

АФТАНАЗІВ ІВАН

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-3484-7966>e-mail: ivan.aftanaziv@gmail.com**ШЕВЧУК ЛІЛІЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: shev.lili2206@gmail.com**ТОПЧІЙ ВЛАДИСЛАВ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0009-2967-7967>e-mail: Vladyslav.i.topchii@lpnu.ua**СТРОГАН ОРІСЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-1790-6736>e-mail: orysia.i.strohan@lpnu.ua**СТРУТИНСЬКА ЛЕСЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-0401-5475>e-mail: lesia.r.strytynska@lpnu.ua

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СТВОЛІВ КРУПНОКАЛІБЕРНИХ ГАРМАТ ЇХ ЗМІЦНЕННЯМ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Наведено опис технології та реалізуючих її пристроїв для зміцнення поверхневим пластичним деформуванням внутрішньої поверхні каналу стволів артилерійських і танкових гармат. Рекомендовано зміцнювальну обробку проводити у два етапи - сталевими загартованими кульками проклепувати внутрішню робочу поверхню ствола, а у подальшому твердосплавними деформівними тілами із сплаву ВК6 нанести жаростійке твердосплавне покриття. Встановлено, що у результаті цієї зміцнювальної обробки у приповерхневій товщі матеріалу каналу ствола формуються залишкові напруження стиску, підвищується його поверхнева мікротвердість, підвищується опірність металу робочій поверхні ствола вигоранню та розтріскуванню. У сумарному це підвищує опір матеріалу каналу ствола його зношуванню під час гарматних пострілів.

Створена конструкція зміцнювального пристрою для здійснення цієї обробки. Він складається із циліндричного зміцнювача із деформівними тілами, електродвигуна приводу та механізму передачі крутного моменту від валу двигуна до зміцнювача. У процесі зміцнювальної обробки пристрій переміщають вздовж каналу ствола гармати, зміцнювач обкочується по оброблюваній внутрішній поверхні ствола, проклепує його матеріал. Забезпечувана товщина зміцнення 0,15-0,20 мм, товщина нанесеного твердосплавного покриття – до сотні мікрон.

Ключові слова: гармата, ствол, артилерія, твердий сплав, покриття, зношування, поверхнєве зміцнення, товщина зміцнення.

AFTANAZIV IVAN, SHEVCHUK LILIA, TOPCHII VLADYSLAV, STROHAN ORYCA, STRUTYNSKA LESYA
Lviv Polytechnic National University

INCREASING THE DURABILITY OF LARGE-CALIBER GUN BARRELS BY STRENGTHENING THEM BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION

A description of the technology and its implementing devices for strengthening the internal surface of the bore of artillery and tank guns by surface plastic deformation is given. It is recommended to carry out the strengthening treatment in two stages - to rivet the inner working surface of the barrel with hardened steel balls, and then to apply a heat-resistant hard alloy coating with hard alloy deformable bodies made of the VK6 alloy.

It was established that as a result of this strengthening treatment, residual compressive stresses are formed in the near-surface layer of the borehole material, its surface microhardness increases, and the resistance of the metal of the working surface of the barrel to burnout and cracking increases. In total, this increases the resistance of the barrel material to its wear during cannon shots.

The design of the strengthening device for this treatment was created. It consists of a cylindrical stiffener with deformable bodies, an electric drive motor and a torque transmission mechanism from the motor shaft to the stiffener. In the process of strengthening treatment, the device is moved along the channel of the gun barrel, the strengthener rolls over the processed inner surface of the barrel, and rivets its material. The provided strengthening thickness is 0.15-0.20 mm, the thickness of the applied hard alloy coating is up to a hundred microns.

Proposed designs of stiffeners for two-stage strengthening treatment by the method of vibration-centrifugal strengthening of the bores of large-caliber artillery guns. The proposed strengthening spaces behind the structural drilling are energy-saving, and do not provide for the maintenance of highly qualified service personnel.

Key words: gun, barrel, artillery, hard alloy, coating, wear, surface strengthening, thickness of strengthening.

