

Вплив технологічних параметрів при виготовленні кумулятивного облицювання на ефективність бронепробиття боєприпасу калібру 40 мм

The influence of shaped charge liner process conditions during manufacturing on the penetration depth of 40 mm ammunition

Валерій Піманов^A

Corresponding author: к.т.н., старший викладач, e-mail: pimanov@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6609-6904

Денис Савченко^A

аспірант, e-mail: denys-savchenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7309-930X

Михайло Орлюк^A

к.т.н., доцент, e-mail: minorkpi@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4728-9097

Сергій Бісик^B

д.т.н., професор, e-mail: sergey-new@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5009-2113

Valerii Pimanov^A

Corresponding author: PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer, e-mail: pimanov@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6609-6904

Denys Savchenko^A

PhD student, e-mail: denys-savchenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7309-930X

Mykhailo Orliuk^A

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: minorkpi@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4728-9097

Serhiy Bisik^B

Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sergey-new@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5009-2113

^A Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

^B Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

^A National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

^B National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: June 13, 2024 | Revised: June 23, 2024 | Accepted: June 30, 2024

DOI: 10.33445/sds.2024.14.3.6

Мета роботи: розглянути можливість та особливості виготовлення кумулятивного облицювання боєприпасу калібру 40 мм методами об'ємного та листового штампування; оцінити вплив способів штампування на якість та точність кінцевої геометрії кумулятивного облицювання; за умови появи недосконалостей у геометрії штампованого облицювання дослідити їх вплив на ефективність бронепробиття.

Метод: комп'ютерне моделювання, натурний експеримент.

Результати дослідження: запропоновано технологію виготовлення кумулятивного облицювання віссиметричним витягуванням; встановлено, що неточності геометрії штампованого облицювання, зумовлені особливостями процесу витягування, практично не впливають на формування кумулятивного струменя та глибину бронепробиття боєприпасу калібру 40 мм.

Теоретична цінність дослідження: результати проведених досліджень можуть бути використанні при оптимізації геометрії кумулятивних облицювань різного типу та уточненні вимог до точності кінцевої геометрії кумулятивного облицювання.

Практична цінність дослідження: запропонована технологія виготовлення кумулятивного облицювання може бути реалізована як у дрібносерійному, так і у масовому виробництві без використання складного технологічного оснащення та обладнання. Це суттєво зменшує собівартість як самого облицювання, так і готового виробу в цілому за збереження необхідної ефективності, що особливо важливо для забезпечення ЗСУ відповідними боєприпасами у необхідній кількості в умовах жорсткого дефіциту ресурсів для їх виготовлення.

Тип статті: науково-практична.

Ключові слова: кумулятивний струмінь, кумулятивне облицювання, комп'ютерне моделювання, віссиметричне витягування, глибина бронепробиття.

Purpose: to consider the possibility and features of 40 mm shaped charge liner manufacturing by stamping methods; evaluate the impact of stamping methods on the quality and accuracy of the liner final geometry; in case of the liner geometry imperfections appearance, investigate their effect on the efficiency depth penetration.

Method: computer simulation, natural experiment.

Findings: the liner production technology by axisymmetric sheet drawing was proposed; it was established that inaccuracies in the geometry of the stamped liner, caused by the features of the sheet drawing process, practically don't affect on the formation of the cumulative jet and the penetration depth of 40mm ammunition.

Theoretical implications: the results of the conducted research can be used in the liner geometry optimization and the clarification of requirements for the final liner accuracy.

Practical implications: The proposed manufacturing technology of the liner can be implemented both in small-series and in mass production without the use of complex technological equipment. This significantly reduces the cost of both the liner itself and the finished product while maintaining the necessary efficiency, which is especially important for providing the Armed Forces of Ukraine with the appropriate ammunition in the required quantity in conditions of a severe shortage of resources for their manufacture.

Paper type: scientific-practical.

Key words: shaped charge, shaped charge liner, computer simulation, axisymmetric sheet drawing, penetration depth.

Вступ

На сьогоднішній день в Україні проходять досить динамічні зміни у боєприпасній галузі, що пов'язано зі значною потребою у боєприпасах різного призначення для забезпечення Збройних сил України та відомчих військових формувань. Практика ведення бойових дій сучасних військових показала, що напрям створення нових видів та удосконалення існуючих боєприпасів потребує системного підходу як при конструюванні, так і при розробці технології виготовлення. Оскільки Україна не має власного виробництва вибухових речовин, виробництво боєприпасів повністю залежить від вибухових речовин іноземного виробництва. Крім того, вибухова речовина є значною складовою собівартості виробів. Тому питання ефективного використання вибухової речовини залежить не тільки від конструктивних особливостей, а й від технології виготовлення складових деталей боєприпасу.

Одним із важливих напрямів є створення кумулятивних боєприпасів та кумулятивних бойових частин для безпілотних літальних апаратів різних типів. Основним елементом, що створює кумулятивний ефект, є кумулятивне облицювання.

Існує значна кількість способів виготовлення деталей подібного типу, серед яких можна виділити такі, що базуються на використанні технології листового штампування. Вони зазвичай не потребують значних витрат для організації серійного виробництва та характеризуються високою продуктивністю та економічністю. Тому раціональне застосування листового штампування у виробництві напівфабрикатів кумулятивного облицювання має суттєво зменшити собівартість даної продукції.

Теоретичні основи дослідження

На глибину бронепробиття кумулятивним струменем впливають багато факторів, такі як: геометрія і матеріал кумулятивного облицювання, тип та кількість вибухової речовини, фокусна відстань і т.д. Якщо розглянути саме геометрію кумулятивного облицювання, то на глибину бронепробиття може вплинути не тільки конкретно вибрані форма і розміри облицювання, а й неточності геометрії, що виникають під час виготовлення. Наприклад, асиметричність або локальні потоншення матеріалу кумулятивного облицювання можуть призвести до значного зниження ефективності бронепробиття. [1, 2]. Залежно від обраної технології виготовлення можна отримати кумулятивні облицювання різної точності, що може сильно зменшити глибину бронепробиття.

Теоретичною основою дослідження є метод скінченних елементів, який застосовується для чисельного розв'язання широкого класу задач. В даній роботі для моделювання процесів штампування кумулятивного облицювання використовується програмне середовище DEFORM, моделювання процесу бронепробиття кумулятивним струменем виконано за допомогою програмного середовища Ansys Autodyn.

Постановка проблеми

На жаль приходиться констатувати, що на даний час в Україні практично відсутнє своє виробництво боєприпасів необхідної якості та кількості. Це зумовлено не лише недостатньою кількістю необхідних виробничих потужностей, а й відсутністю єдиних науково обґрунтованих методик та керівних матеріалів як по конструюванню боєприпасів, так і проектуванню технологічних процесів їх виготовлення.

Тому існуючі технології виробництва боєприпасів та їх деталей потребують удосконалення та впровадження прогресивних способів обробки (холодного видавлювання, точного об'ємного штампування, листового штампування, комбінованих процесів та ін.).

Також важливо розуміти, як досяжна точність кожного із способів, що застосовуються для виготовлення складових частин боєприпасів, впливає на їх функціонування.

Кумулятивне облицювання є одним з тих елементів, від точності та якості якого залежить відповідна робота боєприпасу калібру 40 мм по цілі, а технологія його виготовлення може бути суттєво удосконалена.

Методологія дослідження

Основні геометричні розміри кумулятивного облицювання представлені на рис. 1.

