



ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ З
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА
ІНЖЕНЕРІЇ, ДРУГИЙ РІВЕНЬ,
ШВЕЦІЯ 2014

КТН КОРОЛІВСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Як вигин впливає на балістичні властивості Armoх
(How bending affects the ballistic properties of Armoх)

RICHARD TENGGREN



Abstract

Анотація

Ця дисертація розглядає, як вигин Arмох 500Т і Arмох 440Т впливає на балістичні властивості; також розглядається здатність Arмох 500Т і Arмох 440Т до вигину.

Мета полягає в розробці нових рекомендацій щодо вигину, дослідженні кореляції між радіусом вигину та збереженням балістичних характеристик, а також у наданні більш надійних рекомендацій з вигину для клієнтів Arмох. Нові рекомендації з вигину мають відповідати як механічним, так і балістичним вимогам.

Для досягнення цієї мети були проведені випробування на вигин, після чого вигнуті зразки використовувалися для вивчення деформації, викликаної вигином. Метод картування твердості (hardness mapping) був використаний для опису деформації у зразках через недостатню інформацію про механізми деформації в мартенситних сталях.

Для тестування балістичних характеристик були проведені випробування V50 на вигнутих зразках у компанії Åkers Krutbruk Protection AB. Значення V50 - це середнє значення з шести пострілів, три з яких зупинилися, а три пробili матеріал у діапазоні 40 м/с.

Результати випробувань показали, що вигин не має значного впливу на балістичні властивості випробуваних матеріалів та комбінацій боєприпасів.

Висновки, отримані за результатами тестувань, свідчать про те, що вигин не має суттєвого впливу на балістичні властивості досліджених матеріалів та боєприпасів, а рекомендації щодо вигину були значно покращені.

Ключові слова: Вигин (Bending), Балістика (Ballistics), Балістичні властивості (Ballistic properties), Arмох, Адіабатичне зрушення (Adiabatic shearing), Броня (Armour), Броньова сталь (Armour steel).

Зміст (Table of Contents)

1. Вступ (Introduction)	1
1.1 Інформація про компанію (Company information)	1
1.2 Передумови (Background)	1
1.3 Мета (Purpose)	2
1.4 Методи (Methods)	2
2. Теоретичні основи – Пластична деформація (Theory – Plastic forming)	3
2.1 Пластична деформація (Plastic forming)	3
2.2 Вигин (Bending)	3
2.3 Вигин у V-пуансоні (V-die bending)	8
3. Теоретичні основи – Балістика (Theory - Ballistics)	11
3.1 Вступ до балістики (Intro of ballistics)	11
3.2 Проникнення та перфорація (Penetration and perforation)	11
3.3 Режими балістичного руйнування (Ballistic failure modes)	12
3.4 Адіабатичне зрушення (Adiabatic shearing)	13
3.5 Стандарти загроз (Threat standards)	13
3.6 Боєприпаси (Ammunition)	14
3.7 Балістичний тест V50 (V50 ballistic test)	17
4. Методика (Method)	21
4.1 Матеріали (Materials)	21
4.2 Боєприпаси (Ammunition)	22
4.3 Зразки (Specimens)	22
4.4 Металографія (Metallography)	23
4.5 Випробування мікротвердості (Microindentation hardness test)	23
4.6 Вигин зразків (Bending of specimens)	25
4.7 Балістичні випробування зразків (Ballistic test of specimens)	26
5. Результати (Results)	28
5.1 Металографія (Metallography)	28
5.2 Випробування мікротвердості (Microindentation hardness test)	34
5.3 Вигин зразків (Bending of specimens)	37
5.4 Балістичні випробування зразків (Ballistic test of specimens)	37

6. Обговорення (Discussion)	42
6.1 Металографія (Metallography)	42
6.2 Випробування мікротвердості (Microindentation hardness test)	42
6.3 Вигин зразків (Bending of specimens)	43
6.4 Балістичні випробування зразків (Ballistic test of specimens)	44
7. Пропозиції для подальших досліджень (Proposals to further studies)	45
8. Висновки (Conclusion)	46
9. Подяки (Acknowledgements)	47
10. Список літератури (References)	48

Список рисунків (List of Figures)

Figure 1. Три різні послідовності та розподіл напруги під час згину. (Стор. 4)

Figure 2. Сила згину як функція глибини пуансона. (Стор. 5)

Figure 3. Розподіл моменту згину. (Стор. 6)

Figure 4. Розподіл напруги в згині: зліва – еластично-пластична фаза, справа – пластична фаза з урахуванням зміцнення. (Стор. 7)

Figure 5. Визначення параметра C . (Стор. 7)

Figure 6. Визначення ефективного важеля моменту у V-згинанні. (Стор. 8)

Figure 7. Ілюстрація згину в V-прес-формі та опис компонентів. (Стор. 8)

Figure 8. Різниця між повітряним згином і нижнім згином. (Стор. 9)

Figure 9. При відносно тонких листах радіус пуансона не впливає на форму згину. (Стор. 9)

Figure 10. Накладання розподілу напруг від згину та вивільнення навантаження, що дає залишковий розподіл напруг у поперечному перерізі. (Стор. 10)

Figure 11. Різні режими руйнування при попаданні снаряда в ціль. (Стор. 12)