Вступ

Під час кожного із пострілів гармати поверхневі прошарки металу каналу її ствола піддаються активному руйнівному впливу високих (до 1000⁰ С) температур, хімічній дії порохових газів, надвисоких тисків та механічному зношуванню від переміщення по стволу снаряду. Це зумовлює руйнування структури, міцності та щільності металу поверхневих прошарків, його випалювання та зношування, що в кінцевому,

приводить до порушень геометрії робочої поверхні каналу ствола. Порушення геометрії робочої поверхні каналу ствола гармати негативно впливає на дальність, а головне, точність прицільної стрільби та інших пов'язаних із точністю тактико-технічних характеристик гарматного озброєння. Надмірно зношена внутрішня робоча поверхня каналу ствола ремонту та відновленню практично не підлягає. Це і обумовлює наявність для гарматного озброєння такої характеристики як допустима кількість пострілів прицільної стрільби, яка певною мірою обмежує тривалість ефективного використання гармат.

Аналіз літературних даних и постановка проблеми

Аналіз технологічних процесів формоутворення моноблокових гарматних стволів та лейнерів (змінних труб) багатошарових стволів, а також технологічних операцій їх подальшої механообробки засвідчує, що всі вони, в кінцевому, формують у товщі приповерхневих прошарків матеріалу каналу ствола напруження розтягу. Високотемпературні нагріви при пострілах, супроводжуючі їх тиски до декількох тисяч атмосфер теж спрямовані на розрив і намагання збільшити діаметр каналу ствола. Отже експлуатаційні навантаження теж додатково формують у приповерхневих прошарках матеріалу експлуатаційні напруження розтягу. Просумовуючись між собою технологічні та експлуатаційні напруження розтягу сягають доволі високого градієнту. Наведені напруження спрямовані на розрив міжмолекулярних зв'язків матеріалу на поверхні каналу стволів, на формування мікротріщин у приповерхневій товщі металу. Як наслідок - мікроскопічні шматки металу відшаровуються від робочої поверхні каналу ствола і згоряють у полум'ї та високотемпературних порохових газах. У результаті цього порушується геометрія каналу ствола, погіршується точність прицільної стрільби.

Враховуючи це конструктори та розробники намагаються досягнути покращення експлуатаційних властивостей деталей та вузлів технологічними методами [1, 2]. Досягають цього за рахунок технологічного покращення характеристик найбільш навантажених поверхневих прошарків матеріалу деталей, зокрема їх шорсткості, поверхневої мікротвердості, формування спроможного протистояти експлуатаційним навантаженням напруженого стану матеріалу тощо [3, 4]. Так у роботі [2] досліджено можливість підвищення опору зношуванню внутрішньої поверхні гільз бурильних pomp завдяки їх зміцненню поверхневим пластичним деформуванням. Цим досягнуто до 25 %, підвищення зносостійкості матеріалу pomp. Однак, для каналів стволів гармат не є характерним абразивне зношування. Тому результати цих досліджень не можуть бути використаними без належного доопрацювання для підвищення довговічності гарматних стволів.

Суттєво підвищити опір матеріалу каналу ствола експлуатаційному зношуванню могло б запровадження до технологічного процесу виготовлення стволів гармат зміцнювальних операцій, що забезпечували б формування у зовнішніх прошарках матеріалу каналу ствола стискаючих напружень [5–7].

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка технології та реалізуючого її обладнання для зміцнення поверхневим пластичним деформуванням внутрішніх каналів крупнокаліберних гарматних стволів для підвищення їх міцнісних характеристик, надійності та довговічності.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних задач:

- аналіз експлуатаційних навантажень, що діють на матеріал каналу ствола гармати при стрільбі;
- розробка конструктивних схем нового зміцнювального технологічного обладнання, придатного для ефективною зміцнювальною обробки каналу стволів крупнокаліберних гармат.