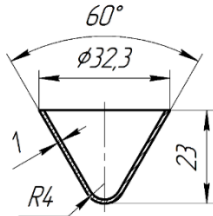


Рисунок 1 – Кумулятивне облицювання

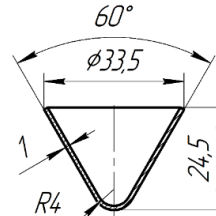


Рисунок 2 – Штампований напівфабрикат

Найпростіший варіант виготовлення даної деталі – це механічна обробка заготовки у вигляді прутка на токарному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК). Даний спосіб практично не потребує підготовки, забезпечує високу точність виготовлення, проте має два основних недоліки, які є неприйнятними для масового та великосерійного виробництва. Перший – це низька продуктивність обробки різанням при виготовленні деталей даного типу, другий – низький коефіцієнт використання матеріалу $K_{\text{вм}}$. У нашому випадку при використанні в якості заготовки прутка діаметром 33 мм (ГОСТ 1535) і довжині заготовки на одну деталь 27 мм (з урахуванням припуску на обробку по довжині та відрізування) $K_{\text{вм}}$ складе лише 20,4% (об'єм деталі – 1496 мм³, об'єм штучної заготовки – 7351 мм³).

Тому більш раціональним способом отримання даного типу деталей в масовому та великосерійному виробництві є штампування. Вигляд штампованого напівфабрикату для подальшої фінішної обробки (обрізування припуску по висоті) показано на рис. 2. Об'єм даного напівфабрикату $V_{\text{пф}} = 1640 \text{ мм}^3$.

Варіантів штампування може бути декілька. Це або об'ємне штампування, або вісесиметричне багатоопераційне витягування (листова штампування).

Один з можливих варіантів об'ємного штампування напівфабрикату представлений на рис. 3. Він включає отримання штучної заготовки відрізуванням від прутка, попередню формовку штучної заготовки та штампування напівфабрикату. Штучна заготовка має співвідношення висоти до діаметра $h/D = 0,36$, тому її раціональне виготовлення можливе або відрізуванням в штампах за закритою схемою [3], або розрізанням на стрічкових пилах. У першому випадку $K_{\text{вм}} = 90,5\%$, а при розрізанні на пилах та ширині пропилу 1 мм $K_{\text{вм}}$ складе 78,4%.

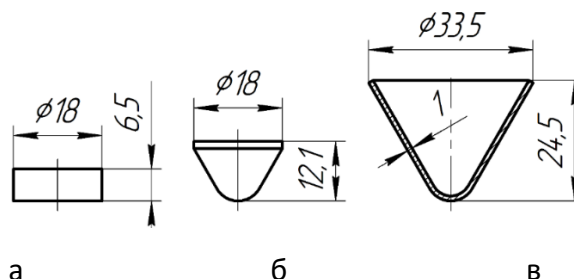


Рисунок 3 – Технологічні операції об'ємного штампування облицювання:
а – заготовка; б – попередня формовка; в – штампування

Однак реалізація об'ємного штампування, а особливо холодного, зазвичай потребує значних технологічних зусиль та супроводжується появою надзвичайно великих питомих зусиль на деформуючому інструменті [4], але забезпечує високу точність штампованого напівфабрикату. В нашому випадку в першу чергу необхідно забезпечити точність штампованого напівфабрикату по товщині стінки вздовж твірної.

Результати

Для попередньої оцінки можливості реалізації запропонованого варіанту штампування було проведено комп'ютерне моделювання з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) операцій попередньої формовки заготовки та штампування напівфабрикату облицювання в середовищі DEFORM 2D (рис. 4).



Рисунок 4 – Розрахункові схеми для моделювання:

а – попередня формовка; б – штампування напівфабрикату

При моделюванні використовувалась пружно-пластична модель матеріалу, матеріал – мідь М0. Сили тертя розраховувались за законом Зібеля, який рекомендовано використовувати для врахування тертя в операціях об'ємного штампування [5]. Фактор тертя за Зібелем – 0,12 (для штампів зі стальними пуансоном та матрицею).

Холодне об'ємне штампування супроводжується нагрівом матеріалу заготовки в процесі деформування. Тому для оцінки максимальної температури нагріву заготовки в процесі штампування напівфабрикату попереднє моделювання виконувалось з нульовим коефіцієнтом теплообміну між заготовкою та інструментом. Результати моделювання для швидкості переміщення пуансона 10 та 100 мм/с представлені на рис. 5.

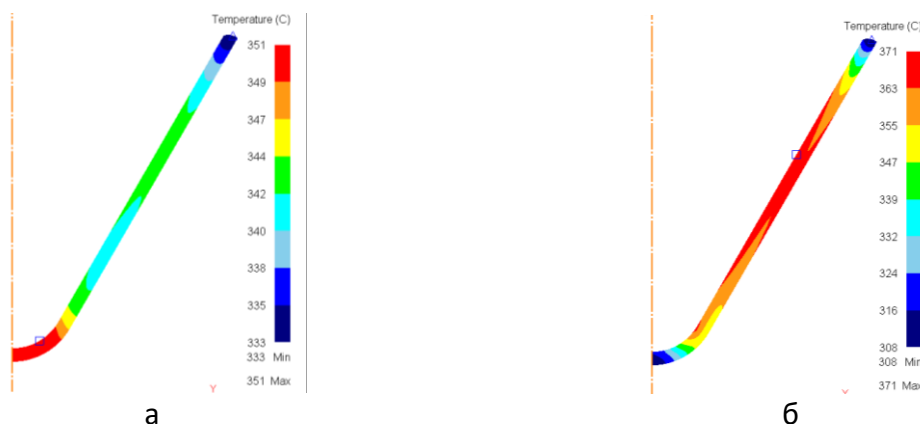


Рисунок 5 – Поле розподілу температур у поперечному перерізі штампованого напівфабрикату без врахування теплообміну між заготовкою та інструментом:
а – швидкість пуансона 10 мм/с; б – швидкість пуансона 100 мм/с

Як видно з рис. 5 при переміщенні пуансону зі швидкістю 10 мм/с температура відштампованого напівфабрикату коливається в межах 330...350°C. При підвищенні швидкості до 100 мм/с максимальна температура напівфабрикату зростає до 370°C (інтервал температур складає 310...370°C). Такий нагрів заготовки буде спричиняти відповідний нагрів інструменту, а більшості інструментальних сталей для холодного об'ємного штампування це температура відпуску [6]. Тому при інтенсивному штампуванні у конструкції штампу необхідно буде застосовувати примусове охолодження пуансона та матриці.

За умови інтенсивного теплообміну (коефіцієнт контактного теплообміну 20000 Вт/(м²·К) [7] та охолодження інструменту (температура інструменту 20°C) при швидкості пуансона 10 мм/с відбувається значне зниження кінцевої температури напівфабрикату до 120...130°C (рис. 6).

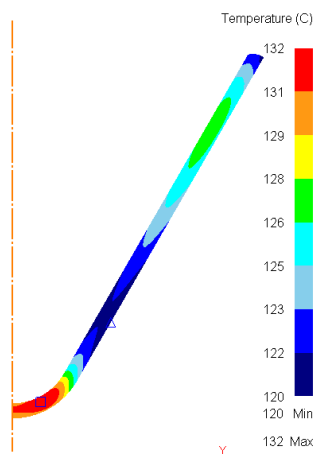


Рисунок 6 – Поле розподілу температур у поперечному перерізі штампованого напівфабрикату

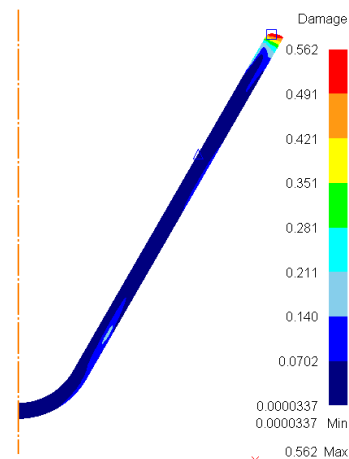


Рисунок 7 – Картина розподілу значень критерію руйнування

Для оцінки ймовірності руйнування в роботі використано критерій руйнування Normalized C&L. Як видно з рис. 7, практично по усьому поперечному перерізу напівфабрикату значення критерію руйнування не перевищують 0,2 і лише у верхній, вузькій периферійній частині напівфабрикату, вони зростають до 0,55...0,56, тобто сягають критичних значень [8]. Результати моделювання демонструють можливість деформування напівфабрикату без руйнування, але існує невелика ймовірність появи мікротріщин у верхній частині напівфабрикату, яка в подальшому буде відрізуватись при отриманні кінцевої геометрії облицювання.