Figure 12. Пуля з повним металевим оболонковим покриттям (FMJ) ліворуч і бронебійна пуля (AP) праворуч. (Стор. 15)

Figure 13. Креслення 20 мм фрагментуючого імітаційного снаряда (FSP). (Стор. 16)

Figure 14. Стенд для випробувань у типовому тесті V50. (Стор. 18)

Figure 15. Процедура випробувань методом підвищення та зниження швидкості (Up and Down test procedure). (Стор. 20)

Figure 16. Схематичне зображення розташування вирізів для одного листа та назви зразків (Armoх 500T, $t=3$ мм). (Стор. 22)

Figure 17. Схематичне зображення ліній, де проводилися профілі твердості. (Стор. 24)

Figure 18. Схематичне зображення положення відбитків твердості. (Стор. 24)

Figure 19. Розподіл відбитків твердості на зігнутому зразку. (Стор. 25)

Figure 20. Мікроструктура нездеформованого Armoх 500T, мартенситна мікроструктура, 50х. (Стор. 28)

Figure 21. Мікроструктура нездеформованого та відпущеного Armoх 500T із видимими колишніми аустенітними зернами, 50х. (Стор. 28)

Figure 22. Мікроструктура опуклої сторони згину, Armoх 500T, товщина 4 мм, радіус згину 12 мм, 50х. (Стор. 29)

Figure 23. Мікроструктура нейтральної площини, Armoх 500T, товщина 4 мм, радіус згину 12 мм, 50х. (Стор. 29)

Figure 24. Мікроструктура увігнутої сторони згину, Armoх 500T, товщина 4 мм, радіус згину 12 мм, 50х. (Стор. 30)

Figure 25. Мікроструктура опуклої сторони згину, Armoх 500T, товщина 6.5 мм, радіус згину 19.5 мм, 50х. (Стор. 30)

- Figure 26.** Мікроструктура нейтральної площини, Агмох 500Т, товщина 6.5 мм, радіус згину 19.5 мм, 50х. (Стор. 31)
- Figure 27.** Мікроструктура увігнутої сторони згину, Агмох 500Т, товщина 6.5 мм, радіус згину 19.5 мм, 50х. (Стор. 31)
- Figure 28.** Колишні аустенітні зерна на опуклій стороні згину, Агмох 500Т, товщина 4 мм, радіус згину 12 мм, 50х. (Стор. 32)
- Figure 29.** Колишні аустенітні зерна у нейтральній площині, Агмох 500Т, товщина 4 мм, радіус згину 12 мм, 50х. (Стор. 32)
- Figure 30.** Колишні аустенітні зерна на увігнутій стороні згину, Агмох 500Т, товщина 4 мм, радіус згину 12 мм, 50х. (Стор. 33)
- Figure 31.** Колишні аустенітні зерна на опуклій стороні згину, Агмох 500Т, товщина 6.5 мм, радіус згину 19.5 мм, 50х. (Стор. 33)
- Figure 32.** Колишні аустенітні зерна у нейтральній площині, Агмох 500Т, товщина 6.5 мм, радіус згину 19.5 мм, 50х. (Стор. 34)
- Figure 33.** Колишні аустенітні зерна на увігнутій стороні згину, Агмох 500Т, товщина 6.5 мм, радіус згину 19.5 мм, 50х. (Стор. 34)
- Figure 34.** Профіль твердості через товщину Агмох 500Т, радіус згину 12 мм, товщина 4 мм. (Стор. 35)
- Figure 35.** Профіль твердості через товщину Агмох 500Т, радіус згину 19.5 мм, товщина 6.5 мм. (Стор. 35)
- Figure 36.** Карта твердості Агмох 500Т, товщина 4 мм, радіус 12 мм, 1452 відбитки. (Стор. 36)
- Figure 37.** Результати балістичних випробувань Агмох 500Т, товщина 6.5 мм, 5.56x45 SS109. (Стор. 38)
- Figure 38.** Результати балістичних випробувань Агмох 500Т, товщина 6.5 мм, 7.62x51 NATO Ball. (Стор. 38)
- Figure 39.** Результати балістичних випробувань Агмох 440Т, товщина 8 мм, 5.56x45 SS109. (Стор. 39)
- Figure 40.** Результати балістичних випробувань Агмох 440Т, товщина 8 мм, 7.62x51 NATO Ball. (Стор. 39)
- Figure 41.** Результати балістичних випробувань Агмох 500Т, товщина 12 мм, 20 мм FSP. (Стор. 40)
- Figure 42.** Результати балістичних випробувань Агмох 440Т, товщина 12 мм, 7.62x39 API BZ. (Стор. 40)
- Figure 43.** Результати балістичних випробувань Агмох 440Т, товщина 12 мм, 20 мм FSP. (Стор. 41)

Список таблиць (List of Tables)

Table 1. Розміри 20 мм фрагментуючого імітаційного снаряда. (Стор. 16)

Table 2. Механічні властивості Агмох. (Стор. 21)

Table 3. Хімічний склад Агмох. (Стор. 21)

Table 4. Різні кути згину в залежності від якості та розмірів. (Стор. 21)

Table 5. Різні типи боєприпасів для кожної якості та розміру. (Стор. 22)

Table 6. Розподіл зразків для згину. (Стор. 26)

Table 7. Результати випробувань на згин Агмох. (Стор. 37)

Термінологія (Terminology)

Цей розділ містить перелік акронімів та символів, що використовуються у звіті.

