9635
[4] Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (095) 559-33-60; e-mail: dmitriy_harbuz@outlook.com, ORCID ID: 0000-0002-3603-1242

Аннотация. ***Цель работы*** − определить условия эксплуатации стволов артиллерийских систем, которые являются наиболее сложными их элементами, а также основные факторы, которые в процессе изготовления слитка, трубной заготовки, ствола и при эксплуатации систем снижают качественные характеристики метала; определить основные тенденции в производстве конкурентоспособных артиллерийских систем, характерные для развития артиллерийского вооружения за последние 50−60 лет, в т. ч. и в условиях Украины. ***Методики исследования*** : аналитический анализ и экспериментальные исследования. ***Результаты исследований*** показали, что к основным факторам, которые существенно повышают эксплуатационную стойкость стволов артиллерийских систем относят использование для их изготовления качественного метала, повышение уровня прочности метала ствола (предела пропорциональности), использование эффективных защитных покрытий поверхности канала ствола, которые противодействуют ускорению эрозии, уменьшают износ и разупрочнение метала поверхности канала ствола при повышении энергии пороховых зарядов. ***Научная новизна*** результатов исследований определяется параметрами технологий термической обработки (предварительной для деформированных трубных заготовок и финишной для готовых стволов) и конструктивно-технологическими параметрами завалочного оборудования, которое обеспечивает получение в металле стволов уровня предела пропорциональности ≥ 140 кгс/мм^2 (1 400 МПа), а также параметрами технологи и оборудования для нанесения слоя защитного покрытия (хромового, танталового или др.) методом физического осаждения из газовой фазы PVD (physical vapor deposition) на поверхность канала, что позволяет получать нормированную эксплуатационную стойкость стволов артиллерийских систем (до уровня требований стран НАТО). ***Практическая значимость*** результатов исследований заключается в промышленной апробации разработок и возможности их использования при создании промышленных мощностей для изготовления конкурентоспособных изделий, которые в состоянии обеспечить потребности армии и экспорт этой продукции на внешний рынок. Исследования выполнялись за сет средств госбюджетных и хозяйственных договоров.

Ключові слова : ствол артиллерийской системы; температура; давление; механический износ; эрозия; эксплуатационная стойкость

MAIN TRENDS IN DEVELOPMENT OF HEAT TREATMENT TECHNOLOGIES OF FORGED PIPE SHELL FOR ARTILLERY BARRELS

DEINEKO L.N.[1*], *Dr. Sc. (Tech.), Professor,*
NADTOKA V.N. [2], *Cand. Sc. (Tech.), Leading Research Worker,*
LOBODA P.I. [3], *Dr. Sc. (Tech.), Professor,*
GARBUZ D.V. [4], *Postgraduate Student*

[1]* National Metallurgical Academy of Ukraine (NMetAU), 4, Gagarina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055
[2] "Southern" Design Office, 3, Krivoriz'ka str., Dnipro, Ukraine, tel. +38 (067) 632-39-45, e-mail: vnadtoka@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-9653-5127
[3] National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Pr. Peremohy, 03056, Kyiv, Ukraine, tel. +38 (044) 236-79-89, ORCID ID: 0000-0001-6718-9635
[4] National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 559-33-60, e-mail: dmitriy_harbuz@outlook.com, ORCID ID: 0000-0002-3603-1242

Abstract. ***Work purpose*** − to analyze conditions of operation of artillery system gun barrels, to define major factors which reduce qualitative characteristics of metal at manufacture from it of an ingot, pipe preparation and gun barrels and also at their use. To define top trends in the production technology of competitive artillery systems which are characteristic of development of artillery arms for the last 10 years, including in the conditions of Ukraine. ***Research techniques*** : analytical fitted also the experimental studies. ***Results of researches*** showed that carry to major factors which significantly increase operational firmness of gun barrels of artillery systems: threw use of qualitative, threw increase in tensile strength a gun barrel (proportional limit), use of the effective protective coating of a canal surface of a gun barrel which counteract acceleration of an erosion is reduced by a wear and a loss of strength threw gun barrel canal surfaces at increase in energy of powder charges. ***The scientific novelty*** of results of researches is defined by parameters of technologies of a heat treatment (preliminary for the deformed tubing stocks and finishing for ready gun barrels) and design process parameters of a hardening equipment which provides ≥ 140 kgf/mm^2 (1 400 MPa) in metal of gun barrels of level of a proportional limit and also parameters technologists and the equipment for drawing a layer of the protective coating (chromic, tantalic or other) method of a physical deposition from a gas phase of PVD (physical vapor deposition) on a canal surface that allows to receive the rated operational firmness of barrels of artillery systems (to the level of requirements of the countries of NATO). ***The practical significance*** of results of researches consists in industrial approbation of developments and a possibility of their use during creation of industrial capacities for manufacture of competitive products which are able to provide requirements of army and export of these products on foreign market.

Keywords: a gun barrel of artillery system; pressure; mechanical wear; erosion; operational firmness

Досвід бойових дій в локальних конфліктах останніх років і прогноз їх характеру в можливих локальних, регіональних і великомасштабних війнах в майбутньому, підтверджують зростаючу роль артилерії по ураженню противника. Артилерія залишається єдиним всепогодним і цілодобовим засобом, здатним виконувати основну частину вогневих завдань [1].

Основною і найбільш напруженою частиною будь-якого артилерійської системи (гармати) є ствол, який являє собою порожнечий циліндр, що працює під великим внутрішнім тиском, який діє протягом тисячних часток секунди. Внутрішня поверхня каналу ствола може бути гладкою або з нарізами. Поверхня каналу ствола працює на зріз під дією снаряда, який просувається, піддається ерозійному і високотемпературному впливу порохових газів, а також дії тиску провідного паска снаряда, який повинен деформуватися для прийняття форми профілю нарізів каналу ствола [2]. Функціональний термін служби артилерійських систем вимірюється числом пострілів, яке, наприклад, для танкових гармат в останні десятиліття визначається приблизно кількістю ≥ 500.