Зусилля штампування в кінці процесу становить приблизно 950 кН (рис. 8), максимальний нормальний тиск на поверхні інструменту становить 2390 МПа (рис. 9).

За таких умов може працювати лише невелика кількість інструментальних сталей, наприклад сталь Р6М5 за умови правильної термічної обробки [6]. Інструмент, виготовлений із сталі Р6М5 може працювати при питомих зусиллях до 2700 МПа. Однак при питомих зусиллях, близьких до максимальних, різко знижується кількість робочих циклів деформуючого інструменту до моменту його руйнування.

Тому отримані результати дослідження холодного об'ємного штампування напівфабрикату облицювання викликають сумніви щодо ефективності використання даного способу при організації масового виробництва кумулятивного облицювання боєприпасу калібру 40 мм.

Суттєво знизити технологічні зусилля та навантаження на інструмент при об'ємному штампуванні можна шляхом заміни холодного штампування на гаряче. Температурний інтервал гарячого штампування для міді складає 775...925°C, оптимальний інтервал – 820...860°C [3].

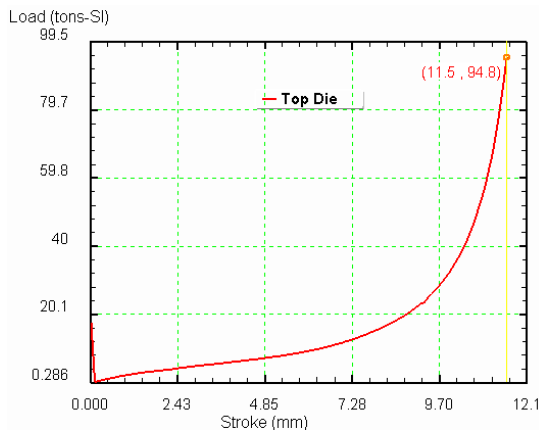


Рисунок 8 – Діаграма зусилля холодного штампування напівфабрикату

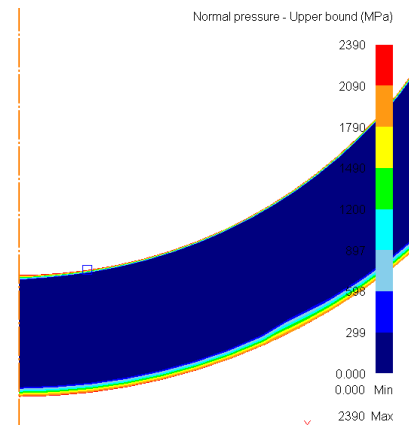


Рисунок 9 – Розподіл нормального тиску в нижній частині напівфабрикату

Тому для оцінки впливу на енергосилові параметри процесу було виконане відповідне моделювання другої операції штампування облицювання за умови гарячого деформування.

Початкові умови моделювання: температура заготовки – 860°C, температура інструменту – 200°C, швидкість пуансона - 100 мм/с, фактор тертя за Зібелем – 0,3 (для гарячого штампування), коефіцієнт контактного теплообміну [7] – 5000 Вт/(м²·К), критерій руйнування Normalized C&L.

Результати моделювання для прийнятих умов деформування представлені на рис. 10...13.

Поле температур (878...903°C) відштампованого напівфабрикату знаходиться в межах температурного інтервалу гарячого штампування (рис. 10), деформування напівфабрикату відбудеться без руйнування (рис. 11).

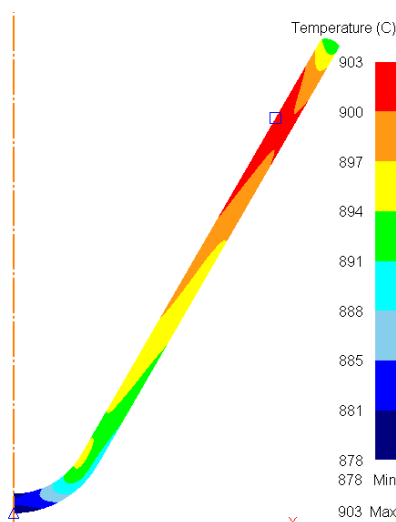


Рисунок 10 – Поле розподілу температур у поперечному перерізі штампованого напівфабрикату

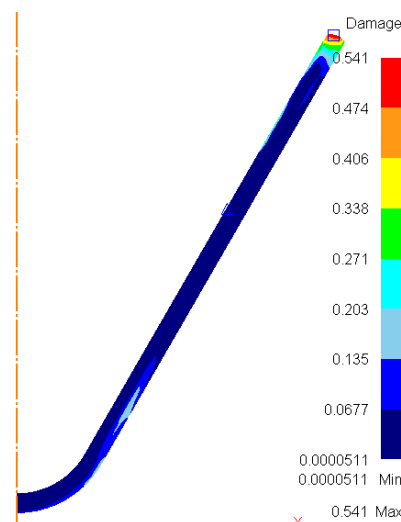


Рисунок 11 – Картина розподілу значень критерію руйнування

Максимальне технологічне зусилля гарячого штампування (рис. 12) становить 387 кН, що у 2,5 рази менше зусилля холодного штампування, максимальний нормальний тиск на інструменті (рис. 13) – 1120 МПа (менше у 2,1 рази).

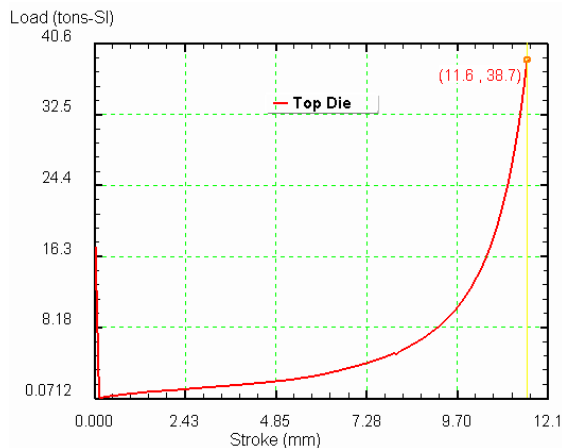


Рисунок 12 – Діаграма зусилля гарячого штампування напівфабрикату

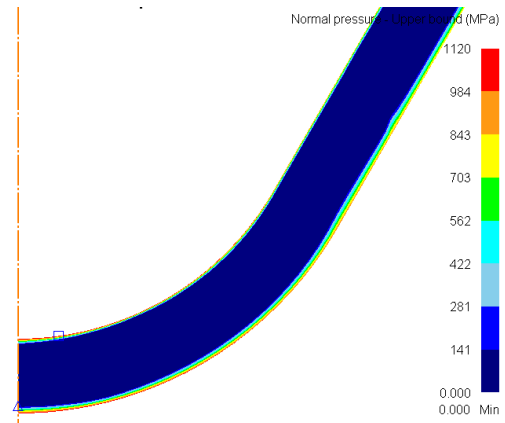


Рисунок 13 – Розподіл нормального тиску в нижній частині напівфабрикату

Однак інструментальні сталі для гарячого штампування зазвичай мають межу текучості 900...1000 МПа при питомих навантаженнях при гарячому штампуванні 800...900 МПа [6]. Тому реалізація даного процесу теж виглядає сумнівною.

Окрім того гаряче штампування супроводжується різними видами інтенсивного зношування інструменту [6], що призводить до суттєвого погіршення якості поверхні та точності штапованого напівфабрикату, що в нашому випадку є неприпустимим.