Основні результати дослідження

Зміцнення поверхневим пластичним деформуванням внутрішньої поверхні стволів артилерійських гармат у відповідності запропонованій технології вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробки здійснюють наступним чином. Зміцнювальний пристрій, до складу якого входять електропривід 1, циліндричний зміцнювач 2 із розміщеними з можливістю обертання на зовнішній його поверхні деформівними тілами 3 у вигляді сталевих загартованих кульок або твердосплавних деформівних тіл спеціальної конфігурації розташовують всередині оброблюваного ствола 4 гармати. Електропривід 1 та циліндричний зміцнювач 2 з'єднані між собою механізмом 5 передачі крутного моменту та обертового руху. Особливістю механізму 5 передачі обертового руху в даному пристрої є те, що окрім передачі крутного моменту на зміцнювач 2 із деформівними тілами 3 він забезпечує і радіальне переміщення зміцнювача відносно геометричної осі ствола гармати 4. Для цього у якості механізму передачі крутного моменту та обертового руху використовують або карданний, або гнучкий вал (рис. 1).

При подачі напруги живлення на електродвигун приводу 1 крутний момент від його валу через механізм 5 передачі обертового руху (карданний або гнучкий вал) передається зміцнювачу, який набуває при цьому обертового руху із частотою, рівною частоті обертання валу електроприводу 1.

На рисунку напрями переміщення та обертання зміцнювача 2 вказано стрілками. Оскільки зміцнювач 2 із деформівними тілами 3 виконано із ексцентричним зміщенням його центру маси та осі обертання відносно геометричної осі оброблюваної поверхні, зміцнювач під дією переданого йому крутного моменту самовтягується у режим планетарного обкочувального руху його зовнішньою циліндричною поверхнею по внутрішній оброблюваній поверхні ствола 4 гармати.

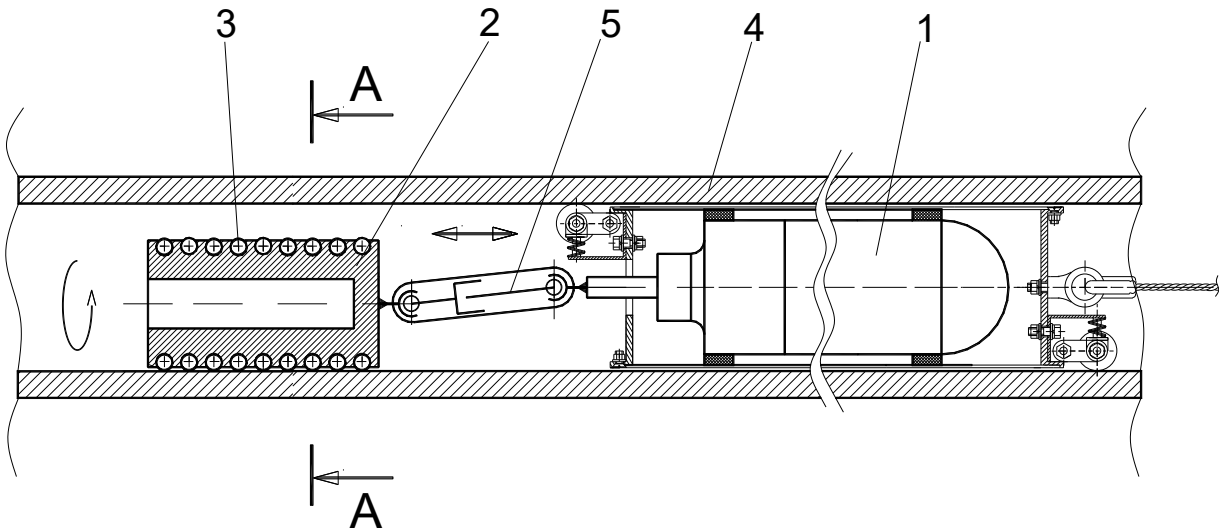


Рис. 1. Пристрій для зміцнення каналу ствола гармати
Джерело: розроблено авторами

Для забезпечення цього робочого обкочувального руху та належної якості зміцнювальної обробки геометричні розміри та параметри руху зміцнювача обирають із залежності (рис. 2)

$$\varepsilon = \frac{\sigma_m \cdot d^2 \cdot l}{50 \cdot m \cdot D \cdot n^2}, \tag{1}$$

де ε – ексцентриситет зміщення центру маси зміцнювача 2 відносно геометричної осі оброблюваної поверхні ствола 4 гармати;

n – частота обкочування зміцнювача 2 по внутрішній поверхні ствола 4 гармати;

σ_m – межа текучості матеріалу зміцнюваного ствола 4 гармати;

m – маса зміцнювача 2 із деформівними тілами 3;

d – діаметр відбитка на оброблюваній поверхні від ударного контакту деформівного тіла із стволом 4 гармати;

N – кількість деформівних тіл 3, розміщених вздовж твірної зміцнювача 2;

D – діаметр сферичних деформівних тіл;

l – довжина твірної зовнішньої циліндричної поверхні зміцнювача, на якій встановлено деформівні тіла.