З метою підвищення технічного рівня артилерійських систем науково-виробничі комплекси промислово розвинених країн працюють над істотним поліпшенням їх тактико-технічних характеристик (ТТХ), які визначають рівень бойової ефективності артилерії і дозволяють збільшити дальність стрільби в 1,2 ... 1,8 рази, скорострільність − в 1,5 ... 3 рази, точність − в 1,3 ... 3 рази, підвищити час реагування в 5...6 разів, підвищити мобільність, захищеність та інші характеристики.

У світовій практиці виробництва великогабаритних сталевих заготівок для виготовлення стволів артилерійських систем калібром більше 30 мм використовуються різні методи переділу виливка на поковку і виготовлення з неї порожнечої заготовки. Одним з найбільш досконалих технологічних процесів є технологія [3] виробництва сталевих труб на прохідних радіально-кувальних машинах (ПРКМ), наприклад, австрійської фірми GFM. Технологічні лінії, в складі яких використовуються ПРКМ, здатні виробляти сталеві труби різного призначення з мінімальними припущеннями на діаметральні розміри поковки, які становлять не більше 1 % від їх розмірів. На цих машинах злитки різної форми можуть деформуватися в гарячому і холодному стані чотирма або більше бойками, розташованими в одній площині і діючими синхронно з частотою 145...2 000 ударів / хв. Мінімальний діаметр каналу заготовки при максимальній довжині заготовки 18 м і масі до 20 т можливо отримати при куванні на оправці 28 мм. За літературними даними використання таких деформуючих комплексів і технологій дозволяє докорінно знизити трудомісткість і металоємність процесу виготовлення трубної заготовки (або готового виробу) при істотному підвищенні рівня експлуатаційних властивостей металу (рівень межі пропорційності металу кованої заготовки після термомеханічної обробки з використанням ПРКМ може досягати ≥ 140 кгс/мм^2).

Для вітчизняної промисловості (здатної виконувати замовлення Укроборонпрому), підприємства якої не мають подібних деформуючих комплексів, необхідно розробити спеціалізовану комплексну ливарно-кувальних технологію, здатну забезпечити стабільне отримання високоякісного металу виливку (за складом шихти і способу отримання рідкого металу, розливання, кристалізації, форми і розважування зливків, за кількістю неметалевих включень, легкоплавких металів, газів, за показниками дендритних структур → хімічною неоднорідністю металу зливка та ін.) і поковки (за деформаційним опрацюванням, газами, хімічною неоднорідністю, показниками макро-, мікроструктури, рівнем механічних властивостей та іншими показниками) і визначити склад і параметри обладнання, яке здатне забезпечити реалізацію такої технологічної схеми для спеціалізованого виробництва. Слід зазначити, що отримувати в Україні таку спеціалізовану конкурентоспроможну продукцію для власних потреб і продажу на зовнішньому ринку, як стволи артилерійських систем з рівнем нормованих характеристик, що відповідають вимогам країн НАТО, неможливо без створення в країні спеціалізованого комплексу з повним циклом виробництва і системою пооперацийного контролю якості продукції [4].

Аналіз літературних і спеціальних джерел інформації говорить про те, що за останні 50−60 років виробництва артилерійських систем в світовій практиці простежуються основні тенденції, характерні для розвитку артилерійського озброєння. За цей час вогняна міць гармат (дулова енергія) збільшилася в 4...6 разів, максимальний тиск в каналі ствола − в 2...3 рази, рівень міцності металу ствола − в 2,2....2,5 рази. Для успішного вирішення поставлених перед ствольною артилерією 21 століття завдань необхідно вирішити ряд складних науково-технічних проблем за всіма складовими артилерійських комплексів (ствольної частини, механізмів, прицілів, приводам і т. п.) [2].

Однією з тенденцій сучасного зарубіжного ствольного артозброєння є використання перспективних гармат калібру 155 мм з довжиною ствола 52 калібрів, як для новостворюваних артилерійських систем, так і для модернізації існуючих (виготовлених протягом останніх 20−30 років, які зберігаються на складах). В якості приклада можна привести самохідну гаубицю PZH 2000. Гармата цієї системи розроблена німецькою компанією Krauss-Maffeu Wegmann в рамках так званого Спільного меморандуму про взаєморозуміння в області балістики, укладеного між Італією, Великобританією і Німеччиною. Самохідка оснащена 155 мм гарматою L52 виробництва корпорації Rheinmetall. За характеристиками до цієї

системи наближається сучасний варіант самохідної гаубиці «Мста-С» (індекс 2С19, калібр пушки 152 мм).

Варто також згадати і ефективні артилерійські системи типу 2А36 «Гіацинт-Б» (152 мм буксирувана гаубиця) і її варіант 2А37 для самохідної артилерійської установки 2С5 «Гіацинт». За даними іноземних військових експертів, гармата 2А36 (в буксуємому варіанті) протягом тривалого часу володіла найбільшою дальністю стрільби (40 км − активно-реактивним снарядом) з усіх артилерійських систем аналогічного калібру (152 мм), коли-небудь прийнятих на озброєння в СРСР з середини XX сторіччя, поступаючись в цьому відношенні лише 203мм САУ 2С7 «Піон» (47,5 км − активно-реактивним снарядом). Перспективним проектом є і розробка самохідної гаубиці «Богдан» з гарматою натовського калібру 155 мм.