Акроніми (Acronyms):

- **UTS** – Ultimate Tensile Strength (Межа міцності на розтяг)
- **EME** – EM Eriksson
- **API** – Armor Piercing Incendiary (Бронебійно-запалювальний)
- **FSP** – Fragment Simulating Projectile (Фрагмент-імітаційний снаряд)
- **BHN** – Brinell Hardness Number (Число твердості за Брінеллем)
- **UHH** – Ultra High Hardness (Надвисока твердість)
- **FMJ** – Full Metal Jacket (Повнометалева оболонка)

Позначення (Notation):

Symbol description

T_m Melting temperature

t Thickness

$F_{b,Rm}$ Bending force
according to UTS

$F_b \sigma_y$ Bending force
according to yield
strength

F_y Bending force, elastic R Punch
radius

R_i Internal bend radius W_d Die
width

L Work piece width R_m Ultimate
tensile strength R_e Yield point

M_f Final bending moment

Symbol description

a Width of elastic zone σ_y Yield
stress

α Bending angle

β Angle of bend

$\Delta\alpha$ Springback angle M_s Initial
bending moment M Bending
moment M_{max} Max bending
moment

C Parameter, function of l/t

l Effective moment arm

Tm – Температура плавлення

- **t** – Товщина
- **Fb,Rm** – Сила згину
відповідно до межі міцності
на розтяг
- **Fb,σy** – Сила згину
відповідно до межі плинності
- **Fy** – Сила згину, еластична
- **R** – Радіус пуансона
- **Ri** – Внутрішній радіус згину
- **Wd** – Ширина матриці
- **L** – Ширина заготовки
- **a** – Ширина еластичної зони
- **σy** – Межа плинності
- **α** – Кут згину
- **β** – Кут згину
- **Δα** – Кут пружного
повернення
- **Ms** – Початковий момент
згину
- **M** – Момент згину
- **Mmax** – Максимальний
момент згину
- **C** – Параметр, функція від l/t
- **l** – Ефективний важіль
моменту
- **Rm** – Межа міцності на
розтяг
- **Re** – Межа пружності
- **Mf** – Кінцевий момент згину

1. Вступ (Introduction)

1.1 Інформація про компанію (Company information)

SSAB – це виробник сталі, включаючи броньовану сталь, що використовується для захисту людського життя. Компанія розробляє, виробляє та продає важкі сталеві пластини в місті Окселесунд, розташованому на південь від Стокгольма, на узбережжі Балтійського моря. Армох – одна з броньованих сталей, вироблена компанією SSAB, і вона доступна в діапазоні твердості від катаної гомогенної броні (280 BHN) до надвисокотвердої сталі (>650 BHN). Сталі Армох відомі своєю високою ударною в'язкістю відносно твердості. Мета – запропонувати високу ефективність маси завдяки вазі, що є критичним фактором у багатьох проєктах військової техніки.

Виробництво Армох базується на металургії залізної руди через доменні печі, знесірчування сталі в конверторі LD. Вакуумна обробка дає змогу отримати дуже чисту сталь. Завдяки сучасному прокатному стану з чотирма валками можливе прокатування з великими ступенями деформації, що призводить до отримання дрібнозернистої мікроструктури в Армох. Для досягнення необхідних вимог щодо твердості або ударної в'язкості використовуються різні методи термообробки.

Клієнти Армох – провідні виробники захисного обладнання по всьому світу. Армох переважно використовується для створення всіх типів броньованих військових машин, а також для бронювання цивільних автомобілів і будівель. Використання Армох значно відрізняється між клієнтами.

1.2 Передумови (Background)

Сталі Армох є мартенситними сталями, які виготовляються за спеціальним технологічним процесом, що закінчується прокаткою, гартуванням і відпуском. Це оброблення надає Армох відмінні механічні властивості, такі як висока твердість, міцність на розрив і хороша ударна в'язкість. SSAB рекомендує вторинну обробку, таку як різання, зварювання та формування при температурах нижче 200 °C, щоб уникнути перевідпуску та погіршення відмінних механічних властивостей у зонах, що зазнали теплового впливу.

Загальним процесом формування серед клієнтів Армох є повітряне згинання. SSAB наразі пропонує рекомендації щодо згину для своїх клієнтів, які були випущені у 1999 році та частково оновлені у 2012 році. Мета цих рекомендацій – інформування клієнтів про механічні обмеження матеріалу [4].

Однак сучасні методи обробки та технології постійно розвиваються, тому актуальність існуючих рекомендацій потребує подальшої перевірки. SSAB має на меті оцінити вплив геометричних та матеріальних параметрів на поведінку згину та розробити оновлені рекомендації, що враховуватимуть останні досягнення у виробництві броньованих сталей. Це дослідження спрямоване на розширення знань щодо можливостей та обмежень матеріалу в контексті сучасних методів формування.