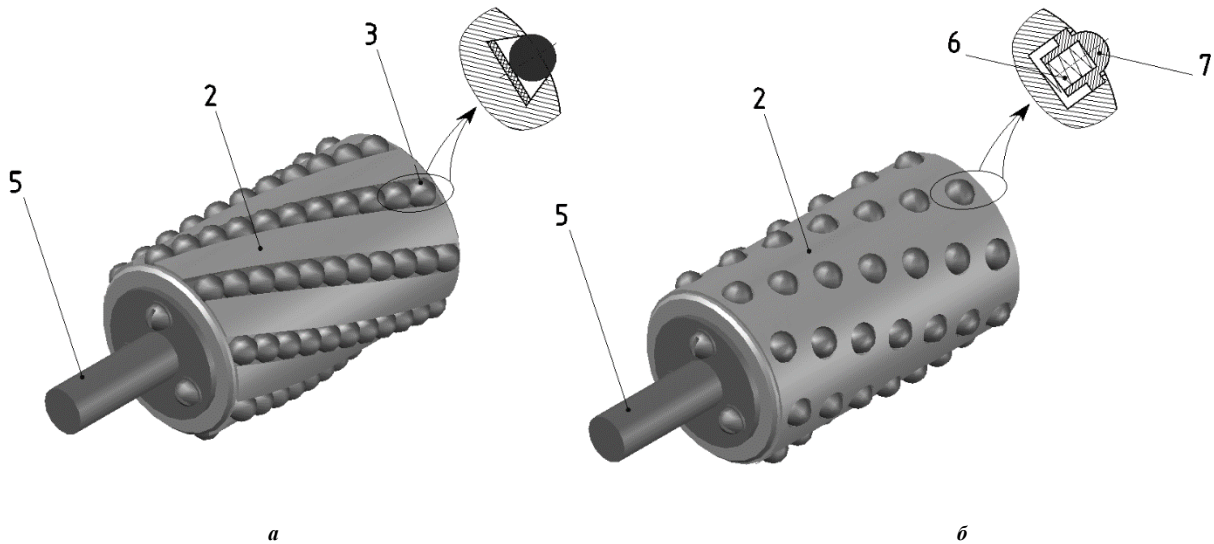


Рис. 2. Зміцнювач внутрішньої поверхні ствола гармати із:
а) деформівними тілами у вигляді сталевих загартованих кульок;
б) твёрдосплавними деформівними тілами (номери позицій запезичено із рис. 1).
Джерело: розроблено авторами

При обкочувальному русі зміцнювача по внутрішній оброблювальній поверхні ствола 4 гармати на зміцнювач діє відцентрова сила F , обертовий вектор дії якої направлений від центра маси зміцнювача і проходить перпендикулярно геометричним осям зміцнювача і оброблюваної поверхні (рис. 1). На рисунку напрям дії відцентрової сили відображено стрілкою із буквеним позначенням F .

Величина цієї відцентрової сили F пропорційна масі m та ексцентриситету ε зміцнювача і квадрату кругової частоти n його обкочувального руху та визначається із залежності

$$F = m \cdot \varepsilon \cdot \omega^2,$$

де $\omega = 2\pi n$ – кругова частота обкочувального руху зм'ягача.

У будь-який проміжок часу зм'ягач контактує із оброблюваною поверхнею ствола 4 через деформівні тіла 3, наприклад сталеві загартовані кульки, розміщені вздовж твірної циліндричної зовнішньої поверхні зм'ягача. Контакт із черговою групою деформівних тіл, розміщених вздовж твірної зм'ягача, відбувається з ударною взаємодією.