В свою чергу вісесиметричне витягування в порівнянні з об'ємним штампуванням потребує значно менших технологічних зусиль і з технічної точки зору може бути реалізоване без значних проблем.

Однак витягування без потоншення супроводжується в процесі деформування зміною товщини вихідної заготовки [9]. І якщо в більшості випадків цією зміною нехтують, то у нашому випадку така зміна товщини може негативно вплинути на роботу кінцевого виробу.

Для виготовлення напівфабрикату (рис. 2) потрібна заготовка з листового матеріалу товщиною $S = 1$ мм та діаметром $D = 46$ мм. Відносна товщина заготовки $100S/D \cong 2,2$, тому витягування можливе без притискача [9, 10].

Відповідно до рекомендацій [9] витягування напівфабрикату із заготовки діаметром $D = 46$ мм можливе за чотири переходи.

Габаритні розміри напівфабрикатів по переходах зображені на рис. 14, коефіцієнти витягування по переходах $m_1 = 0,513$, $m_2 = 0,703$, $m_3 = 0,723$, $m_4 = 0,75$.

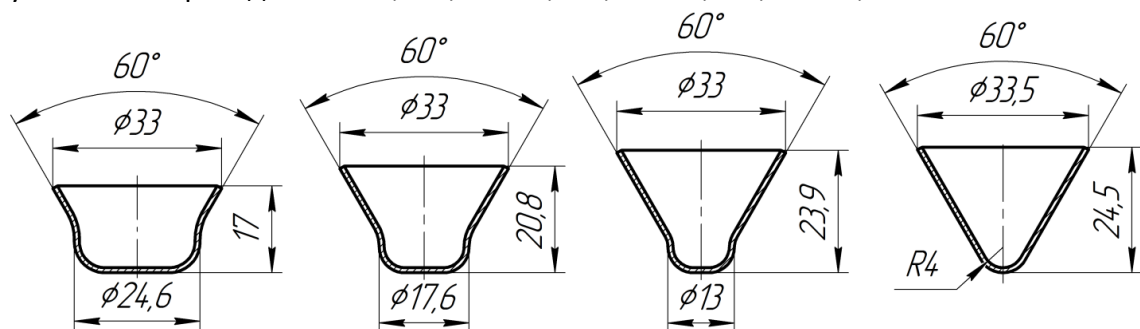


Рисунок 14 – Технологічні переходи витягування кумулятивного облицювання

Для перевірки можливості реалізації запропонованого процесу без руйнування було проведено моделювання багатоперехідного витягування в DEFORM 2D.

Початкові умови моделювання: матеріал заготовки – пластичний (при використанні пружно-пластичної моделі виникли проблеми зі сходженням задачі в процесі моделювання), коефіцієнт тертя за Кулоном – 0,15, швидкість переміщення деформуючого інструменту – 10мм/с, критерій руйнування – Normalized C&L.

Габаритні розміри напівфабрикатів по переходам, які отримані за результатами моделювання, представлені на рис. 15.

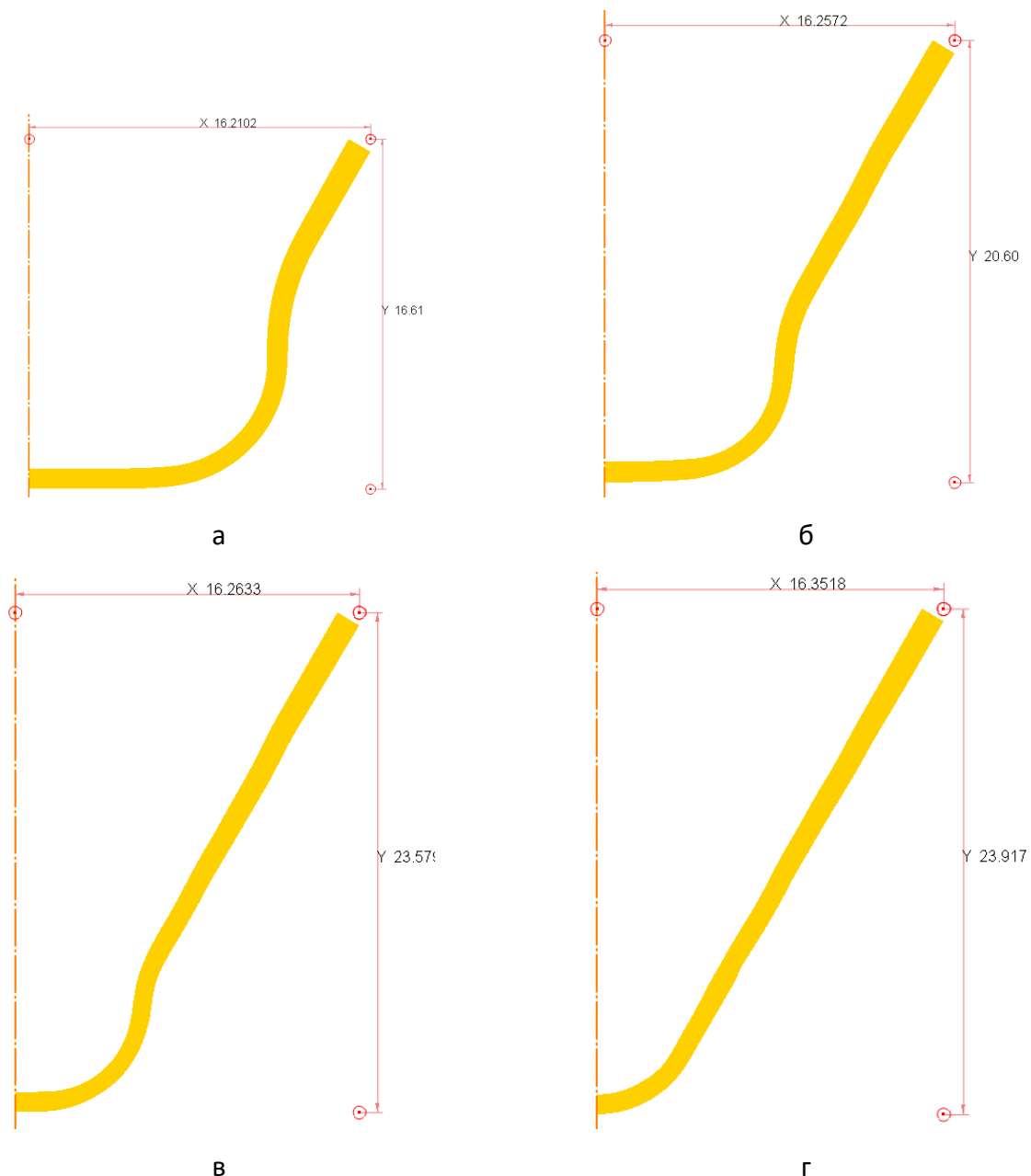


Рисунок 15 – Геометрія напівфабрикату після витягування:

а – перший перехід; б – другий перехід; в – третій перехід; г – четвертий перехід

Це підтверджує і картина розподілу значень критерію руйнування по переходам (рис. 16). Як видно з рис. 16, максимальне значення критерію руйнування поступово зростає від першого до останнього переходу, оскільки в процесі деформування відбувається зміцнення

матеріалу, а кінцеве максимальне значення критерію руйнування 0,473 не перевищує граничних значень 0,5...0,55 для даної схеми напружено-деформованого стану [10] – тобто витягування відбудеться без руйнування.

