

# Підвищення довговічності гарматних стволів зміцненням ППД їх внутрішніх поверхонь

І.С. Афтаназів<sup>1</sup> • Л.І. Шевчук<sup>1</sup> • О.І. Строган<sup>1</sup> • Л.Р. Струтинська<sup>1</sup>

Received: 30 September 2021 / Accepted: 24 November 2021

**Анотація.** Супроводжуючі гарматні постріли хімічна дія порохів газів та високі температури активно руйнують поверхневий шар матеріалу каналу ствола. Це призводить до порушення геометрії каналу ствола і, як наслідок, пониження точності прицільної стрільби гармати. Приведено опис принципово нової технології зміцнення поверхневим пластичним деформуванням внутрішньої робочої поверхні каналу стволів крупнокаліберних артилерійських і танкових гармат. Ця зміцнювальна технологія базується на проклепуванні металу каналу ствола деформівними тілами із сферичною ударною поверхнею, які встановлені на масивному циліндричному зміцнювачі. Циліндричному зміцнювачу в процесі обробки від електродвигуна приводу надають планетарного обкочувального руху по оброблюваній внутрішній поверхні каналу ствола. Одночасно зміцнювач переміщають вздовж геометричної осі оброблюваного ствола гармати. Результатом цієї зміцнювальної обробки є формування у товщі матеріалу каналу ствола залишкових напружень стиску, підвищення його поверхневої мікротвердості. Це забезпечує підвищення опору матеріалу каналу ствола його вигоранню, а також зношуванню під час гарматних пострілів. Створена конструкція зміцнювального пристрою для здійснення цієї обробки. Він складається із циліндричного зміцнювача із деформівними тілами, механізму передачі крутного моменту від валу двигуна до зміцнювача та електродвигуна приводу. Під час обробки зміцнювальний пристрій переміщається вздовж каналу ствола гармати. Його циліндричний зміцнювач обкочується по оброблюваній внутрішній поверхні ствола та проклепує його матеріал. Забезпечується товщина зміцнення сталевих деталей 0,15–0,20 мм.

Сформований у процесі обробки зміцнений поверхневий шар матеріалу каналу ствола гармати володіє підвищеною мікротвердістю, завдяки чому надійно протистоять формуванню в ньому експлуатаційних мікротріщин. При цьому сформовані в товщі зміцненого металу каналу ствола напруження стиску надійно протистоять температурному розростанню мікротріщин. Це забезпечує підвищення опору зміцненого металу ствола експлуатаційному руйнуванню, завдяки чому підвищуються надійність та довговічність вартісного артилерійського озброєння.

**Ключові слова:** ствол, гармата, артилерія, канал ствола, матеріал, зношування, поверхнєве зміцнення, залишкові напруження, товщина зміцнення.

## Вступ

Гарматні стволи артилерійського озброєння, як і системи наведення точності пострілів, були і залишаються найбільш відповідальними складовими, що відображають спроможність гармат у забезпеченні покладених на них тактико-технічних дій. Саме ці елементи гармат спроможні не тільки забезпечити точність та віддаленість прицільного пострілу, а регламентувати

довговічність гармати у цілому. Переважно обумовлено це тим, що при кожному пострілі стволи гармат зазнають певного руйнівного впливу. Умовно обумовлюючи зношування стволів гармат причини можна розділити на три основні чинники, а саме механічне, хімічне та термічне руйнування матеріалу внутрішніх робочих поверхонь стволів.

Адже кожен постріл гармати супроводжується руйнівним впливом на поверхневі прошарки металу ствола зношування від переміщення по стволу снаряду, хімічної дії порохів газів та надвисоких тисків, а переважно – миттєвих сплесків високих (до 1000 °С) температур. Вагомо при цьому, що усе це відбувається практично миттєво, нашаровуючи ці руйнівні впливи один на іншого. У кінцевому це зумовлює руйнування

✉ І.С. Афтаназів  
ivan.aftanaziv@gmail.com

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

щільності та структури металу поверхневих прошарків, і як наслідок – його міцності. Частинки металу відшаровуються від його товщі і згорають у полум'ї, що передує утворенню порохових газів. У результаті цих процесів та явищ, що супроводжуються випалюванням та зношуванням матеріалу робочих поверхонь ствола, порушується геометрія його робочої поверхні каналу. Зрозуміло, що порушення геометрії поверхні каналу ствола гармати має негативний вплив на дальність, а також точність прицільної стрільби. Із втратою належної точності стрільби погіршуються тактико-технічні характеристики гарматного озброєння.

На жаль надмірно зношена робоча поверхня каналу ствола відновленню та ремонту практично не підлягає. Саме це і обумовлює наявність для артилерійського озброєння такої важливої характеристики якою є допустима кількість пострілів прицільної стрільби. Цей параметр певною мірою і обмежує тривалість “життєвого циклу” гармат, тобто періоду їх ефективного використання.

Технологічні процеси формування як лейнерів, тобто змінних труб багатошарових гарматних стволів, так і моноблокових стволів, формують переважно у товщі прошарків матеріалу каналу ствола напруження розтягу. Аналогічний напружений стан у матеріалі формують і переважна більшість технологічних операцій подальшої механообробки поверхонь каналу стволів. Високі до декількох тисяч атмосфер тиски у поєднанні із високотемпературними нагрівками при пострілах, теж спрямовані на розрив металу і намагання збільшити діаметр каналу ствола. Тобто експлуатаційні навантаження теж формують у приповерхневих прошарках матеріалу робочої поверхні ствола експлуатаційні напруження розтягу. Як наслідок, просумовуючись між собою експлуатаційні та технологічні напруження розтягу набувають доволі високого градієнту. Усі ці наведені напруження спрямовані на формування мікротріщин у приповерхневій товщі металу, на руйнування міжмолекулярних зв'язків матеріалу на поверхні каналу стволів. При повторних пострілах мікротріщини збільшуються у своїх розмірах, розростаються. При згорянні чергового заряду, високотемпературні димові гази, проникаючи у тріщини, випалюють в них метал, чим ще більше розширюють їх. У результаті мікроскопічні шматки металу по мірі збільшення кількості пострілів відшаровуються від робочої поверхні каналу ствола і згорають у високотемпературних порохових газах та полум'ї. При цьому не тільки порушується геометрія каналу ствола, а і погіршується точність прицільної стрільби.

Саме тому актуальними залишаються наукові дослідження, що спрямовані на створення інноваційних технологій підвищення довговічності та надійності артилерійського озброєння. Зокрема нових технологічних процесів, що спрямовані на підвищення опору матеріалу стволів гармат експлуатаційним наванта-

женням, які проявляються під час пострілів. Один із таких можливих напрямів досліджень – це розроблення технологій, що спрямовані на підвищення міцнісних характеристик поверхневого шару матеріалу каналу ствола.

## 1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Багатовіковий досвід виготовлення гармат та використання для їх виготовлення високоякісні леговані жаростійкі сталі на сьогодні практично вичерпали наявні технологічні можливості стосовно підвищення довговічності стволів гармат. У сьогоднішній практиці вичерпані резерви матеріалу стволів гармат щодо його протистояння високотемпературному зношуванню. Недостатньо ефективними виявилися і спроби нанесення на робочі внутрішні поверхні ствола гармати спеціальних зносостійких покриттів. Хімічна дія порохових газів та високотемпературне полум'я пострілу роз'їдають і спалюють тонку плівку типових традиційних покриттів, тобто руйнують її. Руйнація робочої поверхні ствола після цього відбувається ще із більш пришвидшеними темпами.