Обкочувальний рух зм'ягача 2 по внутрішній оброблюваній поверхні ствола 4 гармати здійснюють одночасно із рівномірним переміщенням зм'ягачального пристрою вздовж твірної зм'ягаченої поверхні та осі ствола. Тим самим забезпечується рівномірність зм'ягання оброблюваної поверхні і по довжині кола її перерізу, і по довжині твірної. У випадку потреби збільшення товщини залягання зм'ягаченого прошарку матеріалу на оброблюваній поверхні використовують повторні переміщення зм'ягачального пристрою вздовж осі ствола 4 або нарощують масу зм'ягача 2.

Після завершення першого етапу зм'ягачальної обробки внутрішньої поверхні ствола 4 гармати від двигуна електроприводу 2 від'єднують циліндричний зм'ягач 2 із сферичними сталевими загартованими деформівними тілами 3 і приєднують аналогічний зм'ягач із підпружиненими пружними елементами 6 твердосплавними деформівними тілами 7 (рис. 2,б). Другий етап зм'ягачальної обробки із використанням твердосплавних деформівних тіл 7 проводять аналогічно першому.

При цьому в місцях ударного контакту твердосплавних деформівних тіл 7 із уже зм'ягаченою внутрішньою поверхнею ствола 4 гармати, завдяки переносу мікрочасток порошкоподібного твердого сплаву, із якого виготовлені ці деформівні тіла, відбувається на молекулярному рівні перенесення блоків молекул твердого сплаву в западини шорсткості поверхневого шару металу оброблюваного ствола. Оскільки циліндричний зм'ягач 2 обкочується по внутрішній поверхні ствола 4 із частотою, рівною частоті обертання вала електродвигуна приводу 1, переважно рівною 16 або 24 Гц, то у кожен секунду часу кожен із декількох сотень облаштованих на зм'ягачі 2 твердосплавних деформівних тіл наносить 16 або 24 удари по оброблюваній поверхні ствола. Так як кожен удар деформівного тіла 7 супроводжується переносом на оброблювану поверхню мікрочасток твердого сплаву, то оброблювана внутрішня поверхня ствола 4 гармати вкривається рівномірним шаром втвоченого у нерівності поверхневого прошарку металу ствола твердого сплаву. Більше того, кожен наступний удар по вже нанесеній на метал ствола мікрочастинці твердого сплаву не тільки додає свою чергову частку матеріалу, а і «втвочає» в нерівності поверхні попередні твердосплавні мікрочастинки. Завдяки вклепуванню твердосплавних мікрочастинок у нерівності шорсткості поверхні ствола таке твердосплавне покриття не відшаровується від товщі основного матеріалу, з'єднуючись з ним на рівні мікрозварювання. Оскільки у процесі обробки зм'ягач 2 із твердосплавними деформівними тілами 7 переміщається вздовж геометричної осі зм'ягаченого ствола 4, уся внутрішня поверхня ствола вкривається рівномірним тонким шаром твердосплавного покриття товщиною у декілька десятків мікрон. Не зважаючи на незначну товщину такого твердосплавного покриття внутрішньої поверхні ствола гармати, завдяки високій температурі плавлення це покриття надійно протистоятиме вигоранню мікрочасток металу ствола при пострілах гармати.

У технологічному процесі виготовлення ствола гармати дана двоетапна зм'ягачальна обробка є завершальною фінішною операцією.

У якості прикладу реалізації запропонованого способу приведено параметри зм'ягачальної обробки та геометричні розрізи зм'ягача для зм'ягачальної обробки циліндричної деталі із діаметром внутрішньої поверхні $D_6 = 122$ мм та довжиною твірної 100 см із легованої конструкційної сталі марки 12ХН3А із межею текучості матеріалу $\sigma_m = 750$ МПа. Належна для забезпечення товщина зм'ягаченого шару в товщині металу оброблюваної поверхні $h = 0,15 \div 0,20$ мм.

При поверхневому пластичному деформуванні сталевих деталей сферичними деформівними тілами товщина залягання зм'ягаченого шару металу корегується із діаметром відбитків на оброблюваній поверхні залежністю $d = 2h$. Отже діаметр належного для забезпечення заданої товщини зм'ягання відбитку

$$d = 2 \cdot 0,2 = 0,4 \text{ мм.}$$

Призначають геометричні параметри зм'ягача та параметри обробки:

$D = 10$ мм – діаметр деформівних тіл (сталевих загартованих кульок);

$l = 0,5$ м – довжина зм'ягача;

$m = 30$ кг – маса зм'ягача із деформівними тілами;

$N = 50$ – кількість деформівних тіл вздовж твірної зм'ягача;

$n = 940$ об/хв. = 16 1/с - частота обертання вала двигуна електроприводу.