До тенденцій створення перспективних танкових гармат відноситься і проект, розроблений німецькою компанією Rheinmetall AG. Для озброєння модернізованих і перспективних танків запропоновано використовувати гармату калібру 130 мм. За рахунок збільшення калібру з існуючих 120 мм до перспективних 130 мм, згідно з вимогами до проекту, загальна ефективність гармати може бути збільшена на 50 %. В якості однієї з основних передумов до розробки перспективних гармат для країн Європи підвищеного калібру вказується поява нової російської бронетехніки, побудованої на базі платформи «Армата», які відрізняються від іншої техніки підвищеним рівнем захисту і можливим варіантом установки гармати калібром 152 мм. Для боротьби з подібними бронемашинами потрібно мати зброю з відповідними характеристиками, які може забезпечити нова 130 мм гармата. Передбачається, що першим носієм 130 мм гармати зможе стати нова модифікація основного бойового танку Leopard 2. Ще одним носієм 130 мм гармати зможе стати перспективний основний танк, планований до спільної розробки зусиллями німецьких і французьких підприємств. Для уявлення про ефективність використання 130 мм гармат слід згадати славну історію гармати М-46, випуск якої був початий в СРСР ще у 1951 р. Фахівці, оцінюючи її тактико-технічні характеристики, ставлять М-46 в один ряд з гарматами, сконструйованими на 30 років пізніше, такими як 2А36 (Гіацинт) і 2А65 (Мста). На сторінках інтернет-видань можна також знайти інформацію від експертів у галузі озброєнь про те, що в Німеччині і США ведуться роботи зі створення танкових гармат нового покоління, наприклад, німецька компанія «Рейнметалл» працює над 140 мм гладкоствольною танковою гарматою.

Світовий досвід проектування, виготовлення і використання цих видів виробів показує, що до основних факторів, що вимагає жорсткого контролю за їх проектуванням і виготовленням відносяться: оптимальні геометричні параметри ствола, рівень міцності, пластичності, в'язкісті металу готового виробу, рівень допустимих напружень та деформацій, жароміцність (здатність зберігати комплекс властивостей при нагрівах), опір металу термічної втомі (розпалу) та ін. [2]. Загальними вимогами, що пред'являються до характеристик гармат, є зростання радіуса дії і швидкості стрільби. Слід звернути увагу на появу інформації, що стосується випробувань на полігоні Юма (США) модифікованої гаубиці М777ER, що забезпечила дальність ефективної стрільби в 62 км. Такі показники в роботі артилерійських систем можливі тільки при збільшенні потужності заряду і, відповідно, підвищення міцності гарматного ствола.

Відомо, що одним з головних критеріїв працездатності трубної заготовки з сталей типу 4340 (ASTM, використовуються у всіх промислово розвинених країнах для виготовлення стволів калібром понад 30 мм) в умовах циклічного навантаження в інтервалі температур від −50 ^{0}С до +400 ^{0}С і вище є високий рівень опору малим пластичним деформаціям. Відомо, що опір малим пластичним деформаціям характеризується зазвичай величиною межі пружності або пропорційності. Чим вище буде величина цих характеристик, тим менше будуть при виникаючому рівні напружень неупругі та залишкові деформації, які і визначають ефективність роботи такого виробу. Забезпечити в металі готового ствола необхідний рівень межі пропорційності можливо тільки за рахунок ретельного вибору хімічного складу сталі, способу виробництва рідкого металу, якісної обробки тиском злитка і термічної обробки поковки і виробу.

У країнах НАТО, РФ, Китаї та ін. вже більше 15−20 років виготовляються з сталей типу 4340 і експлуатуються стволи з рівнем міцності (межею пропорційності) металу ≥ 1 400 МПа і ударної в'язкості KCU^{-50} ≥ 3,5кгс м/см^2 (35 Дж/см^2), із захисним покриттям на поверхні каналу ствола. Підвищення межі пропорційності в металі ствольної заготовки понад рівня, який може забезпечуватися в Україні (≥ 120 кгс/мм^2 або 1 200 МПа), дозволить знизити ймовірність виникнення мікропластичної деформацій в металі ствола при пострілах посиленими зарядами (в т. ч. і на поверхні металу каналу ствола), що зменшить ймовірність відшаровування захисного покриття, його розпалу і зносу при експлуатації виробів. Чим вище буде ця величина (межа пропорційності), тим менше будуть при доданому рівні напружень (пострілі) неупругі і залишкові деформації, які і визначають ефективність роботи виробу.

Особливо важливо підвищення міцності, пластичності і в'язкості металу ствола в умовах експлуатації при використанні боєприпасів з післягарантійним терміном зберігання, тобто тих, які використовуються після зберігання протягом 10 і більше років з моменту виготовлення. Слід зазначити, що багато країн світу з економічних міркувань використовують до т.ч. боєприпаси (у т. ч. і для танкових гармат), вироблені 10−20 років тому і

більше. Відомо, що тривале зберігання боєприпасів (наприклад, в роботах [5; 6] досліджувалися боєприпаси з терміном зберігання до 20−25 років), призводить до зміни властивостей порохових зарядів і до зміни параметрів внутрішньої балістики при виробництві пострілу. В Україні використовуються і протягом тривалого часу ще будуть використовуватися боєприпаси тривалого терміну зберігання. Практичні та експериментальні дослідження властивостей порохових зарядів, наприклад для бронебійно-підкаліберних снарядів, термін зберігання яких на 12 років і більше перевищував гарантійний термін зберігання, показали збільшення на 50...60 % зносу каналу ствола при однаковому числі пострілів в порівнянні з використанням кондиційних боєприпасів (тривалість зберігання яких 9 років) [5; 6].