1.3 Мета (Purpose)

Метою цього проекту є розробка нових рекомендацій щодо згину, дослідження взаємозв'язку між радіусом згину та балістичними характеристиками, а також пояснення змін у мікроструктурі внаслідок згину та їх впливу на балістику. SSAB прагне запропонувати своїм клієнтам покращені та більш надійні рекомендації щодо згину без негативного впливу на балістичні характеристики матеріалу.

1.4 Методи (Methods)

Для дослідження впливу згину на балістичні характеристики Arctox буде проведено серію випробувань на згин та балістичних тестів, а також металографічні дослідження.

Крім цих випробувань, буде здійснено літературний огляд, щоб отримати розуміння основних причин та механізмів, які впливають на кінцеві результати досліджень.

2. Теорія – Пластичне формування (Theory – Plastic forming)

2.1 Пластичне формування (Plastic forming)

Визначення пластичного формування означає, що під час пластичної деформації змінюється форма металу, зберігаючи при цьому той самий об'єм і масу. Листовий метал зазвичай формується в холодному стані при температурі, що не перевищує $0.3 \times T_m$. Гаряче формування листового металу здійснюється при мінімальній температурі $0.6 \times T_m$. Перевагами гарячого формування є рекристалізація матеріалу та легкість його формування, однак недоліком є те, що поверхня не буде такою якісною, як при холодному формуванні. Формування в холодному стані забезпечує вищу міцність, ніж гаряче формування [6].

Коли металевий матеріал зазнає пластичної деформації, концентрація дислокацій зростає, що призводить до підвищення твердості, відомого як наклеп (work hardening). Дислокації додають додаткову енергію в систему. Оскільки природа прагне до стану з найменшою енергією (фактично вільної енергії при постійному зовнішньому тиску та температурі), можна очікувати, що дислокації можуть спонтанно зникати з матеріалу. Це також частково відбувається, якщо температура достатньо підвищується для збільшення рухливості атомів. Коли дислокації стають більш рухливими, ніж за кімнатної температури, вони взаємодіють між собою та внутрішніми напруженнями в матеріалі [7]. Наклеп сприяє збільшенню необхідної сили для формування та зносу інструменту [6].

2.2 Згинання (Bending)

Згинання – це метод пластичної обробки, при якому листовий метал формується переважно згинальним моментом. Цей метод використовується для надання металу вигнутої форми. Найпоширенішим методом є повітряне згинання у V-пуансоні.

Згинальні роботи зазвичай виконуються на механічних або гідравлічних пресах. Машини для крайового обважнення використовуються здебільшого для малих серій [8].

Згинання є одним із найпоширеніших процесів формування листового металу і включає кілька різних методів. Найбільш відповідний метод залежить від кінцевої форми виробу та необхідного обсягу виробництва. До різних методів згинання належать: V-згинання, U-згинання, вільне згинання, роликове формування та роликове згинання [9]. У цьому дослідженні розглядається лише V-згинання, оскільки воно є основним предметом вивчення.

Під час згинання на опуклій стороні згину виникає розтягуюча напруга, тоді як на увігнутій стороні утворюється стискаюча напруга. Розтягуюча напруга збільшується зі зменшенням радіуса згину. Здатність матеріалу до згинання зазвичай визначається мінімальним радіусом згину, який можна використовувати без руйнування.

Зворотне пружинення (springback) викликане залишковими пружними деформаціями і зростає зі збільшенням межі плинності, наклепу та ширини матриці. Найбільший вплив на зворотне пружинення має межа плинності матеріалу. Щоб компенсувати ефект зворотного пружинення під час згинання, зазвичай використовується метод перегину (over bending) [8].

2.2.1 Згинальні сили (Bending forces)

Основним принципом згинання є перевищення межі плинності матеріалу, щоб відбулася пластична деформація. Під час згинання на опуклій стороні утворюється розтягуюча напруга, тоді як на увігнутій стороні виникає стискаюча напруга, як показано на рисунку 1 [9].

Цей процес подібний до прогину балки під навантаженням [10].

Між опуклою та увігнутою сторонами розташовується нейтральна вісь, де напруження дорівнює нулю. Коли перевищується межа плинності, матеріал починає зміцнюватися (наклеп), а пластична зона починає розширюватися в напрямку нейтральної осі з обох боків згину. Матеріал залишається еластичним навколо нейтральної осі, і розмір еластичної зони визначає величину зворотного пружинення після згину. Якщо згинання призводить до повної пластичної деформації, це означає, що зворотне пружинення буде мінімізовано [9].

Якщо в процесі згину відбувається руйнування або розтріскування, це відбувається на опуклій стороні згину [10].

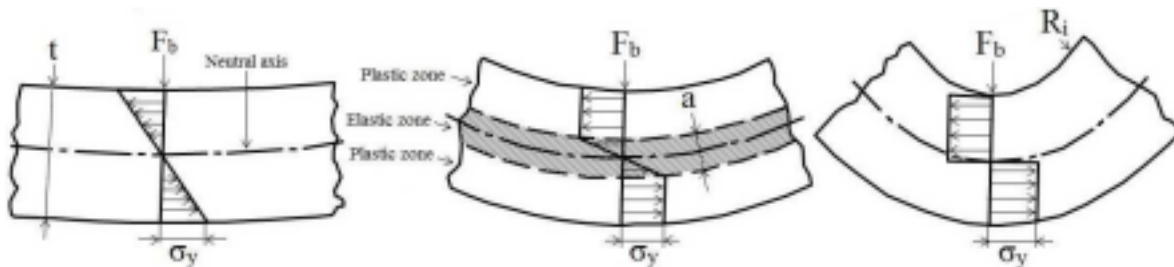


Рисунок 1. Три різні послідовності та розподіл напруги під час згину.