Підставляють числові значення у залежність (1) для визначення ексцентриситету зм'ягача

$$\varepsilon = \frac{\sigma_m \cdot d^2 \cdot l}{50 \cdot m \cdot D \cdot n^2} = \frac{750 \cdot 10^6 \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5}{50 \cdot 30 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 16^2} = 15,6 \text{ мм}$$

Таким чином, визначено основний геометричний параметр зм'ягача, дотримання якого забезпечить якісне зм'ягання внутрішньої поверхні ствола гармати запропонованим способом.

Другий етап зм'ягачальної обробки, у відповідності даній корисній моделі, здійснювали при використанні твердосплавних деформівних тіл із сплаву ВК6, сформованих методом спікання. Конфігурація твердосплавних деформівних тіл і їх розташування на зм'ягачі 2 відображена на рис.2,б. Діаметр їх сферичної ударної частини становив $D = 10$ мм. Зм'ягачальну обробку твердосплавними деформівними

тілами, з метою нанесення на зміцнену сталевими загартованими кульками внутрішню поверхню циліндричного зразка твердосплавного покриття, проводили у три почергові проходи вздовж твірної даного циліндричного зразка довжиною 100 см.

Заміри товщини залягання зміцненого шару на внутрішній поверхні циліндричного зразка після його зміцнення сталевими загартованими кульками проводили на вирізаних із зміцненої деталі кільцевих зразках на приладі вимірів мікротвердості металу моделі ПМТ-3. Залежно від основних технологічних параметрів зміцнювальної обробки сталевими загартованими кульками, а саме маси зміцнювача, частоти його обкочувального руху по внутрішній поверхні ствола, швидкості переміщення зміцнювача вздовж твірної загартованої поверхні та кількості повторних переходів, глибина зміцнення змінювалась в діапазоні 0,1–0,2 мм.

Товщину нанесеного твердосплавними деформівними тілами покриття твердим сплавом ВК6 виміряли на шліфах оброблених зміцненням зразків, використовуючи мікроскоп моделі Nikon E200 із 100-кратним збільшенням. Залежно від вище вказаних технологічних параметрів вона змінювалась в діапазоні від декількох десятків до сотні мікрон.

Порівняльну перевірку ефективності запропонованого способу поетапного зміцнення внутрішньої поверхні циліндричних деталей здійснювали на підставі даних досліджень зміцнених зразків на зношування, проведених на експериментальній установці визначення опірності матеріалів до зношування. Дана установка виконана по схемі стандартизованої установки дослідження зношуваності матеріалів типу Pin-on-Disk Test (ASTM G99). Її стандартизована методика передбачає вимірювання зношування між двома поверхнями, одна з яких є поверхнею випробовуваного зразка, а інша – поверхня обертового диску. Порівнювали зношуваність трьох груп зразків, а саме вихідних незміцнених зразків із легованої конструкційної сталі марки 12ХНЗА, яка за своїми характеристиками наближена до матеріалу гарматних стволів, аналогічних зразків, підданих зміцнювальній обробці сталевими сферичними деформівними тілами та аналогічних зразків, підданих двоетапній зміцнювальній обробці сталевими та твердосплавними деформівними тілами. Випробуванням зразків усіх вище означених груп передувало їх обдування полум'ям газової горілки впродовж 5 хвилин з метою імітації впливу на метал гарматних стволів дії полум'я та порохових газів, що супроводжують постріли гармати.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що зносостійкість зміцнених сталевими загартованими деформівними тілами зразків, поверхня яких піддавалась високотемпературній обробці, на 35–40% перевищує зносостійкість незміцнених аналогічних зразків. При цьому встановлено, що зносостійкість зміцнених поетапно сталевими загартованими та твердосплавними деформівними тілами досліджуваних зразків на 25–30% перевищує зносостійкість зразків, зміцнених лише сталевими деформівними тілами. У загальному, із порівняння зносостійкості незміцнених зразків та зміцнених поетапно сталевими загартованими та твердосплавними деформівними тілами, слідує, що двоетапна зміцнювальна обробка спроможна на 60–70% підвищити зносостійкість сталевих деталей, загалом, і матеріалу гарматних стволів, зокрема. Звичайно, якщо враховувати весь комплекс діючих на метал гарматних стволів негативних чинників, наприклад поєднання високих температур із величезними тисками, що супроводжують гарматний постріл, ефект від зміцнювальної обробки буде суттєво понижено. Та все ж завдяки двоетапному зміцненню із завершальним формуванням на внутрішній робочій поверхні ствола гармати твердосплавного покриття правомірно сподіватись збільшення довговічності гарматних стволів відсотків на 20–25%. Істинну величину змін довговічності стволів крупнокаліберних гармат, зміцнених почергово сталевими загартованими та твердосплавними деформівними тілами, можливо встановити лише на підставі даних так званих натурних стендових або польових стрільбових випробувань.