Доволі розповсюдженою практикою машинобудування є те, що коли міцнісні характеристики та можливості використовуваних матеріалів практично вичерпано, конструктори та розробники звертають свої погляди у бік технологічних резервів покращення експлуатаційних властивостей деталей та вузлів [1, 2].

Переважно цього досягають завдяки технологічному покращенню характеристик найбільш навантажених поверхневих прошарків матеріалу деталей. Зокрема їх поверхневій мікротвердості, шорсткості, забезпеченню спроможного протистояти сформованому експлуатаційними навантаженнями напруженому стану матеріалу тощо. Це підтверджує досвід виготовлення із споріднених з матеріалом стволів гармат марок сталі відповідальних деталей. У роботі [1] наведено переконливий приклад такого вдалого технологічного рішення у підході до проблеми підвищення зносостійкості та довговічності важконавантажених сталевих деталей бурового обладнання. Тут розглянуто можливість суттєвого підвищення опору зношуванню внутрішньої поверхні гільз бурильних pomp у наслідок їх зміцнення ППД (поверхневим пластичним деформуванням) [2]. Завдяки цьому на 25 %, підвищено зносостійкість сталевих гільз pomp для подачі у свердловину глиняної пульпи. Проте каналам гарматних стволів не є притаманне абразивне зношування. Тому для підвищення довговічності гарматних стволів результати даних досліджень не можуть бути використаними без належного доопрацювання.

Доволі яскравими прикладами технологічного покращення властивостей матеріалів деталей є застосування при їх виготовленні оздоблювально-викінчу-

вальних операцій [3]. У їх переліку не останню позицію посідають зміцнювальні операції поверхневих прошарків матеріалу деталей різноманітними методами ППД [4]. Різновиди оздоблювально-зміцнювальних методів ППД доволі ґрунтовно досліджені. Усі вони описані в наукових роботах, наприклад, [5, 6]. Тому найбільш ефективні із когорти зміцнювальних методів ППД, наприклад накатування роликком [7], карбування, вигладжування [8], дробоструменева та віброзміцнювальна обробки [9] тощо, широко застосовуються у виробничих галузях. Відчутною перевагою цих зміцнювальних операцій є те, що не піддаючи деталі високотемпературному енергозатратному нагріванню забезпечується покращення міцнісних характеристик та експлуатаційних властивостей найбільш навантажених поверхневих прошарків їх матеріалу. Тому загально визнаним серед виробників відповідальних деталей є той незаперечний факт, що застосування в технологічних процесах формоутворення деталей оздоблювально-викінчувальних методів ППД сприяє підвищенню їх довговічності та надійності [10].

Результатами теоретичних та експериментальних досліджень впливу зміцнювальних технологій на експлуатаційні властивості важко навантажених деталей доведено, що на спроможність протистояння експлуатаційним навантаженням визначний вплив мають сформовані в товщі зміцненого матеріалу залишкові напруження [5].

На жаль і для повсемісного широкого застосування зміцнювальних технологій існують певні свої обмеження. Так практично жоден із методів ППД не придатний для обробки внутрішніх поверхонь довгомірних деталей із незначним поперечним перерізом. Тобто, незважаючи на ґрунтовні дослідження впливу зміцнювальних технологій на експлуатаційні властивості деталей, все ще залишились не вирішеними питання якісного зміцнення внутрішніх поверхонь довгомірних деталей. Причиною цьому є певні об'єктивні труднощі, що обумовлені протяжністю цих довгомірних поверхонь. Практично не можливо існуючими зміцнювальними пристроями забезпечити передачу достатніх для якісного зміцнення сил деформування матеріалу в обмежений простір на віддалі у декілька метрів. Певним варіантом подолання цих труднощів могло б бути використання для зміцнювальної обробки стволів гармат зміцнювальних пристроїв для обробки внутрішніх поверхонь обсадних труб бурильних колон. Опис конструкцій цих зміцнювачів приведено у роботах [10, 11]. Однак ці зміцнювачі не придатні для зміцнювальної обробки протяжних внутрішніх поверхонь, які обмежені незначними діаметрами, що властиво стволам артилерійських гармат.

Аналіз описаних експлуатаційних навантажень, котрим в процесі експлуатації піддаються матеріал та поверхні каналу стволів гармат, засвідчує, що умови експлуатації доволі універсальні та нетипові. Такій одночасній і миттєвій руйнівній дії на матеріал сталевих

деталей значних напружень розтягу, високих температур та активного впливу хімічних продуктів згоряння порохових газів, окрім артилерійської зброї, не піддаються жодні інші деталі. Проте позитивний вплив поверхневого зміцнення ППД на протидію кожному із окремо взятих із вище означених експлуатаційних чинників доволі розповсюджений [12, 13]. Так зокрема в роботі [14] експериментально доведено, що вібраційно-відцентрове зміцнення виготовлених із матеріалу кольорових сплавів реборд та барабанів коліс шасі літаків забезпечує надійну протидію цих деталей ударним навантаженням. Покращує це зміцнення і протидію їх нагріванню до високих температур під час гальмування в процесі приземлення літаків. Благодатний вплив зміцнення властивий і сталевим деталям [15]. Зокрема у дослідженнях, що проведені авторами робіт [16, 17], доведено, що напруження стиску, які завчасно сформовані в поверхневих прошарках металу, надійно протистоять експлуатаційним напруженням розтягу. І саме зміцнення поверхневим пластичним деформуванням [18] є одним із найефективнішим із технологічних засобів забезпечення в матеріалі деталей напружень стиску. Переконаливо це підтверджено і результатами теоретико-експериментальних досліджень, що приведені в роботі [19]. Визнаним науковцями є і той незаперечний факт, що забезпечене поверхневим зміцненням збільшення мікротвердості матеріалу, відчутно підвищує і опір зношуванню сталевих деталей. Зокрема це відзначено в роботах [20, 21].

Таким чином є науково обґрунтовані підстави вважати, що якісне зміцнення ППД поверхневого шару матеріалу каналу стволів гармат спроможне надійно протистояти експлуатаційним навантаженням. Своєю чергою це сприятиме підвищенню надійності та довговічності стволів гармат, а отже і артилерійського озброєння загалом. На сьогоднішній час із поміж методів поверхневого зміцнення найбільших застосування набуло зміцнення деталей дробоструменевою обробкою [22, 23]. Зміцнення деталей струменем дробу особливо визнання набуло у Німеччині. Тут облаштована відома широкому загалу промисловців-машинобудівників фірма Rosler. Саме ця фірма виготовляє і поставляє промислове дробоструменеве зміцнювальне та очисне обладнання. На машинобудівних підприємствах Росії різновиди методів поверхневого зміцнення теж набули широкого розповсюдження. Перевагу тут більшою мірою віддають фінішній зміцнювальній обробці накатуванням роликком [16, 24]. Із поміж іншого його успішно використовують для підвищення надійності різьбових з'єднань бурильних колон [24] та зміцнення радіусних переходів валів [16]. Проте через специфіку конструктивної будови довгомірних деталей, у тому числі і каналів стволів гармат, ні зміцнення накатуванням роликком, ні дробоструменева зміцнювальна обробка, для покращення механічних властивостей металу внутрішніх поверхонь тут не використовуються. І основна причина полягає у тому, що надто складно

цими способами зміцнення передати необхідне для якісної обробки зусилля деформування в обмежений діаметром внутрішньої поверхні простір. До того ж простір, що віддалений від торців оброблюваної трубчатої деталі на 2–3 метри.