Відповідно до рисунку 2 нижче, згинальна сила **F_b** змінюється зі збільшенням глибини пуансона. Спочатку згинальна сила зростає лінійно до досягнення межі плинності матеріалу **σ_y**, після чого починається пластична деформація та наклеп. Під час початкової фази нижнього згину згинальна сила швидко зростає, як показано на рисунку 2 [9].

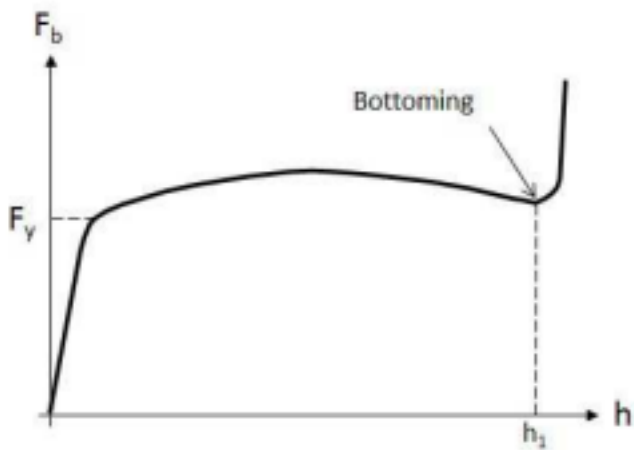


Рисунок 2. Сила згину як функція глибини пуансона.

На початковій стадії згину згинальний момент **M_s** (початковий момент згину) можна визначити рівнянням 1 до початку пластичної фази [9]:

$$M_s = \sigma_y \cdot W \quad (1)$$

$$W = \frac{L \cdot t^2}{6} \quad (2)$$

$$M_s = \frac{\sigma_y \cdot L \cdot t^2}{6} \quad (3)$$

де **W** – опір згину для прямокутного перерізу шириною **L** та товщиною **t**. Як зазначено вище, рівняння 1 застосовується лише на початковій стадії процесу згину, до межі плинності. Коли починає розвиватися пластична зона, необхідне нове рівняння, як показано у рівнянні 4. Ширина еластичної зони позначена як **a** [9].

$$M = \sigma_y \left(\frac{La^2}{6} + \frac{L(t^2 - a^2)}{4} \right) = \sigma_y \frac{L(3t^2 - a^2)}{12} \quad (4)$$

У кінці послідовності згинання пластична зона розширюється до нейтральної осі, і еластична зона зникає. Це призводить до рівняння 5, що описує кінцевий момент згину **M_f** [9]:

$$M_f = \frac{\sigma_y \cdot L \cdot t^2}{4} \quad (5)$$

Розподіл моменту згину під час згинання у V-матриці показано на рисунку 3. Згинальна сила **F_b** врівноважується двома реакційними силами на кожному краї V-матриці (**F_b/2**). Рух між матрицею та листом призводить до утворення сил тертя на кожному куті матриці. Сили тертя можна описати як **μ(F_b/2)**, і вони не впливають на розподіл моменту [9].

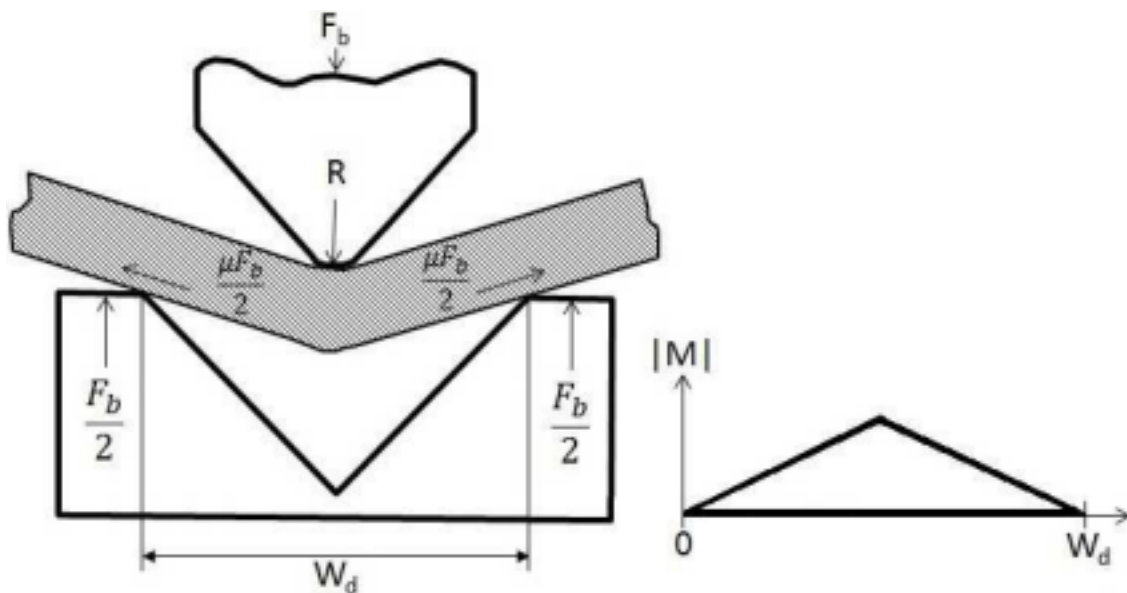


Рисунок 3. Розподіл моменту згину.