Виходячи зі ступеня легування використовуваних сталей (типу 4340), складної технології виготовлення трубної заготовки (отливання зливку → ковка → противофлокенна термічна обробка (ПФО) → попередня механічна обробка → попередня термообробка → кінцева механічна обробка → фінішна термообробка) і відсутності на Україні прийнятної розробки, що забезпечує в металі виробів межі пропорційності ≥140 кгс/мм^2, з набуттям державної незалежності було прийнято рішення про першочергове створення концепції комплексної технології термічної обробки заготовки, що включає і протифлокенну обробку. Така концепція була розроблена вченими НМетАУ і допомогла визначити оптимальний в умовах України напрямок досліджень, розробити і апробувати в умовах НКМЗ на реальних виробах (калібром 125 мм) режими та технології попередньої і остаточної термообробки спеціальної трубної заготовки на рівень межі пропорційності ≥ 140 кгс/мм^2. Це дозволило вирішити одну з найбільш складних частин проблеми виготовлення артилерійсько-стрілкових озброєнь в умовах вітчизняних заводів − розробку параметрів комплексної технології термообробки трубної заготовки, склад обладнання термічних потужностей, конструктивно-технологічні параметри охолоджувальних пристроїв і раціональних охолоджуючих середовищ [4; 7; 8].

Під час виконання лабораторних і дослідно-промислових робіт дослідження проводились на сталях, базовим хімічним складом яких був склад сталі 0ХН3МФА (ГОСТ В 5192-78, який використовується в СНД, ГОСТ 3479-70, ГОСТ 4543-71, найближчим аналогом якої є сталь типу 4340 (ASTM). Основним завданням досліджень стало досягнення в металі готової трубної заготовки перспективного рівня нормованих властивостей, наведених в таблиці.

Таблиця

Перспективний рівень нормованих властивостей металу трубної заготовки / Perspective level of rated properties of metal of pipe preparation

$\sigma_{пц.}$, кгс/мм^2	φ, %	KCU^{+20}, кгс м/см^2	KCU^{-50}, кгс м /см^2	HRC
≥ 140	≥30	≥ 3,5	≥ 2	≤ 45

Результати вітчизняних і зарубіжних досліджень показують, що досягнення такого високого рівня механічних властивостей, при якому збільшення міцності не призводить до різкого зниження пластичності і в'язкості металу, можливо тільки за умови обмеження концентрації вуглецю в сталі (до ≤ 0,4 %), суттєвого зменшення дійсного розміру аустенітного зерна і мартенситних пакетів, а також запобігання декорування границь зерен крихкими частинками вторинної фази небажаної морфології (карбідами, нітридами і ін.), як при нагріванні під загартування, так і в процесі подальшого відпуску [4; 16].

Для отримання межі пропорційності в сталі такого рівня легування на рівні ≥ 140 кгс/мм^2, який раніше не досягався на сталях цього класу, необхідно було реалізувати при фінішній термічній обробці (гартування + відпуск) всі доступні механізми зміцнення металу. Попередні режими термообробки дозволили розчинити великі частки вторинної фази і отримати пересичений твердий розчин аустеніту з дрібним зерном, а в результаті фінішного гарту отримати дисперсную мартенситну структуру (за всім перетином металу) із залишковим аустенітом. На стадії відпустки потрібно досягти максимального розпаду залишкового аустеніту і створити оптимальні умови для карбідоутворення в пересиченій матриці, тобто для рівномірного виділення дисперсних частинок у об'єму зерен, а не переважно по їх границям. Відомо (наприклад, див. роботи Артінгера І.), що розмір часток вторинної фази, що виділяються при відпуску і їх кількість, істотно залежать від температури і тривалості відпуска. При температурах відпуска 200...300 °С розмір часток буде мінімальний, а кількість їх максимально. Частинки при цих температурах відпуска мають пластинчасту форму і є надійними стопорами для дислокацій.

При розробці параметрів фінішної термічної обробки були враховані і закономірності структуроутворення, пов'язані з виділенням проміжних карбідів. В процесі проведення фінішного гарту метал трубної заготовки зазнає переохолодження до температур 80...100 ^{0}С. Відомо, що в таких умовах загартування в сталях з вмістом вуглецю до 0,4 % в умовах самовідпуска і при подальшому відпуску при температурах до 200...220 ^{0}С відбувається утворення ε-карбіду. Відомо також, що чим вище вміст вуглецю в загартованої сталі, тим при більш низьких температурах наступного відпуску починається

виділення вуглецю з матриці з утворенням частинок вторинної фази. При цьому кожній температурі відпуску відповідає певна кількість вуглецю, що виділяється з пересиченого твердого розчину (див., наприклад, роботи І. М. Богачова, В. Г. Пермякова, М. В. Білоуса та ін.). Тому для отримання великої кількості дисперсних частинок вторинної фази в пересиченій вуглецем матриці доцільно замість одного кінцевого відпуска на заданий рівень властивостей, проводити багаторазові відпуски в найбільш оптимальних температурних інтервалах. Це дозволить реалізувати зародження великої кількості частинок карбідів в найбільш прийнятних з енергетичної точки зору (для кожного температурного інтервалу відпуска) місцях матриці і їх мінімальне зростання.

Ще одним важливим фактором, що робить істотний вплив на експлуатаційну стійкість виробів відповідального призначення, є схильність сталі до відпускної крихкості (ВХ). З огляду на особливість легування гарматних сталей (типу 4340) і закономірностей в процесах структуроутворення для досягнення необхідного рівня міцності в металі ствола необхідно фінішний відпуск проводити за температур 390...410 ^{0}С, тобто в інтервалі відпускної крихкості 1 роду (незворотньої). Однією з визначальних причин окрихчення металу в процесі відпуску і після нього є хімічна чистота сталі (концентрація домішок: сурми, олова, фосфору і ін. на границях зерен, а також газів в металі). У ряді досліджень (Mulford R. A., McMahon C. J., Clanelli A. K. та ін.), проведених на сталях близького складу до досліджуваної, при розробці технології виробництва стволів було показано, що найбільш сильне окрихчення виникає при відпуску загартованої сталі в інтервалі температур незворотньої відпускної крихкості за рахунок підвищення концентрації в металі сурми і олова. Зменшити вплив ОХ 1 роду на експлуатаційну стійкість металу стволів можливо тільки за рахунок металургійної чистоти металу, подрібнення зерен структури (тобто збільшення протяжності міжзеренних границь), рівномірного розподілу часток вторинної фази по об'єму металу (а не переважно за межзереними границями), а також ефективний розпад при відпуску залишкового аустеніту у вторинні структури.