Тому є підстави стверджувати, що на сьогоднішній час практично відсутній придатний для якісного зміцнення каналів стволів гармат метод зміцнювальної обробки ППД. Отже вважаємо що доцільним є проведення теоретико-експериментальних досліджень, спрямованих на розробку технологій та обладнання для зміцнення поверхневим пластичним деформуванням каналів стволів артилерійських гармат та внутрішніх поверхонь інших відповідальних довгомірних деталей.

## 2. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є створення технології та реалізуючого її обладнання для зміцнення поверхневим пластичним деформуванням робочих поверхонь каналу стволів крупнокаліберних артилерійських гармат для підвищення їх надійності, довговічності та міцнісних характеристик.

Досягнення поставленої мети забезпечує вирішення наступних задач:

- аналіз експлуатаційних навантажень, що спричиняють руйнівний вплив на матеріал каналу ствола гармати при стрільбі;
- аналіз ефективності та технологічних можливостей відомих методів поверхневого пластичного деформування стосовно їх придатності для якісного зміцнення каналу стволів гармат;
- створення принципової схеми нового зміцнювального технологічного обладнання, придатного для якісного та ефективного зміцнення каналу стволів гармат;
- визначення основних технологічних та конструктивних параметри зміцнювального обладнання для обробки поверхонь каналів стволів.

## 3. Принципова схема обладнання для зміцнювальної обробки каналу ствола гармати

У Національному університеті “Львівська політехніка” розроблено і досліджено принципово новий метод зміцнення ППД деталей круглого поперечного перерізу. Його названо вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою (ВВЗО) [9, 10]. Цьому методу зміцнювальної обробки властиві порівняно великі (до 100–150 Н на квадратний міліметр) сили деформування матеріалу деталі. У процесі обробки це забезпечуються ударним контактом масивних оброблюваної деталі та інструменту. Ударний контакт при цьому відбувається через обмежену кількість деформівних тіл. А оскільки ударний контакт відбувається через обме-

жену кількість деформівних тіл, у матеріалі зміцнюваної деталі формуються значні контактні напруження. Завдяки цьому забезпечуються значний ступінь зміцнення та формування у товщі матеріалу оброблюваної поверхні залишкових напружень стиску високого градієнту [11].

Новостворений метод вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки пройшов успішне випробування при його впровадженні для зміцнення барабанів та реборд коліс літаків. Експериментальні та так звані “льотні” випробування засвідчили подвійне підвищення моторесурсу цих відповідальних деталей порівняно із незміцненими [10]. Суть цього методу зміцнювальної обробки більш повно розкрито при описі реалізуючого його обладнання.

На рис. 1 схематично відображено пристрій для зміцнення внутрішньої поверхні каналу ствола крупнокаліберної гармати вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою.

У відповідності технології вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки зміцнення поверхневим пластичним деформуванням внутрішньої поверхні каналу стволів артилерійських гармат здійснюють наступним чином. Під час обробки зміцнювальний пристрій розміщують всередині оброблюваного ствола гармати.

Його основними складовими є електропривід 1, циліндричний зміцнювач 2 із розташованими на ньому деформівними тілами 3 та механізм 4 передачі крутного моменту і обертового руху, який з'єднує зміцнювач із валом електроприводу (рис. 1).

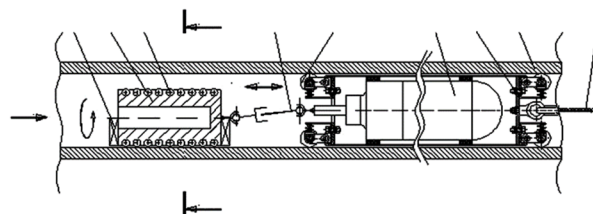
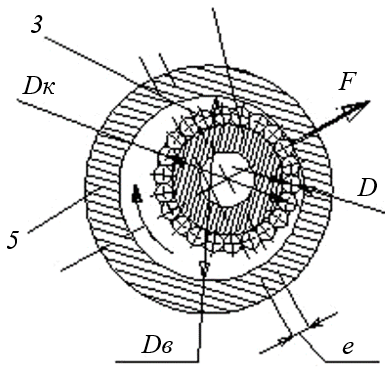


Рис. 1. Зміцнення внутрішньої поверхні каналу ствола крупнокаліберної гармати вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою

На робочій зовнішній поверхні зміцнювача 2 розміщені деформівні тіла 3 у вигляді сталевих загартованих кульок високої твердості або циліндричних з торцевою сферичною поверхнею деформівних тіл із твердого сплаву.

Механізм 4 передачі обертового руху на зміцнювач 2 одночасно із забезпеченням обертання зміцнювача передбачає і можливість його радіального переміщення відносно геометричної осі ствола гармати 5. У якості механізму передачі обертового руху та крутного моменту тут використовують або гнучкий, або карданний вал.

На зміцнювачі 2 закріплено дебаланси 6 (рис. 2).



**Рис. 2.** Зміцнювач із встановленими на ньому деформівними тілами – сталевими загартованими кульками (нумерація позицій деталей та переріз *A–A* згідно рис. 1)

Електропривід 1 розташований у захисному корпусі 7. Його відцентровано співвісно оброблюваній поверхні ствола гармати 5 за допомогою напрямних роликів 8. Для забезпечення переміщень зміцнювального пристрою вздовж твірної оброблюваної поверхні ствола 5 гармати використовують прикріплені до корпусу 7 зміцнювача трос 9, який намотано на барабан лебідки (на рис. 1 не відображено).

Для забезпечення належної динаміки просторових переміщень зміцнювача 2 відносно оброблюваної поверхні каналу ствола гармати геометричні розміри зміцнювача пов'язано певними співвідношеннями із величиною діаметра його внутрішньої зміцнюваної поверхні. Зокрема максимальний діаметр кола  $D_{зм}$ , що охоплює розміщені на зміцнювачі 2 деформівні кульки 3, приймають рівним

$$D_{зм} = (0,75 - 0,80) \cdot D_е,$$

де  $D_е$  – діаметр внутрішньої оброблюваної зміцненням поверхні ствола 5 гармати, тобто його каналу в циліндричній частині.

Ексцентриситет  $\epsilon$  зміцнювача 2 із деформівними тілами 3 при цьому рівний

$$\epsilon = \frac{D_е - (D_к + D)}{2},$$

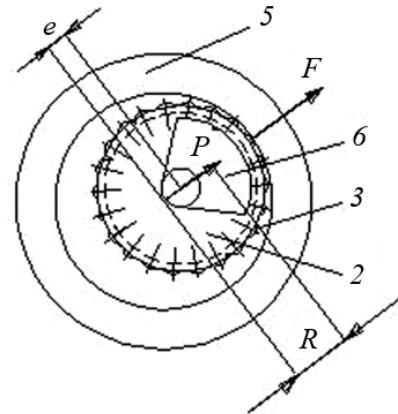
де  $D$  – діаметр деформівних тіл, наприклад, сталевих загартованих кульок 3;

$D_к$  – діаметр кола розташування геометричних центрів сферичних деформівних кульок 3;

$D_е$  – діаметр внутрішньої зміцнюваної поверхні ствола гармати.