Максимальний момент виникає безпосередньо під пуансоном. Він досягає пікового значення в кінці послідовності згинання і може бути описаний рівнянням 6, де **W_d** позначає ширину матриці [9]:

$$M_{max} = \frac{F_b \cdot W_d}{4} \quad (6)$$

Рівняння 5 і рівняння 6 дають співвідношення для згинальної сили **F_b**, як описано у рівнянні 7 [9]:

$$F_{b, \sigma_y} = \frac{L \cdot t^2 \cdot \sigma_y}{W_d} \quad (7)$$

Згинальна сила також може бути виражена з урахуванням границі міцності на розрив матеріалу **UTS**, замість границі плинності, як описано у рівнянні 8 [9]:

$$F_{b, R_m} = \frac{L \cdot t^2 \cdot R_m}{W_d} \quad (8)$$

Рівняння вище містять кілька припущень: перше полягає в тому, що нейтральна вісь вважається незмінною під час згинання, що не завжди так. У кінці процесу згинання, коли деформація стає повністю пластичною, нейтральна вісь зміщується в бік увігнутої сторони згину. Це пояснюється тим, що подовження матеріалу на опуклій стороні згину більше, ніж стискання на увігнутій стороні. На це також впливають сили тертя між краєм матриці та листом, а також товщина матеріалу. Друге припущення полягає у тому, що наклеп не враховується, тобто матеріал вважається ідеально пластичним. Це означає, що рівняння 4, 5 та 7 справедливі лише для матеріалів без наклепу. При врахуванні наклепу розподіл напруги у згині виглядає, як показано на рисунку 4 [9].

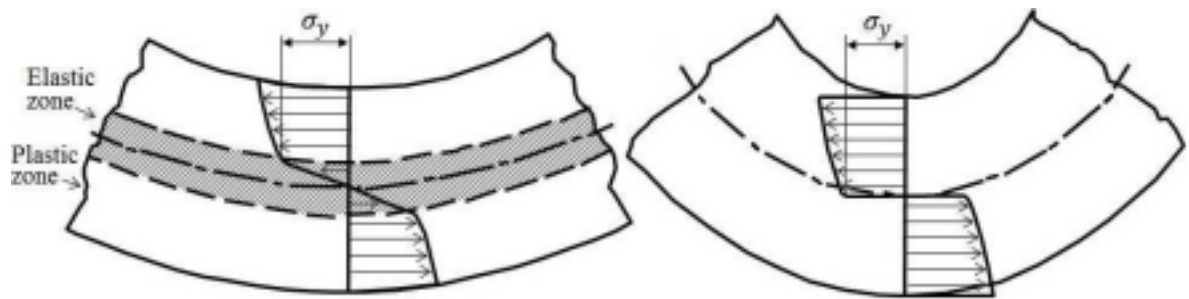


Рисунок 4. Розподіл напруги у згині: зліва – еластично-пластична фаза, справа – пластична фаза з урахуванням зміцнення.

Згинальна сила залежить від оберненої пропорції між шириною матриці та квадратом товщини листа Wd/t^2 . При зменшенні цього відношення згинальна сила збільшується. Якщо в рівняннях для згинальної сили використовувати середні значення межі плинності та границі міцності на розрив (UTS), буде враховано ефект зміцнення. Рівняння 9 враховує як геометрію інструменту, так і зміцнення матеріалу [9]:

$$F_b = \frac{C \cdot L \cdot t^2}{l} \cdot \frac{R_m + R_e}{2} \quad (9)$$

F_b = Bending force [N]

R_m = UTS [MPa]

L = Bend length [mm]

R_e = Yield point [MPa]

t = Workpiece thickness [mm]

C = Parameter

l = Effective moment arm [mm]

де:

F_b – згинальна сила [N]

L – довжина згину [мм]

t – товщина заготовки [мм]

l – ефективний важіль моменту [мм]

R_m – границя міцності на розрив [МПа]

R_e – межа плинності [МПа]

C – параметр

Параметр C є функцією ефективного важеля моменту та товщини матеріалу і визначається за допомогою **Рисунку 5** [9].

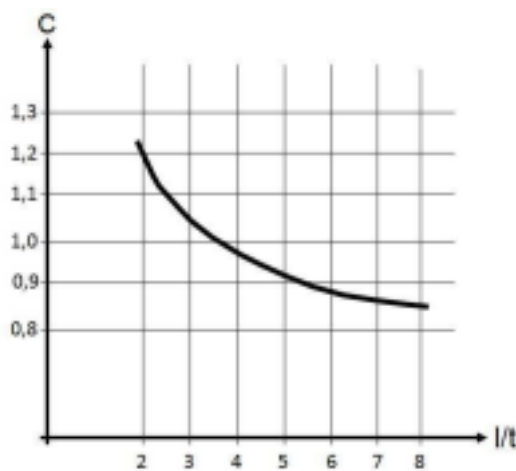


Рисунок 5. Визначення параметра C .