При переході на стандарти НАТО і для забезпечення експлуатаційної стійкості стволі танкових гармат на рівні ≥ 500 пострілів, неможливо вирішити таку складну задачу без нанесення на поверхню каналу ствола ефективного захисного покриття.

Вимоги щодо збільшення дальності, швидкості стрільби та початкової швидкості снаряда вимагають використання більш високоенергетичних порохів, що в свою чергу, призводить до підвищеної ерозії металу стволів. Більш високоенергетичні компоненти пороху, розроблені для перспективних бойових систем, можуть привести гарматний ствол в непридатний стан навіть через чотири-п'ять автоматних черг [9]. Термін служби незахищених гарматних стволів (каналів) при використанні звичайних порохів складає від 100...200 пострілів для танкових гармат до декількох тисяч пострілів для скорострільних гармат [10; 11]. Розрахунковий термін служби ствола по фактору втоми металу зазвичай перевищує його реальний термін служби, і ерозія виявляється вирішальним фактором у його бракуванні. У минуле десятиліття проблема пошкодження гарматних стволів набула особливої важливості, зважаючи на значний рівень підвищення енергетики порохових зарядів [5; 6].

Рішення проблеми ерозії гарматних стволів може розглядатися з декількох напрямків. Один з підходів полягає в тому, щоб створити нові вибухові речовини або змінити наявні хімічні склади, щоб зменшити ерозію сталі, викликану продуктами згоряння пороху, не жертвуючи при цьому енергетикою вибухової речовини. Другий підхід полягає в тому, щоб будь-яким чином змінити конструкцію гарматного ствола, і за рахунок цього знизити ерозійний вплив продуктів згоряння. Обидва підходи використовувалися з різними ступенями успіху, включно із застосуванням вибухових речовин з низькою температурою полум'я, а також традиційне електролітичне покриття каналів гарматних стволів хромом. В останні десятиліття в промислово розвинених країнах інтенсивно проводяться роботи по підбору складів і створенню технологій ефективних захисних покриттів для внутрішньої поверхні каналу ствола. При цьому в таких країнах велика увага приділена розробці екологічно чистих технологій захисту каналів артилерійських стволів і виключення з виробництва гальванічного хромування.

Вибір складу покриття представляє найбільші труднощі при розробці технології захисту поверхні каналу артилерійського ствола. Перелік необхідних і бажаних характеристик ствола дуже великий і тому не існує матеріалу, який би повністю задовольняв цим вимогам. Існує також ряд обмежуючих вимог для процесу нанесення покриття. Процес повинен забезпечувати отримання покриття з виключно сильною адгезією/когезією відносно до поверхні каналу ствола. Термін когезії означає зчеплення між окремими шарами покриття. Тому говорити про повну адгезії не доводиться, якщо між окремими шарами самого покриття немає достатнього зчеплення. Покриття повинне володіти сильною адгезією при його нанесенні і в продовженні всього терміну служби, оскільки термін служби покриття визначає термін служби артилерійського ствола. Бажано, щоб покриття знаходилося під впливом залишкових стискаючих напружень. Такий напружений стан сприятиме кращій адгезії покриття і підкладки.

Оскільки, в т. ч. і в доступному для огляду майбутньому, під час виготовлення стволів великого калібру, ймовірно, також буде використовуватися низьколегована сталь (з економічних і технологічних

показників), яка піддається фінішної термообробці (гарт + відпуск 380...400 ^{0}C), то при нанесенні на поверхню каналу ствола покриття сталевої підшар не повинен нагріватися вище температури ~ 400 ˚С. Це обумовлено тим, що для досягнення максимальних значень межі пропорційності в сталях, в яких в якості зміцнюючої фази при відпуску використовується цементит (легований цементит), температура фінішного відпуску ствола не повинна перевищувати 390...410 ^{0}C через небезпеку зниження металу при підвищенні температури відпуску понад зазначених значень.

Коефіцієнт теплового розширення матеріалу покриття має дорівнювати або перевищувати коефіцієнт теплового розширення матеріалу підшару, з тим, щоб при нагріванні ствола не виникло внутрішніх напружень, що викликають відшарування покриття.

Модуль Юнга покриття повинен бути рівний або нижче, ніж у матеріалу підшару, для того, щоб при виникненні в металі ствола внутрішніх напружень при пострілі ці напруги не передавались підшару.

Нанесене покриття повинне забезпечувати хімічний захист металу підслоя від ерозійного впливу гарячих порохових газів. Покриття повинне бути вільне від початкових тріщин (які можуть утворюватися в процесі осадження) і тріщин, що утворюються в процесі експлуатації. Будь-які тріщини в матеріалі покриття будуть розширюватися під впливом агресивного середовища порохових газів під тиском, що утворюються при пострілі, після чого підшар виявиться позбавленим будь-якого захисту. Ці тріщини розклинюються і розширюються при попаданні в них мікроскопічного сміття, після чого підшар піддається корозії і нагріву. Покриття, крім захисту від газової ерозії, служить також термічним бар'єром, забезпечуючи ізоляцію від руйнівного теплового впливу високотемпературних порохових газів, а також затримують проникнення водню в метал підкладки. Хороший термічний бар'єр повинен мати низьку теплопровідність і велику теплоємність. Крім того, він повинен бути термічно стабільним, мати високу температуру плавлення, високу стійкість до термічного удару, відсутність фазових перетворень в межах робочого діапазону температур (зазвичай від −50 ^{0}C до точки плавлення). Такі термічні характеристики покриття, поряд з його товщиною, повинні перешкоджати фазовим перетворенням або хімічним реакціям в металі підкладки. У тому випадку, коли покриття не забезпечує ефективного термічного захисту металу підкладки, відбувається її розігрів та процеси зміни структурного стану. Нагрівання металу підкладки призводить не тільки до його зниження, але і до нагрівання до температур вище фазового $\acute{\alpha} \rightarrow \gamma$ перетворення в момент згоряння порохового заряду з подальшим охолодженням і зворотним $\gamma \rightarrow \acute{\alpha}$ перетворенням, що в результаті багаторазових циклів призводить до фазового наклепу і розпалу матеріалу підкладки (іноді називають тепловим розтріскуванням), що є причиною порушення цілісності покриття і поверхні підкладки. Покриття також має бути досить стійким при робочих температурах, щоб протистояти механічному впливу рухомого снаряда (провідного паска, обтюратора).