Основними переміщеннями зміцнювача 2, що забезпечують його ударну взаємодію із зміцнюваною поверхнею каналу ствола 5, є режим планетарного обкочувального руху зміцнювача. Цей обкочувальний планетарний рух супроводжується почерговим ударним контактом усіх деформівних тіл, що розміщені на зовнішній циліндричній поверхні зміцнювача, із внутріш-

ньою оброблюваною поверхнею каналу ствола 5. При цьому обкочувальному русі на зміцнювач 2 діє відцентрова сила  $F$ . Відцентрова сила  $F$  направлена радіально від центра маси зміцнювача 2 по нормалі до оброблюваної внутрішньої поверхні каналу ствола 5 (Рис. 3).



**Рис. 3.** Схематичне відображення діючих на зміцнювач сил в процесі зміцнювальної обробки (нумерація позицій деталей та відображення виду по стрілці *B* згідно рис. 1)

За своєю величиною відцентрова сила  $F$  пропорційна величині ексцентриситету  $\epsilon$ , з яким зміцнювач 2 встановлено всередині каналу ствола 5, та масі і частоті обкочувального руху зміцнювача.

Якість вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки регламентується забезпечуваною нею товщиною зміцненого прошарку металу на внутрішній поверхні каналу ствола. При цьому товщина зміцнення нерозривно пов'язана із діаметром відбитків на обробленій поверхні після ударної взаємодії із деформівними тілами 3, а також механічними властивостями зміцнюваного матеріалу.

Величину ексцентриситету  $\epsilon$  зміцнювача 2 для забезпечення заданих параметрів зміцнювальної обробки уточнюють по залежності

$$\epsilon = \frac{\sigma_m \cdot d^2 \cdot l}{50 \cdot m \cdot D \cdot n^2}, \quad (1)$$

де  $\epsilon$  – ексцентриситет зміцнювача 2, тобто зміщення центру його маси відносно геометричної осі оброблюваної поверхні ствола гармати;

$\sigma_m$  – межа текучості матеріалу зміцнюваного ствола гармати 5;

$n$  – частота обкочування зміцнювача 2 по внутрішній поверхні каналу ствола 5;

$m$  – сумарна маса зміцнювача 2 із деформівними кульками 3 та дебалансами 6;

$D$  – діаметр сферичних деформівних кульок 3;

$d$  – діаметр відбитка на оброблюваній поверхні від ударного контакту деформівної кульки 3 із поверхнею ствола 5;

$l$  – довжина твірної зовнішньої циліндричної поверхні зміцнювача 2, на якій встановлено деформівні кульки 3.

Для забезпечення обкочувального руху на зміцнювачі 2 закріплено дебаланси 6. Масу дебалансів та віддаль центра їх маси від осі обертання зміцнювача 2 призначають із залежності

$$m_d = \frac{\varepsilon \cdot m}{2R - \varepsilon}, \quad (2)$$

де  $m_d$  – маса дебаланса 6;

$\varepsilon$  – ексцентриситет зміцнювача 2;

$m$  – маса зміцнювача 2 із деформівними кульками 3;

$R$  – віддаль від центра маси дебаланса 6 до осі його обертання.

Зміщення на віддаль  $R$  центра ваги дебалансів 6 від осі обертання зміцнювача 2 сприяє розвитку відцентрової сили  $P$  (див. рис. 4). За умови призначеної із залежності (2) маси дебалансів 6, під дією цієї відцентрової сили  $P$  зміцнювач 2 самовтягується в обкочувальний рух. Рівномірне обкочування зміцнювача 2 по внутрішній оброблюваній поверхні каналу ствола гармати усуває небезпеку нерівномірного зміцнення по довжині кола поперечного перерізу оброблюваної поверхні каналу ствола 5.

Напрями обертання та переміщення зміцнювача 2 на рисунках вказано стрілками.

Відсутною перевагою зміцнення поверхонь деталей динамічними методами ППД є забезпечення у приповерхневих прошарках зміцненого матеріалу напружень стиску. На відміну від напружень розтягу в товщі матеріалу робочих поверхонь деталей, які неспроможні протистояти утворенню та розростанню мікротріщин, напруження стиску не сприяють утворенню мікротріщин в матеріалі, а тим більше – їх росту. Тому правомірно очікувати, що зміцнений вібраційно-відцентровою обробкою матеріал внутрішньої поверхні каналу гарматних стволів матиме підвищений опір зношуванню, а відповідно, і більшу довговічність.

Однак доречним було б окрім забезпечуваного зміцнювальною обробкою підвищення зносостійкості матеріалу каналу ствола підвищити і опір його матеріалу вигоранню у полум'ї пострілу та супутніх йому високотемпературних порохових газів. На нашу думку цьому сприяло б формування зміцнюваною обробкою не тільки зносостійкого, а і жаростійкого поверхневого прошарку матеріалу. Досягнути цього можна було б подачею в зону контакту деформівних тіл дрібнодисперсного порошкового матеріалу із підвищеною жаростійкістю. Однак це суттєво ускладнює технологічний процес зміцнювальної обробки. Інший більш дієвий варіант – це виготовлення деформівних тіл зміцнювального пристрою із матеріалів, спроможних до дифузійного перенесення власного жаростійкого матеріалу на поверхню зміцнюваної деталі. Позитивний досвід такого процесу відомий. В НДЛ – 40 НУ “Львівська політехніка” проведено низку експе-

риментальних досліджень вібраційної зміцнювальної обробки сталевих бурових штанг у середовищі гранул твердосплавного наповнювача, виготовленого способами порошкової металургії із твердого сплаву марки ВК. Обробку бурових штанг проводили з метою зміцнення їх поверхні та підвищення опору їх поверхонь корозійному руйнуванню. Оброблювані бурові штанги встановлювали у  $V$  – подібний контейнер вібраційної машини, контейнер заповнювали насипом гранулами твердосплавного наповнювача.

При амплітуді коливань контейнера  $A = 3,5\text{--}4$  мм та частоті його коливань  $f = 24$  Гц впродовж 30 хвилин здійснювали зміцнювальну обробку партії із шести бурових штанг довжиною 2,5 м кожна. У результаті цієї зміцнювальної обробки зовнішня поверхня бурових штанг не тільки приклепувалася на глибину 0,05–0,1 мм, а і покривалась рівномірним шаром твердосплавного покриття. Причиною формування на оброблених поверхнях бурових штанг твердосплавного покриття було дифузійне перенесення матеріалу твердосплавних гранул в місцях їх ударного контакту із оброблюваною поверхнею деталей. Товщина цього твердосплавного покриття мікроскопічна і знаходиться на молекулярному рівні. Однак воно надійно протистоїть корозійним явищам та зношуванню тертям, а також стійке до високотемпературного нагріву в межах 400–450°C.

Враховуючи стійкість твердих сплавів до високотемпературних нагрівань та їх спроможність до дифузійного переносу на поверхні контактуючих деталей при ударній взаємодії, процес зміцнення поверхні каналу стволів гармат можна було б розчленувати на два етапи. На першому етапі, використовуючи у якості деформівних тіл сталеві загартовані кульки, якісно проклепати поверхню каналу ствола вібраційно-відцентровим зміцнювачем. При цьому підвищиться мікротвердість матеріалу поверхні каналу ствола, у ньому сформуються залишкові напруження стиску. У комплексі це протидіятиме утворенню мікротріщин в зміцненому матеріалі каналу ствола, що зменшить його зношування в процесі експлуатації.