Перевагою способу підвищення довговічності стволів артилерійських гармат у відповідності запропонованій корисній моделі є те, що забезпечуване ним твердосплавне покриття внутрішньої поверхні ствола гармати може суттєво підвищити жаростійкість її матеріалу в умовах високотемпературної експлуатації. Наявність забезпеченого запропонованим способом нанесення твердосплавного покриття позитивно проявить себе у наступних аспектах:

- сформує так званий термічний бар'єр - перешкоду, що понижує передачу тепла до основної товщі металу ствола, що сприятиме пониженню перегріву металу ствола і обумовленого ним пониження міцності;
- підвищить опір металу окисненню та корозії – сформований твердосплавний захисний прошарок металу стійкий до хімічних впливів та понижує швидкість окиснення матеріалу, а відповідно, і його корозії;
- захистить структуру поверхневого шару металу, покращуючи його опір деформації та розтріскуванню під впливом високих температур.

Висновки

1. Створено принципово новий метод вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки, що належить до групи методів поверхневого пластичного деформування і відрізняється забезпеченням значного рівня енергії деформування матеріалу зміцнюваних деталей. Метод належить до групи методів динамічного поверхневого зміцнення, забезпечує товщини зміцненого шару матеріалу сталевих деталей $0,15 \div 0,20$ мм на внутрішніх поверхнях циліндричних довгомірних деталей. Завдяки значній енергії ударної взаємодії інструмента з матеріалом оброблюваної деталі в поверхневих її прошарках формуються залишкові напруження стиску значного градієнту. Як наслідок, це підвищує міцність та надійність зміцнених деталей.

2. Вперше запропоновані конструкції зміцнювачів для двоетапної зміцнювальної обробки методом

вібраційно-відцентрового зміцнення каналів стволів крупнокаліберних артилерійських гармат. Запропоновані зміцнювачі прості за конструктивною бурою, енергоощадні, не передбачають для обслуговування висококваліфікованого обслуговуючого персоналу.

3. Зміцнення на завершальному другому етапі внутрішньої поверхні гарматних стволів твердосплавними деформівними тілами із сплаву ВК6 забезпечує підвищення жаростійкості матеріалу ствола, його опір високотемпературним нагріванням при пострілах.

Література

1. Кусий Я.М., Кук А.М. Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення для технічного забезпечення безвідмовності деталей машин. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 1/7(73) 2015, С. 41-51. doi: [10.15587/1729-4061.2015.36336](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36336)

2. Широков В.В., Кусий Я.М., Афтаназів І.С., Боровець В.М., Кук А.М. Розроблення технологічного оснащення для покращення експлуатаційних характеристик деталей нафтогазового обладнання : матер. Х конф. с междун. Участием. Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях. сгт Славское, Карпаты, 2010. С. 243-246. DOI: [10.15587/1729-4061.2015.36336](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36336)

3. Кусий Я.М., Топільницький В.Г. Дослідження якості поверхні віброзміцнених деталей машин. Вісник національного університету «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні й приладобудуванні». 2013. № 772. С. 196-201.