В даний час не існує матеріалу, який би задовольняв всім вищезгаданим характеристиками. Аналіз періодичної таблиці елементів Менделєєва і їх фазових діаграм дозволяє підібрати дуже короткий список придатних для покриття матеріалів і розділити їх на два класи: тугоплавкі матеріали (Cr, Nb, Mo, Ta, W і Re) і кераміка. Гальванічно нанесений захисний шар хрому добре показав себе в минулому, однак, йому притаманні деякі недоліки. При нанесенні хрому гальванічним способом у вигляді тонкого шару не забезпечується достатня термічна ізоляція нижчого сталевого подшару. У зв'язку з цим не забезпечується демпфірування термічного імпульсу, в результаті чого в сталевому підшару відбуваються фазові перетворення, і як наслідок, розтріскування поверхневого сталевого шару підкладки, хромового покриття і порушення їх суцільності. Якщо збільшити товщину гальванічного шару хромового покриття, то при цьому в ньому виникають залишкові напруження розтягу (характерні для гальванічного процесу) і слабка сила адгезії призводить до відшарування покриття від підкладки і його розтріскування.

Нелегований ніобій є досить м'яким матеріалом покриття і тому сплави ніобію рідко використовуються в якості матеріалу зносостійкого покриття для таких виробів як артилерійські стволи. До переваг ніобію можна віднести те, що його модуль Юнга такий же, як і в сталі, і ніобій не такий дорогий, як інші тугоплавкі матеріали.

Молібден легко стає крихким при впливу водню (в каналі ствола процес насичення воднем при згорянні пороху відбувається досить швидко). Сплави Mo−Re більш пластичні, але занадто дорогі.

Тантал добре працює в чистому вигляді, а ще краще в складі сплаву. Однак, *Ta* є другим за вартістю в списку тугоплавких металів.

Вольфрам і його сплави дуже важко піддаються обробці, при цьому вони легко стають крихкими під впливом водню.

Реній є найбільш дорогим тугоплавким металом. Добавки *Re* до інших тугоплавких металів сприяють збільшенню пластичності сплаву.

Кераміка (оксиди, карбіди і нітриди) можуть мати виключно високі температури плавлення при відмінній хімічної стійкості. У зв'язку з цим були зроблені спроби використання кераміки в якості покриття. В результаті було встановлено, що такі покриття мають дуже слабку адгезію, дуже слабку стійкість до сильного термічного і механічного впливу (особливо динамічного).

У світовій практиці існує дуже багато технологічних процесів нанесення покриттів. Як зазначалося раніше, гальванічне хромове покриття вже не задовольняє сучасним вимогам виробництва і

експлуатації виробів, тому в країнах НАТО, США ця технологія виводитися з виробництва. Інші тугоплавкі матеріали не можуть бути нанесені на поверхню виробів з водного розчину. Вони можуть осідати з розплавлених сольових розчинів, однак, при цьому має місце негативний вплив на сталевий підслой. В якості однієї з основних сучасних технологій нанесення тонкоплівкових зносостійких покриттів знайшли застосування процеси фізичного осадження покриттів з газової фази − PVD (physical vapor deposition), наприклад, високошвидкісне магнетронне напилення. Огляд фізичних ефектів, що виявляються в процесі PVD осадження покриттів, а також при подальших їх обробці і експлуатації, демонструє їх різноманітність, обумовлену як складністю самої системи, так і великим числом параметрів, які необхідно контролювати в різних методах синтезу [12; 13].

За хімічне осадження парів металів можливо отримати рівномірне покриття та гарну адгезію, однак, в даний час цей процес супроводжується областю температур, які негативно впливають на структурний стан і властивості металу підкладки.

Лазерне плакірування забезпечує добре взаємопроникнення матеріалу покриття і підкладки. Перспективним процесом нанесення захисних покриттів, що задовольняє зазначеним вище вимогам, є також технологія нанесення покриття вибухом. При цьому товстошарове покриття з відмінною адгезією може бути нанесено з великою швидкістю при незначному нагріванні пвдкладки.

Фахівцями КБ Південне розроблені і пройшли дослідно-промислову апробацію параметри технології фізичного осадження покриттів з газової фази (PVD) в вакуумі і обладнання для нанесення хромового покриття на поверхню каналу, що дозволяє істотно підвищити експлуатаційну стійкість стволів [8; 14; 15].

Основними завданнями досліджень, проведеними колективом авторів з метою створення промислової технології виробництва стволів з функціональним покриттям поверхні каналу, що забезпечують стволу при експлуатації ≥ 500 пострілів, є:

1 − досягнення в металі готової трубної заготовки перспективного рівня нормованих властивостей (що відповідає стандартам НАТО − табл.).