На другому етапі, використовуючи у якості деформівних тіл сформовані порошковою металургією твердосплавні ударні елементи, вібраційно-відцентровою обробкою формують твердосплавне покриття поверхні каналу ствола. Це жаростійке твердосплавне покриття протистоятиме випалюванню мікрочасток металу із поверхні каналу ствола при пострілах. При цьому більш тривало у часі експлуатації зберігатиметься незмінною геометрія робочих поверхонь каналу ствола. А відповідно і точність та довговічність гармати.

На рис. 4 відображена принципова схема розміщення твердосплавних деформівних тіл 1 на зміцнювачі 2. Для зручності монтажу та фіксації деформівних тіл на зміцнювачі його доречно виготовити із двох половин циліндра, які після встановлення деформівних тіл скріплюють між собою у єдиний циліндричний зміцнювач.

Твердосплавні деформівні тіла *1* виготовлені спіканням із порошків вольфраму та кобальту і мають циліндричну форму із сферичною ударною частиною на одному торці та циліндричним заплечиком більшого діаметру на іншому. Всередині вздовж їх циліндричної частини виконано отвір для облаштування в ньому пружини *2*. Твердосплавні деформівні тіла *1* вільно із можливістю осьового переміщення встановлюють у циліндричних двоступінчатих отворах зміцнювача *3*. Їх разом із пружиною *2* фіксують в отворах зміцнювача *3* запресованими втулками *4*. Пружина *2*, приймаючи на себе частину енергії ударної взаємодії твердосплавних деформівних тіл *1* із матеріалом оброблюваної деталі, узабезпечує деформівні тіла від властивого твердому сплаву крихкого руйнування.

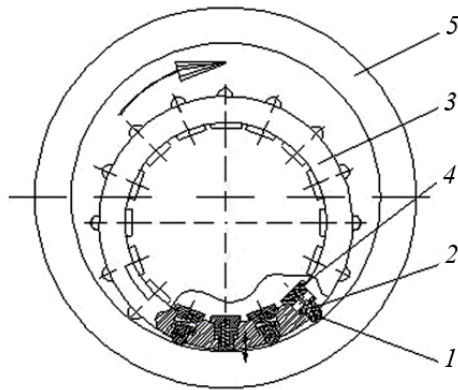


Рис. 4. Схема фіксації твердосплавних деформівних тіл на циліндричному зміцнювачі

При ударному контакті зміцнювача *3* із поверхнею оброблюваного каналу ствола *5* гармати кожен із твердосплавних деформівних тіл *1* по чергову вступає в ударну взаємодію із оброблюваною поверхнею. Залишковий слід удару на поверхні каналу ствола має вигляд сферичного відбитку, вкритого дифузійно перенесеними частками твердого сплаву. За кожен оберт валу електродвигуна приводу зміцнювального пристрою зміцнювач *3* здійснює один обкочувальний рух по зміцнюваній поверхні каналу ствола, один раз повернувшись при цьому навколо власної геометричної осі. Кожен із значної кількості встановлених на зміцнювачі *3* твердосплавних деформівних тіл *1* при цьому наносить удар по оброблюваній поверхні, залишаючи на ній частки твердого сплаву. Це повторюється при кожному оберті валу електродвигуна приводу, що сприяє рівномірному нанесенню часток твердого сплаву по всьому поперечному перерізу каналу ствола. А осьове переміщення зміцнювального пристрою вздовж осі внутрішньої поверхні каналу ствола забезпечує рівномірність нанесення твердосплавного покриття вздовж всієї твірної оброблюваної поверхні.

#### 4. Технологічний процес зміцнювальної обробки каналу ствола гармати

Зміцнення ППД каналу ствола гармати із використанням описаного зміцнювального пристрою здійснюють у наступній послідовності. Зміцнювальний пристрій розташовують всередині каналу ствола *5* гармати. Подають напругу живлення на його електродвигун приводу *1* (рис. 1). При цьому крутний момент від валу електродвигуна приводу *1* через механізм *4* передачі обертового руху (карданний або гнучкий вал) передається зміцнювачу *2*. Зміцнювач *2* набуває при цьому обертового руху із частотою, що рівна частоті обертання валу електродвигуна приводу *1* (рис. 2).

При обертанні зміцнювача *2* із приєднаними до нього дебалансами *6* на зміцнювач діє збурююча сила *P* (рис. 3), яка рівна добутку маси дебалансів на віддалі *R* від центра їх маси до осі обертання. Іноді цю силу називають “вібраційним статичним моментом”. Вектор дії сили *P* проходить через центр маси дебалансів *6* та вісь обертання зміцнювача *2*. Зміцнювач *2* під дією переданого йому крутного моменту та сили *P* самовтягується у режим робочого планетарного обкочувального руху. Досягається це лише за умови дотримання величини маси дебалансів *6* та віддалі *R* від осі обертання до центра маси, обумовлених залежністю (2). Даний планетарний обкочувальний рух зміцнювача *2* здійснюється розташованими на його зовнішній циліндричній поверхні деформівними тілами *3* по внутрішній оброблюваній поверхні каналу ствола *5*.

Обкочувальний рух зміцнювача *2* по внутрішній поверхні каналу ствола *5* супроводжується дією на зміцнювач відцентрової сили *F* (рис. 3). Обертовий вектор дії відцентрової сили *F* направлений від центра маси зміцнювача *2*. Він проходить перпендикулярно геометричним осям зміцнювача *2* і оброблюваної поверхні каналу ствола *5*. На рис. 3 напрям дії відцентрової сили відображено стрілкою із позначенням *F*.

Абсолютна величина відцентрової сили *F* пропорційна ексцентриситету  $\varepsilon$  зміцнювача *2*, квадрату кругової частоти *n* його обкочувального руху та масі *m* зміцнювача. Вона визначається із залежності

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

де  $\omega = 2\pi n$  – кругова частота обкочувального руху зміцнювача *2*.

У кожен проміжок часу зміцнювач *2* контактує із зміцнюваною поверхнею каналу ствола *5* через деформівні тіла *3*, котрі розташовані вздовж твірної зовнішньої циліндричної поверхні зміцнювача. Контакт із черговою групою деформівних тіл *3* відбувається з ударною взаємодією. Сила удару, що припадає на кожне із деформівних тіл *3*, пропорційна діючій на обертовий зміцнювач *2* відцентровій силі *F* і обернено пропорційна кількості *N* розташованих вздовж твірної зміцнювача деформівних тіл *3*, тобто

$$F_y = \frac{F}{N} = \frac{m \cdot \varepsilon \cdot D \cdot \omega^2}{l},$$

де  $N = l/D$  – кількість деформівних тіл 3, розміщених вздовж твірної зміцнювача;

$l$  – довжина твірної циліндричної поверхні зміцнювача 2.

Величину контактних напружень, які формується в місцях контакту матеріалу оброблюваної поверхні каналу ствола із деформівними тілами 3 визначають із залежності [12]

$$\sigma_{\text{кон}} = \frac{F_y}{S} = \frac{10 \cdot m \cdot \varepsilon \cdot D \cdot n^2}{l \cdot d^2},$$

де  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  – площа залишкового відбитку після ударного контакту із деформівним сферичним тілом.