4. Kusyj J., Topilnitskiyy V. Calculatoions of vibratory-centrifugal strengthening treatment's dynamics by means of application software. Book of abstracts XVII Polish-Ukrainian Conference on "CAD in Machinery Design-Implementatation and Educational Problems", 2009. P. 25-26. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.3767>

5. Патент № 116265 Україна, МПК В24В 39/04 (2006.01), В23Р 9/04 (2006.01) Пристрій для зміцнення торсіонних валів поверхневим пластичним деформуванням. Афтаназів І.С., Шевчук Л.І. а201602854 Заявл. 21.03.2016; Опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4.

6. Патент № 116268 Україна, МПК В24В 39/02 (2006.01), В23Р 9/04 (2006.01) Пристрій для зміцнення поверхневим пластичним деформуванням внутрішніх циліндричних поверхонь довгомірних деталей. Афтаназів І.С., Шевчук Л.І. а201603003 Заявл. 23.02.2016; Опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4.

7. Патент № 116266 Україна, МПК В24В 39/04 (2006.01), В23Р 9/04 (2006.01) Спосіб зміцнення поверхневим пластичним деформуванням внутрішніх поверхонь стволів артилерійських гармат. Афтаназів І.С., Шевчук Л.І. а201602855 Заявл. 21.03.2016; Опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4.

References

1. Kusi Ya.M., Kuk A.M. Rozroblennia metodu vibratsiino-vidtsentorovorho zmitsnennia dlia tekhnichnoho zabezpechennia bezvidmovnosti detalei mashyn. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal передovыkh tekhnolohiyi, 1/7(73) 2015, S. 41-51. doi: 10.15587/1729-4061.2015.36336

2. Shyrokov V.V., Kusi Ya.M., Aftanaziv I.S., Borovets V.M., Kuk A.M. Rozroblennia tekhnolohichnoho osnashchennia dlia pokrashchennia ekspluatatsiinykh kharakterystyk detalei naftohazovoho obladnannia : mater. Kh konf. s mezhdun. Uchastyem. Effektyvnost realizatsyy nauchnoho, resursnoho u promyshlennoho potentsyala v sovremennykh uslovyakh. sht Slavskoe, Karpaty, 2010. S. 243-246. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36336

3. Kusi Ya.M., Topilnytskyi V.H. Doslidzhennia yakosti poverkhni vibrozsmishchennykh detalei mashyn. Visnyk natsionalnoho univertsytetu «Lvivska politekhnika» «Optymizatsiia vyrobnychykh protsesiv i tekhnichnyi kontrol u mashynobuduvanni y prykladobuduvanni». 2013. № 772. S. 196-201.

4. Kusyj J., Topilnitskiyy V. Calculatoions of vibratory-centrifugal strengthening treatments dynamics by means of application software. Book of abstracts XVII Polish-Ukrainian Conference on "CAD in Machinery Design-Implementatation and Educational Problems", 2009. P. 25-26. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.3767>

5. Patent № 116265 Ukraina, MPK V24V 39/04 (2006.01), V23R 9/04 (2006.01) Prystrii dlia zmitsnennia torsionnykh valiv poverkhnevym plastychnym deformuvanniam. Aftanaziv I.S., Shevchuk L.I. a201602854 Zaiavl. 21.03.2016; Opubl. 26.02.2018, Biul. № 4.

6. Patent № 116268 Ukraina, MPK V24V 39/02 (2006.01), V23R 9/04 (2006.01) Prystrii dlia zmitsnennia poverkhnevym plastychnym deformuvanniam vnutrishnykh tsylindrychnykh poverkhon dovhomirnykh detalei. Aftanaziv I.S., Shevchuk L.I. a201603003 Zaiavl. 23.02.2016; Opubl. 26.02.2018, Biul. № 4.

7. Patent № 116266 Ukraina, MPK V24V 39/04 (2006.01), V23R 9/04 (2006.01) Sposib zmitsnennia poverkhnevym plastychnym deformuvanniam vnutrishnykh poverkhon stvoliv artyleriyskykh harmat. Aftanaziv I.S., Shevchuk L.I. a201602855 Zaiavl. 21.03.2016; Opubl. 26.02.2018, Biul. № 4.