2 − розробка параметрів процесу фізичного осадження покриттів (хромового, танталового і ін.) з газової парової фази, конструктивно-технологічних параметрів обладнання для його здійснення;

3 – дослідження і вибір ефективного способу підготовки поверхні каналу ствола та відпрацювання його параметрів для забезпечення необхідної адгезії матеріалів, які напилюються;

4 − подрібнення розміру зерен структури металу ствола за рахунок деформаційно-термічної обробки і збільшення за рахунок цього протяжності границь зерен, що є одним з найважливіших факторів прискорення дифузійних процесів при нанесенні на поверхню металу шару покриття і поліпшення адгезії, а також для підвищення пластичності, ударної в'язкості металу ствола, зниження його чутливості до відпускної крихкості першого роду;

5 – дослідження і вибір способу фінішної обробки виробу з покриттям для зниження рівня залишкових напружень та позитивного впливу на структуру і властивості матеріалу покриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Наседкин В. И. Состояние и перспективы развития ствольной артиллерии 21 века / В. И. Наседкин // Проектирование систем и измерительных комплексов : матер. науч.-техн. конф. (9 июля 2004 г.) / ФГУП «Завод № 9», Екатеринбург. − Нижний Тагил : НТИ УГТУ-УПИ, 2004. − С. 67−69.

2. Хиро Адачи. Методы проектирования артиллерийского оружия, устойчивого против хрупкого разрушения / Адачи Хиро // Расчет конструкций на хрупкую прочность. − Москва : Машиностроение, 1977. − С. 259−343.

3. Ростовщиков В. А. Производство стальных труб на радиально-ковочных машинах фирмы GFM / В. А. Ростовщиков // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке. − 1994. − № 4. − Москва : Металлургия, 1994 − С. 99−101.

4. Дейнеко Л. М. Розробка наукових основ зміцнювальної термічної обробки сполучних деталей нафтогазопроводів і виробів спеціального призначення : дис. на здобуття наук. ступ. д. т. н. − Дніпро, 2000. − 26 с.

5. Анипко О. Б. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов послегарантийных сроков хранения / О. Б. Анипко, Ю. М. Бусяк // Академия ВВ МВД Украины. − 2010. − 129 с.

6. Анипко О. Б. Экспериментальное исследование живучести ствола гладкоствольной пушки / О. Б. Анипко, М. Д. Борисюк, Ю. М. Бусяк и др. // Моделювання процесів промислового обладнання. − 2011. − № 1. − С. 28−31.

7. Дейнеко Л. Н. Исследование факторов, влияющих на эксплуатационную стойкость специальных толстостенных труб / Л. Н. Дейнеко, В. Н. Надтока, В. И. Большаков, С. В. Проха // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов (ОТТОМ-8). − Том 1. − Харьков : ННЦ ХФТИ, ИПЦ Контраст, 2007. − С. 6−9.

8. Надтока В. Н. Разработка параметров комплексной технологии термической и ионно-плазменной обработки деталей специального назначения / В. Н. Надтока, Р. В. Панков, Л. Н. Дейнеко // New technologies and achievements in metallurgy and materials engeneering : XII International Scientific Conference. − Ч. 2. − Польша, Ченстохова. − 2011. − С. 414−418.

9. Lockaby J. “Over a Barrel” / J. Lockaby // ORNL-reporter. − № 42, October 2002. − Режим доступу : http://www.ornl.gov/info/reporter/no42/oct02.htm - barrel.

10. Woodley C. QinetiQ Studies on Wear and Erosion in Gun Barrels / C. Woodley, R. Critchley, D. Wallington // Tech Report RTO-MP-AVT-109, 01 JUN. − 2004. − QinetiQ, MOD Fort Halstead, United Kingdom. − Pp. 15-1–15-10.

11. Matson Dean W. Properties of Thick Sputtered Tantalum Used for Protective Gun Tube Coatings / Dean W. Matson, McClanahan, D. Edwin, Sabrina L. Lee // Tech Report ARCCB-TR-01019. − OCT 2001. − Benét Laboratories, Watervliet Arsenal, Watervliet NY. − P. 16.

12. Cote P. J. Lee. Application of Laser Pulse Heating to Simulate Thermomechanical Damage at Gun Bore Surfaces / Cote P. J. Lee S. L., Todaro M. E., Kendall G. // Tech Report ARCCB-TR-03002. − FEB 2003. − Benét Laboratories, Watervliet Arsenal, Watervliet NY. − P. 20.

13. Underwood J. H. Critical Fracture Processes in Army Cannons : A Review / J. H. Underwood, E. Troiano // Tech Report ARCCB-TR-03003, March 2003. − Benét Laboratories. − Watervliet Arsenal,Watervliet NY. − P. 20.

14. Надтока В. Н. Эрозия орудийных стволов / В. Н. Надтока // Артиллерийское и стрелковое вооружение. − Изд-во КБ «Артиллерийское вооужение», 2006. − № 4. − С. 16−22.

15. Надтока В. Н. Защитные покрытия для орудийных стволов / В. Н. Надтока. − Изд-во КБ «Артиллерийское вооружение», 2007. − № 1. − С. 34−42.

16. Томас Дж. Фазовые превращения и микроструктура сплавов с высокой прочностью и вязкостью разрушения. Возможности и ограничения их использования при разработке сплавов / Дж. Томас. // Проблемы разработки конструкционных сплавов. Под ред. Джаффи Р., Вилкокса Б. − Нью-Йорк, 1977. − Москва : Металлургия, 1980. − С. 178−203.

REFERENCES

1. Nasedkin V.I. *Sostoyanie i perspektivyi razvitiya stvolnoy artillerii 21 veka* [The state and prospects of development of the barrel artillery of the 21st century]. *Proektirovanie sistem i izmeritelnyih kompleksov : materialyi nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Design of systems and measuring systems : mater. scientific and technical conf.]. FGUP “Zavod no. 9”, Ekaterinburg, 9 July, 2004, NTI UGTU-UPI, Nijniy Tagil, 2004, pp. 67−69. (in Russian).