Для забезпечення рівномірності зміцнювальної обробки всієї поверхні каналу ствола зміцнювальний пристрій переміщують із сталою швидкістю вздовж її твірної. Здійснюють це за допомогою троса 9, що намотується на барабан лебідки (на рис. 1 не відображена). Завдяки цьому забезпечується рівномірність зміцнення оброблюваної поверхні і по довжині твірної, і по довжині кола її поперечного перерізу. При необхідності збільшення товщини зміцнення нарощують масу зміцнювача 2 або використовують повторні переміщення зміцнювального пристрою вздовж осі каналу ствола 5.

Завершивши зміцнювальну обробку ствола гармати 5 зміцнювальний пристрій за допомогою троса 9 виводять поза межі обробленої деталі. Встановлюють його у черговий підлягаючий зміцнювальній обробці гарматний ствол і цикл обробки повторюють у вище описаній послідовності.

На моделі гарматного ствола із діаметром внутрішньої поверхні  $D_0 = 125$  мм здійснено перевірку технологічних можливостей методу вібраційно-відцентрового зміцнення каналу ствола гармати. Дана трубчата модель була виготовлена із легованої конструкційної сталі марки 12ХН3А із межею текучості матеріалу  $\sigma_m = 750$  МПа. Довжина твірної внутрішньої поверхні моделі становила один метр. За своїми фізико-механічними властивостями матеріал даної моделі ствола наближений певною мірою до матеріалів, що використовуються для виготовлення гарматних стволів.

Задачею експерименту було закладено підбір конструктивних та технологічних параметрів зміцнювача для забезпечення вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою глибини зміцнення в товщі металу оброблюваної внутрішньої циліндричної поверхні в межах  $h = 0,15 \div 0,20$  мм. Попередніми дослідженнями науковців [11, 13] встановлено, що при ППД сталевих деталей сферичними деформівними тілами глибина залягання зміцненого шару металу корегується із діаметром відбитків на оброблюваній поверхні залежністю  $d = 2h$ . Тому для забезпечення якісної зміцнюва-

льної обробки діаметр відбитку на оброблюваній зміцненням поверхні повинен становити не менше

$$d = 2 \cdot 0,2 = 0,4 \text{ мм.}$$

Призначають основні геометричні параметри зміцнювача та параметри обробки для забезпечення заданої глибини зміцнення:

$D = 10$  мм – діаметр сталевих загартованих кульок (деформівних тіл);  $m = 30$  кг – маса зміцнювача із деформівними тілами;  $l = 0,5$  м – довжина зміцнювача;  $N = 50$  – кількість деформівних тіл вздовж твірної зміцнювача;  $n = 940$  об/хв =  $16 \text{ с}^{-1}$  – частота обертання валу двигуна електроприводу.

При ВВЗО глибина забезпечуваного зміцненням прошарку матеріалу регламентується силою ударної взаємодії  $F_y$  деформівних тіл із матеріалом оброблюваної деталі. Своєю чергою сила  $F_y$  ударної взаємодії забезпечується динамікою планетарного обкочувального руху зміцнювача і регламентується безпосередньо його масою та ексцентриситетом. Тому задавшись масою зміцнювача  $m = 30$  кг необхідно визначити його ексцентриситет із залежності (1)

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

Отже визначено основний геометричний параметр зміцнювача, а саме його ексцентриситет  $e$ . Це гарантує, що за обраних конструктивних параметрів зміцнювача, а саме його заданої маси  $m$  і встановленого ексцентриситу  $e$ , та призначеного технологічного параметра, яким у даному випадку являється частота  $f = 16$  Гц обкочувального руху зміцнювача, у результаті обробки буде забезпечена задана глибина зміцнення, рівна  $a = 0,2$  мм.

Таким чином, визначено основний геометричний параметр зміцнювача, дотримання якого забезпечить якісне зміцнення внутрішньої поверхні ствола гармати запропонованим методом вібраційно-відцентрової обробки.

## 5. Обговорення результатів дослідження вібраційно-відцентрового зміцнення каналу ствола гармати

Важливим результатом даного дослідження слід вважати створення нового різновиду зміцнювальних пристроїв, придатних для якісної обробки внутрішніх поверхонь довгомірних деталей. Трубочаті довгомірні деталі доволі розповсюджені. Крім артилерійського озброєння це бурильні та обсадні труби свердловин, а також їх ніпелі та перехідники, гільзи pomp бурового обладнання. Це і деталі круглого перерізу стійок шасі літаків, і труби високого тиску тощо. Якісне зміцнення внутрішніх поверхонь цих деталей вібраційно-відцентровою обробкою дозволить не тільки підвищити надійність, міцність та довговічність цих відповідальних деталей. Незаперечно, що зміцнення відкриває і перс-



пективу зменшення маси цих деталей. А це, із врахуванням значних обсягів виготовлення цих деталей, обіцяє вагому економію вартісного металу.

Особливістю описаної зміцнювальної технології є використання у втілюючих її пристроях значної енергії деформування, що генерується динамікою рухомого зміцнювача. Її джерелом є створювана обкочувальним рухом зміцнювача відцентрова сила, яка пропорційна його швидкості та масі. Швидкість зміцнювача в його обкочувальному планетарному русі може сягати  $V_{zm} \approx 0,75-1,1$  м/с, а його маса  $m_{zm} \approx 50$  кг. Це формує силу удару на кожне із деформівних тіл в межах 50–75 Н.

Приймаючи до уваги, що площа контакту сферичних деформівних тіл із оброблюваною поверхнею не перевищує декількох квадратних міліметрів, слід очікувати, що у товщі зміцнюваного матеріалу в місцях контакту розвиватимуться значні контактні напруження. Завдяки тому, що ці контактні напруження наближені до межі текучості зміцнювального матеріалу і забезпечується товщину зміцнення в межах 0,15–0,2 мм. У порівнянні з іншими різновидами зміцнювальної обробки поверхневим пластичним деформуванням тільки карбування спроможне забезпечити аналогічні значення як сил ударної взаємодії, так і товщини зміцненого шару матеріалу при обробці сталевих деталей. Проте карбування не придатне для зміцнювальних обробок протяжних внутрішніх поверхонь деталей.

Окрім зміцнення внутрішніх поверхонь артилерійських і танкових гармат великого калібру запропоновані конструкції зміцнювальних пристроїв придатні для якісної зміцнювальної обробки зовнішніх та внутрішніх поверхонь інших відповідальних деталей. Зокрема циліндричних деталей стійок шасі літаків, зовнішніх поверхонь танкових торсіонних валів, осей і стабілізаторів залізничного транспорту, труб високого тиску, бурових та обсадних труб бурильних установок тощо.

Оригінальність та новизну методу вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки внутрішніх поверхонь довгомірних деталей, у тому числі і стволів артилерійських гармат, а також конструкцію зміцнювача, захищено патентами України на винаходи [10]. Незаперечно, це свідчить про пріоритет України в галузі зміцнювальних технологій та конструкцій пристроїв для зміцнювальної обробки поверхонь довгомірних деталей.