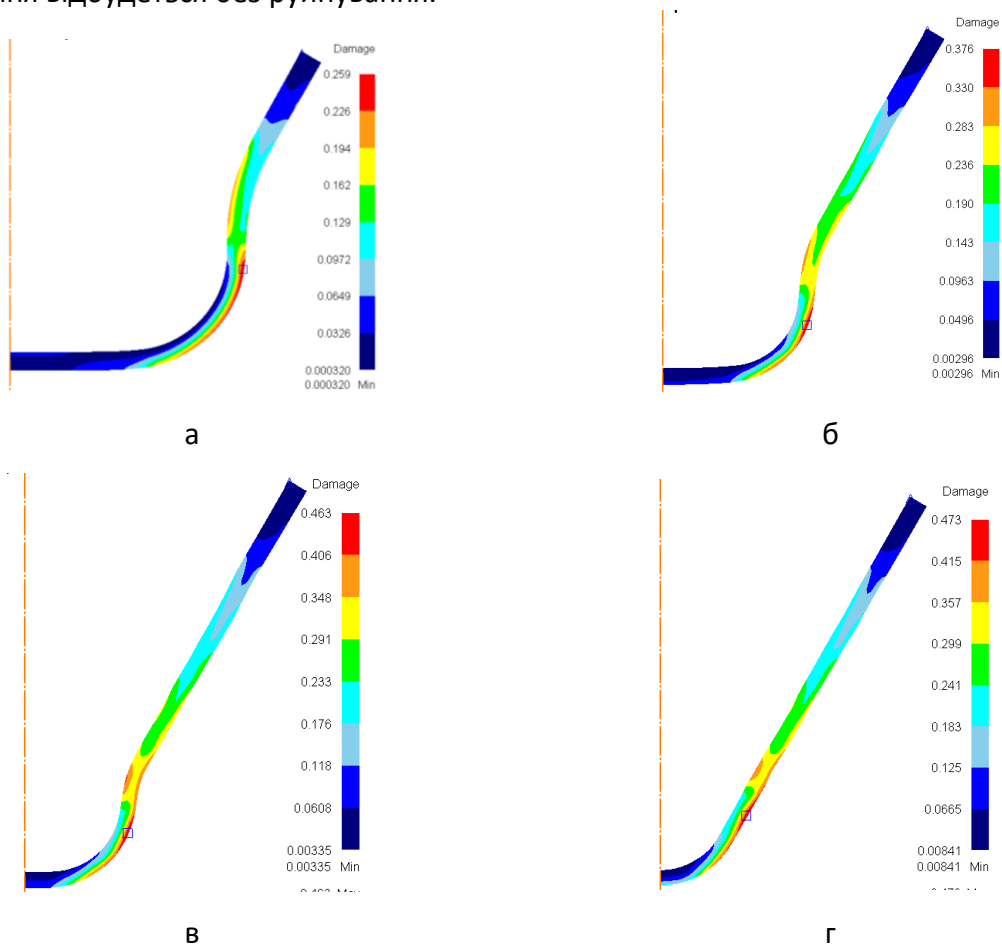


Рисунок 16 – Картина розподілу значень критерію руйнування по переходах:
 а – перший перехід; б – другий перехід; в – третій перехід; г – четвертий перехід

Також за результатами моделювання встановленні технологічні зусилля по переходах. На 1...3 переходах зусилля витягування не перевищувало 15 кН, на останньому переході при суміщенні процесу витягування з оправкою в кінці ходу зусилля зросло до 100 кН (рис. 17), що на порядок нижче ніж при холодному об'ємному штампуванні.

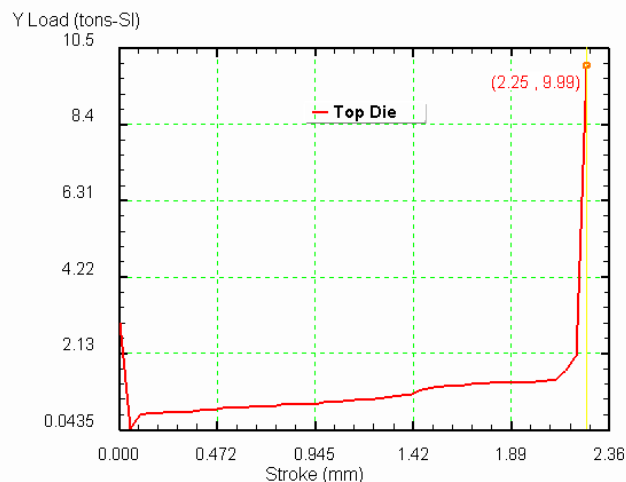


Рисунок 17 – Діаграма зусилля четвертого переходу витягування напівфабрикату

На рис. 18 показано кінцеву картину розподілу інтенсивності деформації у поперечному перерізі витягнутого напівфабрикату. Як видно з рисунку, після багатоперехідного витягування ми отримуємо значну нерівномірність розподілу інтенсивності деформації вздовж твірної, а також локальний мінімум 0,153 у вершини та локальний максимум 0,804 поблизу вершини облицювання.

Така нерівномірність в подальшому може негативно вплинути на роботу облицювання у складі готового виробу. За необхідності цю нерівномірність можна усунути за допомогою наступної термічної обробки.

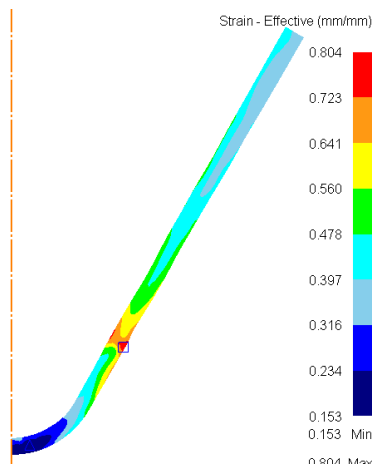


Рисунок 18 – Розподіл інтенсивності деформації

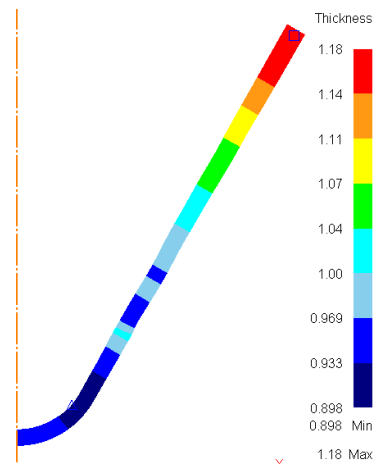


Рисунок 19 – Картина зміни товщини напівфабрикату вздовж твірної

На рис. 19 показано кінцеву картину зміни товщини витягнутого напівфабрикату вздовж твірної. Для більшої наочності оцінки геометрії напівфабрикату, отриманої за результатами моделювання, виконано її порівняння з розрахунковою геометрією.

На рис. 20 показана порівняльна схема, отримана накладанням в графічному редакторі геометрії, що була отримана за результатами моделювання DEFORM 2D, на геометрію напівфабрикату відповідно до креслення.

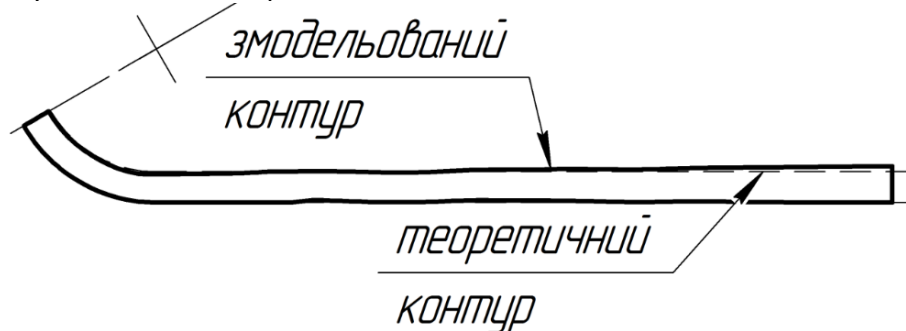


Рисунок 20 – Схема для оцінки відповідності геометрії витягнутого напівфабрикату розрахунковій геометрії

На рис. 21 показані числові результати порівняння двох геометрій.

Як видно з рис. 20 в результаті витягування маємо прогнозоване збільшення товщини у верхній частині горловини напівфабрикату та потоншення в центральній. Поверхня облицювання має незначну, але небажану хвилястість поверхні. За початкової товщини вихідної заготовки $S = 1$ мм потовщення складає 18%, потоншення – 6% (рис. 21).