2. Adachi Hiro. *Metodyi proektirovaniya artilleriyskogo orujiya, ustoychivogo protiv hrupkogo razrusheniya* [Methods for designing artillery weapons resistant to brittle destruction]. *Raschet konstruktsiy na hrupkuyu prochnost* [Calculation of structures for brittle strength]. Moscow : Mashinostroenie Pibl., 1977, pp. 259−343. (in Russian).

3. Rostovschikov V.A. *Proizvodstvo stalnyih trub na radialno-kovochnyih mashinah firmyi GFM* [Production of steel pipes on radial forging machines from GFM]. *Chernaya metallurgiya Rossii i stran SNG v XXI veke* [Ferrous metallurgy of Russia and the CIS countries in the XXI century]. Moscow : Metallurgiya Publ., June 6−10, 1994, no. 4, pp. 99−101. (in Russian).

4. Deyneko L.M. *Rozrobka naukovih osnov zmitsnyuvalnoї termichnoї obrobki spoluchnih detaley naftogazoprovodiv i virobiv spetsialnogo priznachennya* [Розробка наукових основ зміцнювальної термічної обробки сполучних деталей нафтогазопроводів і виробів спеціального призначення]. *Dissertatsiya na zdobuttya naukovogo stupenya doctora tehnichnyh nauk* [Dissertation for obtaining a degree of D. Sc. (Tech.)]. Dnipropetrovsk, 2000, 26 p. (in Ukrainian).

5. Anipko O.B. and Busyak Yu.M. *Vnutrennya balistika stvolnyih sistem pri primenenii boepripasov poslegarantiynyih srokov hraneniya* [Internal ballistics of barrel systems when using ammunition of post-warranty storage periods]. Akademiya VV MVD Ukrainy, 2010, 129 p. (in Russian).

6. Anipko O.B., Borisyuk M.D., Busyak Yu.M. and oth. *Eksperimentalnoe issledovanie jivuchesti stvola gladkostvolnoy pushki* [Experimental study of the survivability of the barrel of a smooth-bore gun]. *Modelyuvannya protsesiv promislovogo obladnannya* [Modeling of industrial equipment processes]. 2011, no. 1, pp. 28−31. (in Russian).

7. Deyneko L.N.,Nadtoka V.N., Bolshakov V.I. and Proha S.V. *Issledovanie faktorov, vliyayuschih na ekspluatatsionnuyu stoykost spetsialnyih tolstostennyih trub* [Investigation of factors affecting the operational durability of special thick-walled pipes]. *Oborudovanie i tehnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov (OTTOM-8)* [Equipment and technologies for heat treatment of metals and alloys (OTTOM-8)]. Tom 1, Harkov : NNTS HFTI, IPTS Kontrast, 2007, pp. 6−9. (in Russian).

8. Nadtoka V.N., Pankov R.V. and Deyneko L.N. *Razrabotka parametrov kompleksnoy tehnologii termicheskoy i ionno-plazmennoy obrabotki detaley spetsialnogo naznacheniya* [Development of parameters for complex technology of thermal and ion-plasma processing of special-purpose parts]. New technologies and achievements in metallurgy and materials engeneering : XII International Scientific Conference, part 2, November 15, Polsha, Chenstohova, 2011, pp. 414−418. (in Russian).

9. Lockaby J. Over a Barrel. ORNL-reporter, No. 42, October 2002.

10. Woodley C., Critchley R. and Wallington D. QinetiQ Studies on Wear and Erosion in Gun Barrels. Tech Report RTO-MP-AVT-109, 01 JUN 2004, QinetiQ, MOD Fort Halstead, United Kingdom, pp. 15-1–15-10.

11. Matson Dean W., McClanahan Edwin D., Lee Sabrina L. and Windover Donald. Properties of Thick Sputtered Tantalum Used for Protective Gun Tube Coatings. Tech Report ARCCB-TR-01019, October, 2001, Benét Laboratories, Watervliet Arsenal, Watervliet NY, p. 16.

12. Cote P.J., Lee S.L., Todaro M.E. and Kendall G. Application of Laser Pulse Heating to Simulate Thermomechanical Damage at Gun Bore Surfaces. Tech Report ARCCB-TR-03002, February, 2003, Benét Laboratories, Watervliet Arsenal, Watervliet NY, p. 20.

13. Underwood J.H. and Troiano E. Critical Fracture Processes in Army Cannons : A Review. Tech Report ARCCB-TR-03003, March, 2003, Benét Laboratories, Watervliet Arsenal,Watervliet NY, p. 20.

14. Nadtoka V.N. *Eroziya orudiynyih stvolov* [Gun barrel erosion]. *Artilleriyskoe i strelkovoe voorujenie* [Artillery and small arms]. Izd-vo KB «Artilleriyskoe voorujenie», 2006, no. 4, pp. 16–22. (in Russian).

15. Nadtoka V.N. *Zaschitnyie pokryitiya dlya orudiynyih stvolov* [Sheeting for gun barrels]. *Artilleriyskoe i strelkovoe voorujenie* [Artillery and small arms]. Izd-vo KB «Artilleriyskoe voorujenie», 2007, no. 1, pp. 34–42. (in Russian).

16. Tomas Dj. *Fazovyie prevrascheniya i mikrostruktura splavov s vyisokoy prochnostyu i vyazkostyu razrusheniya. Vozmojnosti i ogranicheniya ih ispolzovaniya pri razrabotke splavov* [Phase transformations and microstructure of alloys with high strength and fracture toughness. Possibilities and limitations of their use in the development of alloys]. Problemyi razrabotki konstruktsionnyih splavov [Problems of development of structural alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., New-York, 1977, 1980, pp. 178–203. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. І. Большаковим (Україна), д-ром техн. наук, проф. Ю. І. Дубровим (Україна). Надійшла до редакції 05.03.2019. Прийнята до друку 09.03.2019.