На **Рисунку 6** показано ефективний важіль моменту у V-згинанні, який використовується у **Рисунку 5** [9].

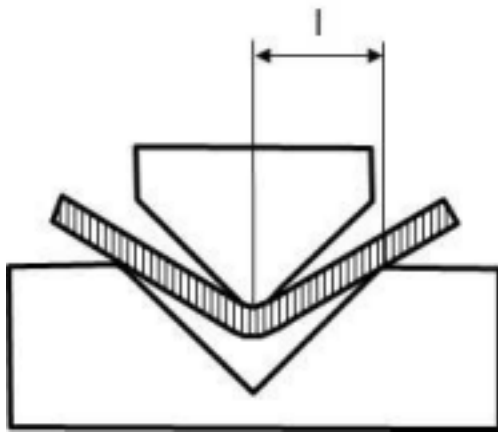


Рисунок 6. Визначення ефективного важеля моменту у V-згинанні.

Необхідна сила згину обернено пропорційна половині ширини матриці **l**, що дозволяє збільшити ширину матриці, якщо доступна сила недостатня для виконання згину [9].

2.3 V-згинання (V-die bending)

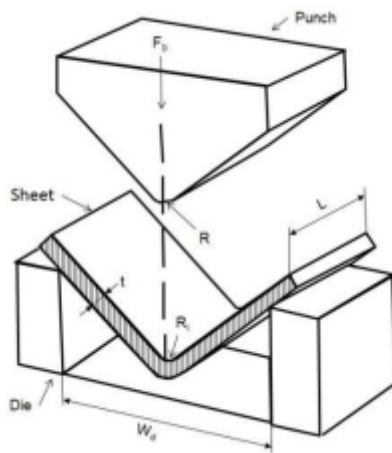


Рисунок 7. Ілюстрація V-згинання та опис компонентів

Налаштування інструменту для згину під кутом до 180° можуть бути використані у V-згинанні. Найпоширенішим є згинання під 90° , як показано на **Рисунку 7**.

Зазвичай згинання виконується, коли пуансон натискає на матеріал у V-подібній матриці, як схематично показано на **Рисунку 7**. Форма матеріалу при згині у інструменті залежить головним чином від співвідношення між шириною матриці та товщиною пластини.

Радіус кінчика пуансона повинен бути збільшений для підвищення міцності матеріалу. Якщо радіус пуансона занадто малий, існує ризик утворення тріщин.

V-згинання можна розділити на два типи: повітряне згинання (air bending) та контактне згинання (bottom bending), як показано на **Рисунку 8**. У цьому дослідженні розглядається лише повітряне згинання, тому контактне згинання виключено. Контактне згинання відбувається, коли пуансон змушує матеріал контактувати з матрицею, що є початковим етапом процесу кування [9].

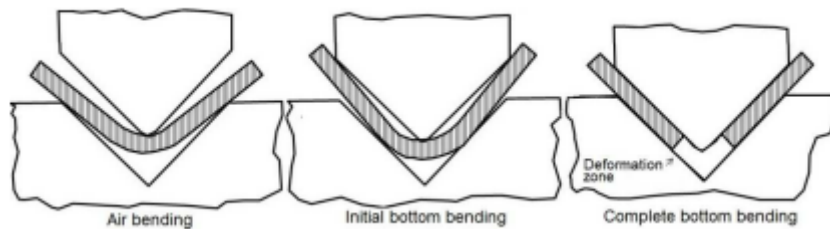


Рисунок 8. Різниця між повітряним згинанням та контактним згинанням.

2.3.1 Повітряне згинання (Air bending)

При повітряному згинанні листовий матеріал контактує лише з радіусами країв матриці, а рух інструменту припиняється до того, як лист досягне дна матриці, звідси й назва «повітряне згинання».

При повітряному згинанні тонколистового металу ($t < 3$ мм) радіус пуансона не впливає на внутрішній радіус згину. Внутрішній радіус згину залежить від співвідношення між товщиною листа та шириною матриці, а також від міцності матеріалу. При згинанні товстолистого металу ($t > 3$ мм) внутрішній радіус згину залежить від радіуса пуансона. Це показано на **Рисунку 9**.

Кут згину при повітряному згинанні контролюється лише довжиною ходу пуансона. Щоб компенсувати зворотне пружинення (springback), хід пуансона має бути достатньо довгим, щоб досягти бажаного кута згину [9].

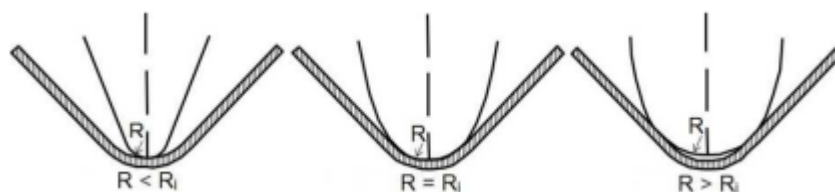


Рисунок 9. При згинанні відносно тонких листів радіус пуансона не впливає на форму згину. R – радіус пуансона, R_i – внутрішній радіус згину після розвантаження.