Також на рис. 21 на зовнішній поверхні напівфабрикату позначені координати точок, найбільш віддалених від зовнішньої поверхні розрахункової геометрії кумулятивного

облицювання. Як видно з рис. 21 таких точок три, що відповідає кількості попередніх переходів витягування. Максимальне відхилення складає 0,07 мм.

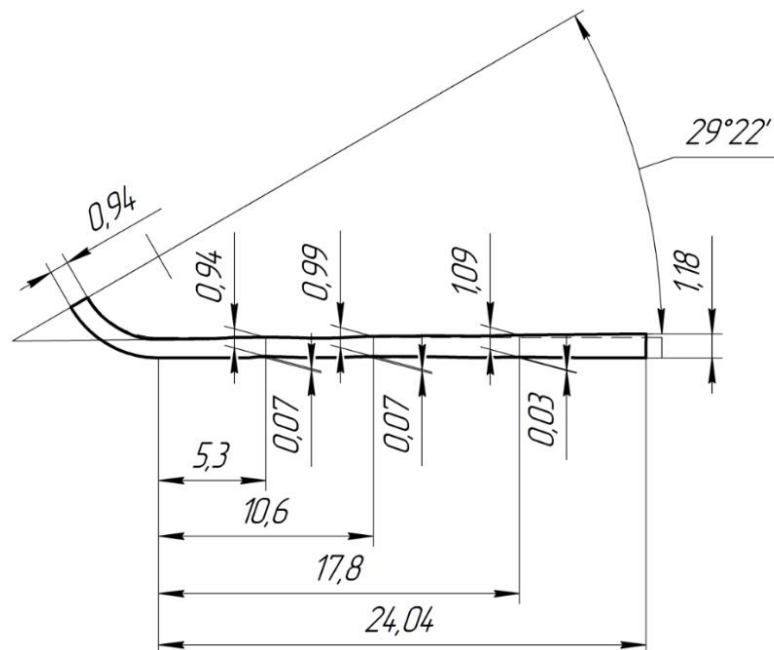


Рисунок 21 – Результат оцінки невідповідності геометрії витягнутого напівфабрикату та розрахункової геометрії

І якщо хвилястість можна спробувати усунути за допомогою підбору геометрії пуансона (зменшенням кута) та калібрування заготовки в кінці робочого ходу, то уникнути зміни товщини за даної схеми деформування неможливо.

Оцінити вплив такого спотворення геометрії витягнутого облицювання на її роботу в складі готового виробу можна розрахунковим шляхом, використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення, або за результатами натурних випробувань готового виробу.

Для перевірки впливу геометрії кумулятивного облицювання на бронепробиття було проведено у програмному середовищі Ansys Autodyn комп'ютерне моделювання процесу бронепробиття кумулятивним струменем ідеальної та отриманої в результаті моделювання у DEFORM 2D геометрій кумулятивного облицювання. Розрахункова модель процесу показана на рис. 22.

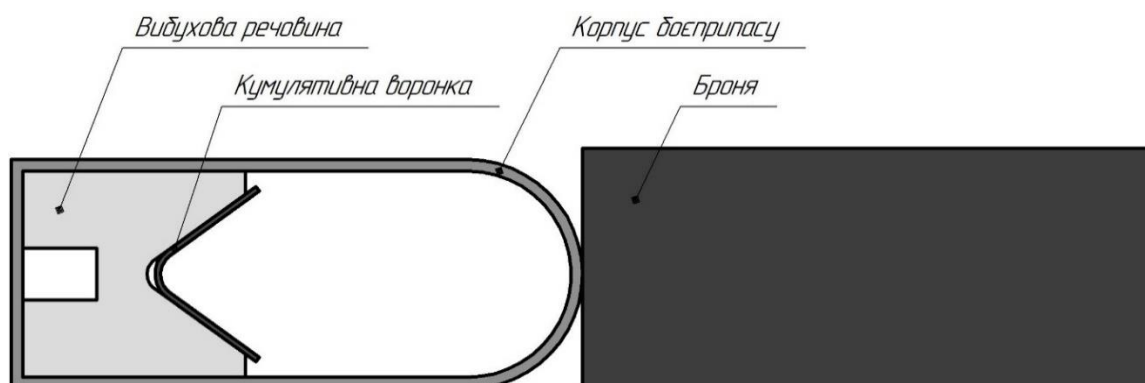
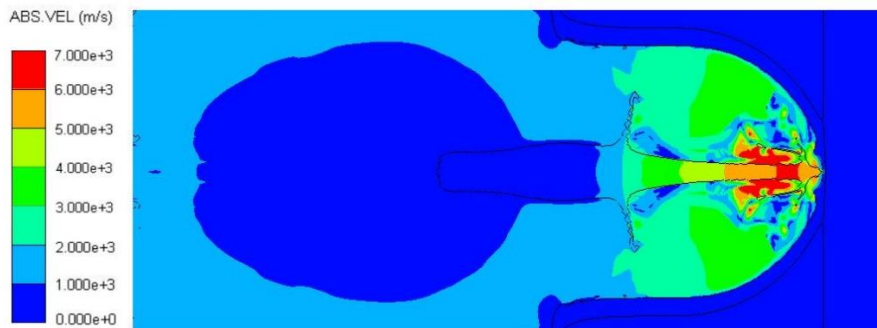


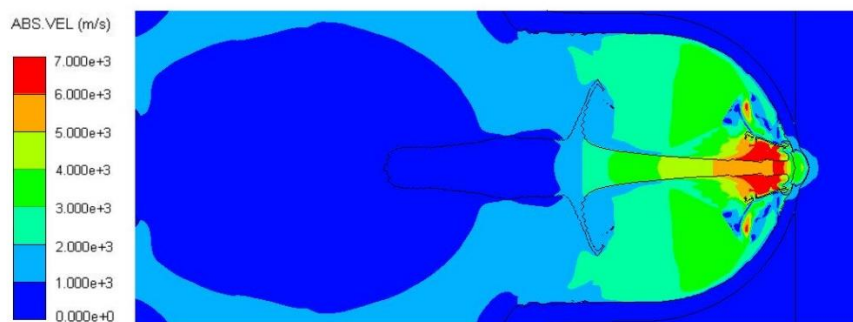
Рисунок 22 – Розрахункова модель процесу

Товщина броні – 100 мм, матеріал броні – Steel 4340 (аналог Сталі 40X2H2MA), матеріал корпусу – Steel 1006 (аналог Сталі 08пс), вибухова речовина – Comp В. Для порівняння впливу геометрії кумулятивного облицювання на бронепробиття на рис. 23 показаний розподіл

швидкостей в момент початку бронепробиття для ідеальної (а) та змодельованої (б) геометрій. Максимальна швидкість для обох варіантів досягає приблизно 6000 км/с. Також розподіл швидкостей вздовж кумулятивного струменя майже не відрізняється для обох варіантів кумулятивного облицювання, що вказує про незначний вплив різниці геометрії на швидкість кумулятивного струменя.



а



б

Рисунок 23 – Розподіл швидкостей вздовж кумулятивного струменя в момент початку бронепробиття

Для більш наочного результату на рис. 24 показаний графік розподілу швидкостей, де струмінь 1 відповідає ідеальній геометрії кумулятивного облицювання, струмінь 2 – змодельованій. З графіку видно, що різниця результатів не є великою, з чого можна зробити попередній висновок про те, що це не повинно значно вплинути на бронепробиття.