Тим не менше певні обмеження у спроможності ефективного виробничого застосування матеріалів даного дослідження все ж існують. Перш за все, це відсутність статистичних даних так званих «польових випробувань» зміцнених у відповідності запропонованій технології гарматних стволів. Розробникам такі випробування здійснити не вдалося. А саме їх результати повинні бути визначальними стосовно доцільності виробничого запровадження запропонованої зміцнювальної технології та об'єктивної оцінки її ефективності.

Тому про ефективність запропонованої зміцнювальної обробки для стволів гармат можна судити хіба

що умовно, порівнюючи її із ефективністю зміцнених по тій же технології деталей. Звичайно, тут навряд чи вдасться досягнути такого ж як і для барабанів авіаційних коліс подвійного нарощування довговічності. Та досягнутого ефекту підвищення на 20–25 % довговічності зміцнених ВВЗО сталевих гільз помп подачі пульпи до бурових свердловин цілком можна сподіватись.

Незаперечно це вагомий недолік даного дослідження. Тому у перспективі доцільно здійснити лабораторні випробування зміцнених моделей гарматних стволів, піддавши їх високотемпературним нагріванням та обпікаючи зміцнену поверхню полум'ям. Критерієм оцінки ефективності зміцнення тут мають бути, наприклад, випробування зміцненої і обпеченої поверхні на зношування. Проте для проведення таких нестандартних досліджень необхідно спеціалізоване устаткування. Деякі різновиди цього дослідного устаткування, наприклад, печі обдування поверхні полум'ям, очевидно, доведеться розробляти.

Автори сподіваються, що їм вдасться це здійснити у майбутньому.

## Висновки

1. Здійснено аналіз експлуатаційних навантажень, які мають визначальний вплив на матеріал каналу ствола артилерійської гармати. Встановлено, що гарматні постріли супроводжуються миттєвими сплесками високих температури та тисків, що формують у товщі матеріалу каналу ствола експлуатаційні напруження розтягу. Під дією напружень розтягу зароджуються та розростаються мікротріщини, які порушують геометрію каналу ствола.

2. Дослідження і аналіз відомих методів зміцнення поверхневим пластичним деформуванням відображають, що жоден із відомих різновидів ППД не придатний для якісного зміцнення внутрішніх поверхонь довгомірних деталей. Це переконливо підтверджує доцільність проведення теоретико-експериментальних досліджень, що спрямовані на розробку устаткування для якісного зміцнення каналів гарматних стволів.

3. Розроблено принципові схеми конструктивної будови зміцнювачів для обробки поверхневим пластичним деформуванням способом вібраційно-відцентрового зміцнення крупнокаліберних каналів стволів артилерійських гармат. Запропоновані пристрої для зміцнювальної обробки каналів гарматних стволів енергоощадні, прості за конструктивною бурою, не передбачають для обслуговування висококваліфікованого обслуговуючого персоналу.

4. Розроблено і досліджено принципово новий метод вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки поверхонь довгомірних деталей. Даний метод ВВЗО належить до групи динамічних методів зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням. Відрізняється спроможністю до забезпеченням значного

рівня енергії деформування матеріалу зміцнюваних деталей завдяки розвитку сили ударної взаємодії кожного деформівного тіла із матеріалом зміцнюваної де-

талі в межах 50–75 Н. Завдяки цьому забезпечувана товщина зміцненого шару матеріалу сталевих деталей сягає 0,15–0,20 мм.

## References

- [1] Ya.M. Kusii and V.G.Topil'nits'kii, "Doslidzhennya yakosti poverkhni vibrozsmishchennikh detalei mashin", *Visnik natsional'nogo universitetu "Lviv's'ka politehnika"*, "Optimizatsiya virobnichikh protsesiv i tekhnichii kontrol' u mashinobuduvanni i priladobuduvanni", No. 772, pp. 196–201, 2013. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPO\\_2013\\_772\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPO_2013_772_33)
- [2] V.V. Shirokov *et al.*, "Rozroblennya tekhnologichnogo osnashchennya dlya pokrashchennya ekspluatatsiynikh kharakteristik detalei naftogazovogo obladnannya", in *Proc. Effektivnost' realizatsii nauchnogo, resursnogo i promyshlennogo potentsiala v sovremennykh usloviyakh sgt. Slavskoe, Karpaty*, 2010. pp. 243–246.
- [3] Ya.M. Kusii and A.M. Kuk, "Method devised to improve technological reliability of machine parts", *EEJET*, vol. 1, No. 7(73), pp. 41–51, 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36336>
- [4] Ya.M. Kusii and V. Topilnitskiyy, "Calculatoions of vibratory-centrifugal strengthening treatment's dynamics by means of application software", in *Book of abstracts XVII Polish-Ukrainian Conference on "CAD in Machinery Design-Implementation and Educational Problems"*, 2009, pp. 25–26. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.3767>
- [5] I.S. Aftanaziv, L.I. Shevchuk and O.I. Strogan, "Pidvishchennya dovgovichnosti torsionnikh valiv ta dovgomirnikh detalei poverkhnevim plastichnim deformuvannyam", *Scientific Journal "ScienceRise"*, No. 4/2(21), pp. 37–44, 2016. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.67693>.
- [6] V.S. Kravchuk, A.F. Dashchenko and A.M. Limarenko, "Grafoanaliticheskii metod opredeleniya effekta uprochneniya poverkhnostno uprochnennykh detalei mashin", in *Zbirnik naukovikh prats' Odes'koї derzhavnoї akademii tekhnichnogo reguluvannya, Odesa*, pp.79–82, 2016. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2016-1-8-79-82>
- [7] A.V. Mironov and G.V. Redreev, "K voprosu ob uprochnenii poverkhnosti detalei plasticheskim deformirovaniem", *Vestnik Oms'kogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, Oms'k*, No. 3(15), pp. 35–38, 2014.
- [8] O. I. Lotots'ka, "Modern finish methods of performance characteristics enhancement of the parts of polygraph machinery by surface plastic deformation and chroming", *Technology and Technique of Typography*, No. 2(28), pp. 44–50, 2010. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(28\).2010.56079](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(28).2010.56079)
- [9] I.S. Aftanaziv and L.I. Shevchuk, Patent No. 116265 Ukraine, MPK V24V 39/04 (2006.01), V23R 9/04 (2006.01) Pristrii dlya zmitsnennya torsionnikh valiv poverkhnevim plastichnim deformuvannyam. a201602854, 26.02.2018, No.4.
- [10] I.S. Aftanaziv and L.I. Shevchuk, Patent No. 116268 Ukraine, MPK V24V 39/02 (2006.01), V23R 9/04 (2006.01) Pristrii dlya zmitsnennya poverkhnevim plastichnim deformuvannyam vnutrishnikh tsilindrichnikh poverkhon' dovgomirnikh detalei. a201603003, Opubl. 26.02.2018, No.4.
- [11] I. Aftanaziv *et al.*, "Vibrational-centrifugal surface strengthening of drill and casing pipes", *Naukovyi VISNYK Natsionalnogo Hirnychogo Universytetu Scientific and technical journal*, No. 5 (167), pp.88–98, 2018. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/7>
- [12] L. Kolomiets, V. Orobey and A. Lymarenko, "Method of boundary element in problems of stability of plane bending beams of rectangular cross section. Structures", *Metallurgical and Mining Industry*, No. 3, pp. 59–65, 2016.
- [13] V. Orobej, L. Kolomiets and A. Lymarenko, "Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures", *Metallurgical and Mining Industry*, No. 4, pp. 295–302, 2015.
- [14] I.S. Aftanaziv *et al.*, "Pidvishchennya mitsnosti ta nadiinosti barabaniv kolis litakiv zmitsnyuval'noy obrobkoju" *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 5/149, pp. 47–57, 2018. doi:10.32620/akt.2018.5.08
- [15] A. Kubit *et al.*, "The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel", *Procedia tructural Integrity*, Vol.2, pp. 3330–3336, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.415>
- [16] S.A. Zaides, Ngo Kao Kyong, "Otsenka napryazhennogo sostoyaniya pri stesnennykh usloviyakh lokal'nogo nagruzheniya", *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, No. 10, pp. 6–9, 2016.
- [17] Lakhwinder Singh, R.A. Khan, M.L. Aggarwal, "Effect of shot peening on hardening and surface roughness of nitrogen austenitic stainless steel International", *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol.2(5), pp. 818–826, 2010.
- [18] Ya.K. Otenii, "Formirovanie ostatochnykh napryazhenii pri obkатыvanii detalei rolikami proizvod'nogo tipa", *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, (57) No. 1, pp. 43–52, 2006.
- [19] R.M. Akhtam'yanov, "Kontrol' protsesa pnevmodobestruinogo uprochneniya i tekhnologicheskaya osnastka", *Molodoi uchenyi*, No.16, pp. 56–58, 2014. <https://moluch.ru/Farchive/75/12759/>
- [20] V. Llancea and F.J. Belzunce, "Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: roughness, residual stresses and work hardening", *Applied Surface Science*, 356, pp. 475–485, 2015.
- [21] E.N. Zyk and V.V. Pleshakov, "Vliyanie otdelechno-uprochnyayushchei obrabotki drob'yu na prochnostnye svoystva i kharakteristiki detalei iz vysokoprochnykh stali pri proizvodstve i vosstanovlenii", *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki. Mashinostroenie*. 2016.