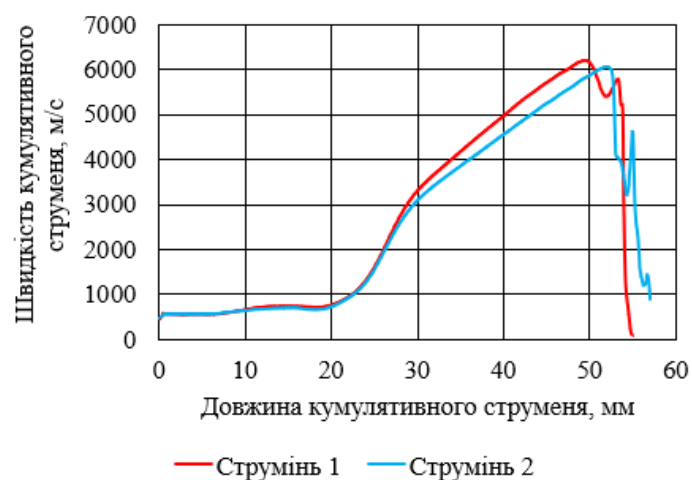
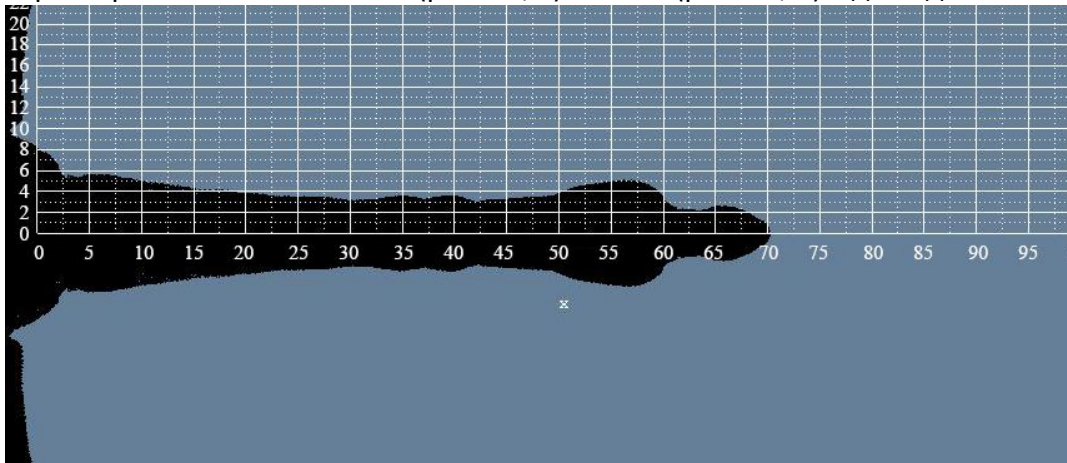
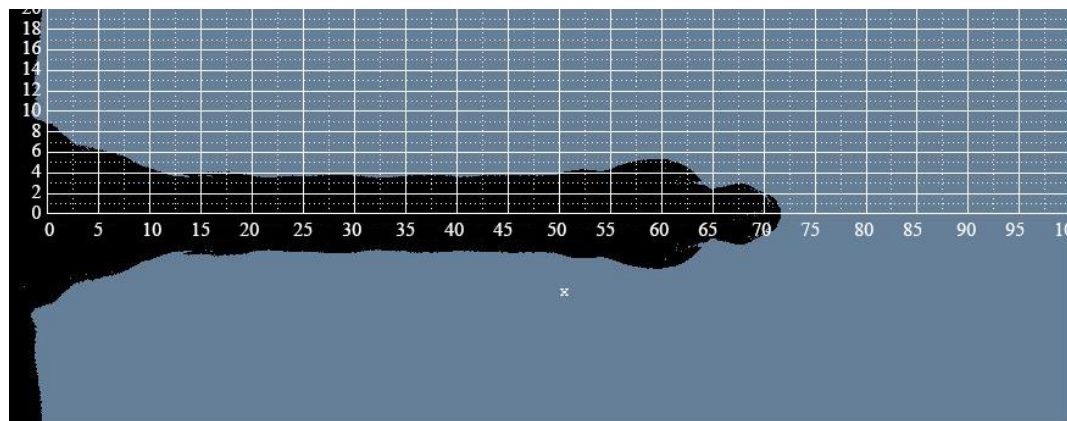


Рисунок 24 – Графік розподілу швидкостей вздовж кумулятивного струменя в момент початку бронепробиття

На рис. 25 показаний результат бронепробиття для спроектованої (а) та змодельованої (б) геометрії. Пробиття складо 70 мм (рис. 25, а) і 72 мм (рис. 25, б) відповідно.



а



б

Рисунок 25 – Пробиття кумулятивного струменя з облицюванням:

а – спроектованої геометрії, б – змодельованої геометрії

Довжини і форми пробитих отворів лише трохи відрізняються один від одного, що свідчить про незначний вплив неточності геометрії облицювання, отриманого витягуванням, на його роботу в складі готового виробу.

У відповідності до розробленої технології було спроектоване експериментальне оснащення (рис. 26) та виконане штампування (витягування) напівфабрикату кумулятивного облицювання (рис. 27).



Рисунок 26 – Експериментальне оснащення



Рисунок 27 – Результати витягування напівфабрикату кумулятивного облицювання:
 а – технологічні переходи витягування напівфабрикату, б – вигляд напівфабрикату після витягування

Після витягування отриманий напівфабрикат розрізали навпіл і виміряли товщину стінки в 6 точках двома різними приладами: мікроскопами SEM та Optika. На рис. 28 показано напівфабрикат з відміченими точками вимірювання та відстанями до них. Товщина стінки у вимірних точках вказана у табл. 1.

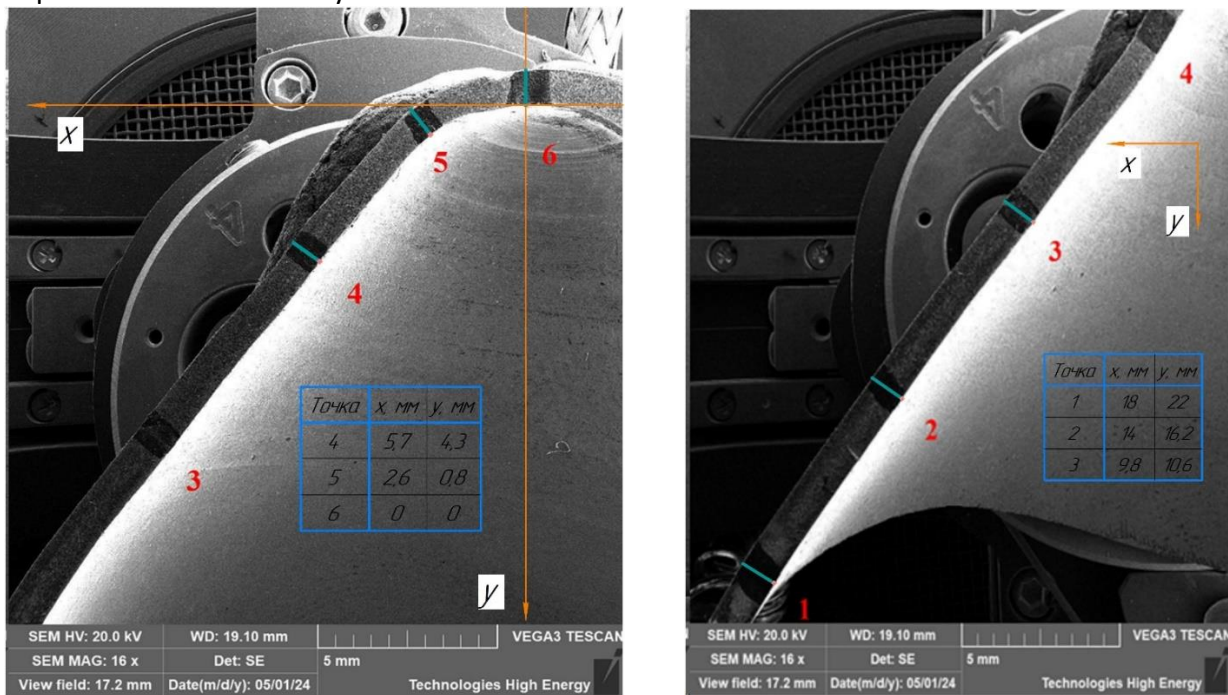


Рисунок 28 – Вимірювання товщини напівфабрикату

Таблиця 1 – Товщина стінки напівфабрикату

Товщина стінки, мкм	Номер досліджу					
	1	2	3	4	5	6
SEM						
мінімальна	1114,21	1088,99	1069,87	898,2	911,45	950,9
максимальна	1131,57	1104,44	1081,89	920,58	932,99	961,08
середня	1122,63	1100,08	1074,49	907,12	922,28	955,89
Optika						
мінімальна	1105	1066	1016	911	905	933
максимальна	1121	1086	1035	949	962	961
середня	1115	1075,2	1027	926,7	928,3	950,8

Результати експерименту підтверджують, що при виготовленні кумулятивного облицювання витягуванням відбувається зміна товщини матеріалу заготовки, а на поверхні облицювання виникає незначна хвилястість. Причому в точках замірів 4, 5 та 6 товщини стінки штампованого напівфабрикату практично співпадають з результатами моделювання в DEFORM 2D (розбіжність розмірів не перевищує 0,02 мм). Лише ближче до основи конуса (точка 1) результати моделювання дають завищений ступінь збільшення товщини у порівнянні з реальним (18% та 12% відповідно).

Зменшення товщини стінки біля вершини та хвилястість поверхні кумулятивного облицювання можуть на практиці негативно вплинути на глибину бронепробиття. Однак результати комп'ютерного моделювання роботи боєприпасу по цілі такого впливу не виявили. Тому для остаточної оцінки впливу на глибину бронепробиття фактичної неточності кумулятивного облицювання, отриманого витягуванням, необхідне проведення натурного експерименту.

Висновки

Результати досліджень технологічних особливостей виготовлення кумулятивних облицювань для боєприпасів калібром 40 мм свідчать про те, що серед можливих варіантів отримання подібного типу деталей штампуванням найменш витратним способом є витягування.

За результатами моделювання в програмному середовищі DEFORM була розроблена та реалізована на практиці технологія виготовлення кумулятивного облицювання багатоопераційним витягуванням (чотири операції витягування без проміжних термічних обробок).

За результатами чисельних та експериментальних досліджень встановлено, що облицювання, виготовлене витягуванням, має незначні відхилення фактичної геометрії від проектної (зміна вихідної товщини, хвилястість поверхні), які можуть вплинути на глибину бронепробиття боєприпасу.

В свою чергу комп'ютерне моделювання у програмному середовищі Ansys Autodyn роботи по цілі 40 мм боєприпасу із використанням штампованого облицювання не виявило суттєвого впливу відхилень геометрії на глибину бронепробиття для даного типу боєприпасів у порівнянні з проектною.

Для підтвердження або спростування отриманих результатів щодо незначного впливу відхилень геометричних розмірів штампованого облицювання на глибину бронепробиття необхідне проведення натурного експерименту по роботі по цілі боєприпасу із використанням даного облицювання. Позитивні результати досліджень дозволять знизити вимоги щодо точності виготовлення кумулятивного облицювання, що, в свою чергу, дозволить спростити та прискорити виготовлення кумулятивних боєприпасів калібром 40 мм, а також знизити їх собівартість.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Bohanek, V., Dobrilović M. and Škrlec, V. "The efficiency of linear shaped charges", *Tehnički vjesnik*, vol.21, no.3, pp. 525-531, 2014. [Online]. URL : <https://hrcak.srce.hr/123317>.

2. Mehmannaavaz H, Ramezani A, Nabakhteh MA, Liaghat G. A practical review study on shaped charge in the last two decades (2000–2020). *International Journal of Protective Structures*. 2021;12(4): 665-693. <https://doi.org/10.1177/20414196211017923>
3. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1: Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Под ред. Е.И. Семенова. 1985. – 568 с., ил.
4. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1987. – Т. 3: Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. 1987. – 384 с., ил.
5. Лаптев А.М., Ткаченко Я.Ю., Жабин В.И. Построение диаграммы для определения коэффициента трения в формуле Леванова по методу осадки кольца. // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 3(28). – С. 129-132.
6. Околович Г. А. Штамповые стали для холодного деформирования металлов: Монография / Г. А. Околович; Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. Изд. 2-е, переработанное, дополненное. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010, 202 с.
7. Методы расчета температурного режима штампов. URL : <https://terrakolor.ru/obemnaya-shtampovka/667-metody-rascheta-temperaturnogo-rezhima-shtampov.html>
8. Орлюк М.В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2017. – № 2(45). – С. 22-29. URL : [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(45\)_2017/article/6.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf), <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27990>
9. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с., ил.
10. Стеблюк В.І., Орлюк М.В., Шкарлута Д.Б. Витягування вісесиметричних тонкостінних виробів із нержавіючої сталі 04Х18Н9Т. // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр.* – Краматорськ: ДДМА, 2007. – С. 268-270.

References

1. Bohanek, V., Dobrilović M. and Škrlec, V. "The efficiency of linear shaped charges", *Tehnički vjesnik*, vol.21, no.3, pp. 525-531, 2014. [Online]. Available from : <https://hrcak.srce.hr/123317>.
2. Mehmannaavaz H, Ramezani A, Nabakhteh MA, Liaghat G. A practical review study on shaped charge in the last two decades (2000–2020). *International Journal of Protective Structures*. 2021;12(4): 665-693. <https://doi.org/10.1177/20414196211017923>
3. Kovka i shtampovka: Spravochnik. V 4-kh t. / Red. sovet: Ye.I. Semenov (pred.) i dr. - Moscow: Mashinostroenie, 1985. - T. 1: Materiali i nagrev. Oborudovanie. Kovka / Pod red. Ye.I. Semenova. 1985. – 568 s., il.
4. Kovka i shtampovka: Spravochnik. V 4-kh t. / Red. sovet: Ye.I. Semenov (pred.) i dr. – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – Т. 3: Kholodnaya obemnaya shtampovka / Pod red. G.A. Navrotskogo. 1987. – 384 s., il.
5. Laptev, A.M., Tkachenko, Ya.Yu., Zhabin, V.I. Postroenie diagrammi dlya opredeleniya koeffitsienta treniya v formule Levanova po metodu osadki koltsa. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnikh trudov*. – Kramatorsk: DGMA, 2011. – № 3(28). – S. 129-132.

6. Okolovich G. A. Shtampovie stali dlya kholodnogo deformirovaniya metallov: Monografiya / G. A. Okolovich; Altaiskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet im. I. I. Polzunova. Izd. 2-e, pererabotannoe, dopolnennoe. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2010, 202 s.
7. Metodi rascheta temperaturnogo rezhima shtampov. Available from : <https://terrakolor.ru/obemnaya-shtampovka/667-metody-rascheta-temperaturnogo-rezhima-shtampov.html>
8. Orliuk, M.V. Hranychni znachennia kryteriiv ruinuvannia pry modeliuvanni protsesiv vytiahuvannia v seredovyshchi DEFORM // Obrabotka materyalov davleniem: sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2017. – № 2(45). – S. 22-29. Available from : [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(45\)_2017/article/6.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf), <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27990>
9. Romanovskii V.P. Spravochnik po kholodnoi shtampovke. – 6-e izd., pererab. i dop. – Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979. – 520 s., il.
10. Stebliuk, V.I., Orliuk, M.V., Shkarluta, D.B. Vytiahuvannia visesymetrychnykh tonkostinnykh vyrobiv iz nerzhaviiuchoi stali 04Kh18N9T. // Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia obrobky tyskom v metalurhii i mashynobuduvanni: Tematychnykh zb. nauk. pr. – Kramatorsk: DDMA, 2007. – S. 268-270.