- [22] A.T. Vielma, V. Llana and F.J. Belzunce, "Shot peening intensity optimization to increase the fatigue life of a quenched and tempered structural steel", *Procedia Engineering*, 74, pp. 273–278, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.261>
- [23] M. Śledź, F. Stachowicz and W. Zielecki, "The effect of shot peening on the fatigue strength of steel sheets. Redakcja Kovove Materialy", *Kovove Materialy-Metallic Materials*, No. 2 (53), pp. 91–95, 2015. [https://doi.org/10.4149/km\\_2015\\_2\\_91](https://doi.org/10.4149/km_2015_2_91)
- [24] M.V. Pesin, "Nauchnye osnovy modelirovaniya protsessa uprochneniya vpadiny rez'by buril'nykh trub obkatyvaniem rolikom", *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, No. 5 (30), pp. 68–70, 2013.

## Increasing the durability of the gun barrels by strengthening the PPD of their inner

I.S. Aftanaziv, L.I. Shevchuk, O.I. Strohan, L.R. Strutynska

**Abstract.** *The accompanying cannon shots, the chemical action of powder gases and high temperatures actively destroy the surface layer of the barrel bore material. This leads to a violation of the geometry of the barrel bore and, as a consequence, a decrease in the accuracy of the aimed firing of the gun. A description of a fundamentally new technology of hardening by surface plastic deformation of the inner working surface of the bore of large-caliber artillery and tank guns is given. This hardening technology is based on riveting the metal of the barrel bore with deforming bodies with a spherical impact surface, which are mounted on a massive cylindrical hardener. During processing from the electric motor, the cylindrical hardener is given a planetary rolling motion along the processed inner surface of the barrel bore. Simultaneously, the hardener is moved along the geometric axis of the processed gun barrel. The result of this hardening treatment is the formation of residual compressive stresses in the thickness of the bore material and an increase in its surface microhardness. This provides an increase in the resistance of the material of the barrel bores to its burning out, as well as to wear during cannon shots.*

*The design of a strengthening device for this treatment has been created. It consists of a cylindrical hardener with deforming bodies, a mechanism for transmitting torque from the motor shaft to the hardener, and a drive motor. During processing, the hardening device is moved along the bore of the gun. Its cylindrical hardener rolls over the inner surface of the barrel to be machined and rivets its material. The ensured thickness of hardening of steel parts is 0.15–0.20 mm. The hardened surface layer of the tool barrel bore material formed during processing has an increased microhardness, due to which it reliably resists the formation of operational microcracks in it. In this case, the compressive stresses formed in the thickness of the hardened metal of the bore of the bore reliably resist the temperature growth of microcracks. This provides an increase in the resistance of the hardened metal of the barrel to operational destruction, thereby increasing the reliability and durability of artillery weapons.*

**Keywords:** barrel, cannon, artillery, barrel bore, material, wear, surface hardening, residual stress, hardening thickness.

## Повышение долговечности стволов орудий упрочнением ППД их внутренних поверхностей

И.С. Афтаназив, Л.И. Шевчук, О.И. Строган, Л.Р. Струтинская

**Аннотация.** *Сопровождающие пушечные выстрелы химическое действие пороховых газов и высоких температур активно разрушают поверхностный слой материала канала ствола. Это приводит к нарушению геометрии канала ствола и, как следствие, понижению точности прицельной стрельбы орудия. Приведено описание принципиально новой технологии упрочнения поверхностным пластическим деформированием внутренней рабочей поверхности канала стволов крупнокалиберных артиллерийских и танковых орудий. Эта упрочняющая технология базируется на проклепывании металла канала ствола деформирующими телами со сферической ударной поверхностью, которые установлены на массивном цилиндрическом упрочнителе. Цилиндрическому укрепителю в процессе обработки от электродвигателя приводу придают планетарное обкатывающее движение по обрабатываемой внутренней поверхности канала ствола. Одновременно упрочнитель перемещают вдоль геометрической оси обрабатываемого ствола пушки. Результатом этой упрочняющей обработки является формирование в толще материала канала ствола остаточных напряжений сжатия, повышение его поверхностной микротвердости. Это обеспечивает повышение сопротивления материала каналов ствола его выгоранию, а также износу во время пушечных выстрелов.*

*Создана конструкция упрочняющего устройства для осуществления этой обработки. Она состоит из цилиндрического упрочнителя с деформирующими телами, механизма передачи крутящего момента от вала двигателя к упрочнителю и электродвигателя привода. Во время обработки упрочняющее устройство перемещают вдоль канала ствола орудия. Его цилиндрический упрочнитель обкатывается по обрабатываемой внутренней поверхности ствола и проклепывает его материал. Обеспечиваемая толщина упрочнения стальных деталей 0,15–0,20 мм. Сформированный в процессе обработки упрочненный поверхностный слой материала канала ствола орудия обладает повышенной микротвердостью, благодаря чему надежно противостоит формированию в нем эксплуатационных микротрещин. При этом сформированные в толще упрочненного металла канала ствола напряжения сжатия надежно противостоят температурному разрастанию микротрещин. Это обеспечивает повышение сопротивления упрочненного металла ствола эксплуатационному разрушению, благодаря чему повышаются надежность и долговечность артиллерийского вооружения.*

**Ключевые слова:** ствол, пушка, артиллерия, канал ствола, материал, износ, поверхностное упрочнение, остаточное напряжение, толщина упрочнения.