Під час згинання також відбувається незначне стоншення металу в зоні згину [10].

2.3.2 Springback

Під час згинання слід враховувати, що матеріал частково повертається у вихідне положення після зняття згинальної сили. Це явище називається зворотним пружиненням і зумовлене еластичною деформацією матеріалу. Разом із внутрішніми напруженнями, що виникають під час згинання, у перерізі зігнутого матеріалу утворюється залишковий розподіл напружень, як показано на **Рисунку 10**. Цей розподіл залишкових напружень залежить від ступеня пластичної деформації матеріалу, і саме ці залишкові напруження спричиняють зворотне пружинення [9].

Щоб уникнути руйнування у зоні згину, максимальна розтягувальна напружка має бути меншою за границю міцності матеріалу **UTS** [10].

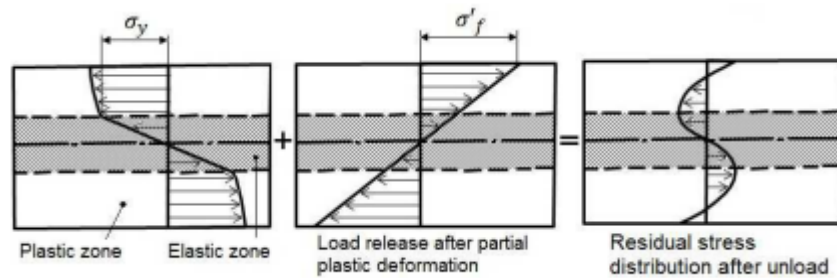


Рисунок 10. Накладення розподілу напружень від згинання та розвантаження створює залишковий розподіл напружень у поперечному перерізі.

Рисунок 10. Накладення розподілу напружень від згинання та розвантаження створює залишковий розподіл напружень у поперечному перерізі.

Якщо згинання призводить до повної пластичної деформації, наприклад при контактному згинанні, зворотне пружинення майже усувається. Однак при повітряному згинанні ефект зворотного пружинення зростає зі збільшенням міцності матеріалу та відношення ширини матриці до товщини **Wd/t**. Найбільший вплив на зворотне пружинення має межа плинності матеріалу. Збільшення радіуса пуансона також спричиняє більше зворотне пружинення через зменшення пластичної деформації [9].

Щоб компенсувати зворотне пружинення, виконується певний ступінь перегину (over-bending). Існують методи розрахунку величини кута перегину для компенсації зворотного пружинення [9].

SSAB провела емпіричний аналіз, результатом якого стало **Рівняння 10**, яке може бути використане для приблизного визначення кута перегину при повітряному згинанні на 90° та ширині матриці **10t** [9]:

$$\Delta\alpha = 0,0143R_e^{0,94} \cdot \left(\frac{R_t}{t}\right)^{0,1} \quad (10)$$

Типові значення зворотного пружинення для Arмох становлять від 10 до 20° [4].

3. Теорія – Балістика (Theory - Ballistics)

3.1 Вступ до балістики (Intro of ballistics)

Балістика – це наука про рухомі об'єкти. Політ снаряда можна розділити на три етапи: спочатку внутрішня балістика, яка визначає початкові умови польоту; далі зовнішня балістика, що описує траєкторію снаряда у повітрі; і, нарешті, термінальна балістика, що стосується процесу взаємодії снаряда з ціллю. Основна мета стрільби снарядом – подолання цілі [11].

Найпоширеніші завдання включають: проникнення або пробиття цілі за допомогою кінетичної або хімічної енергії; фрагментацію корпусу снаряда за допомогою вибухових речовин; вибух у зоні цілі за рахунок хімічної енергії вибухового заряду; а також розсіювання вантажу для виконання різних місій, таких як створення диму, освітлення або розповсюдження пропагандистських матеріалів [11].

3.2 Проникнення і пробиття (Penetration and perforation)

Проникнення визначається як утворення розриву в поверхні цілі внаслідок удару снаряда. Якщо після видалення залишків снаряда можна побачити світло крізь пробиту ціль, це означає, що відбулося повне пробиття [11].

При зіткненні снарядів із металевими мішенями існує широкий діапазон швидкостей удару. За швидкостей менше 250 м/с проникнення може бути пов'язане з загальною структурною динамікою мішені. За швидкостей 500–2000 м/с головним фактором стає локальна поведінка матеріалу мішені та самого снаряда. Розмір ураженої локальної зони приблизно у 2-3 рази перевищує діаметр снаряда від центру удару.

При ударі снаряда у мішень в обох тілах поширюються ударні хвилі. Від вільних бокових поверхонь снаряда всередину поширюються розрядні хвилі, що перетинають центральну вісь і генерують високі розтягувальні напруження. Якщо удар відбувається під кутом, у снаряді також утворюються згинальні напруження [11].

Якщо ударна хвиля досягає вільної поверхні мішені, вона може трансформуватися в розтягувальну хвилю, яка може призвести до руйнування мішені ще до безпосереднього пробиття. При повному пробитті мішені снаряд може змінити напрямок руху. Мішені можна розділити на чотири основні групи залежно від впливу межевої поверхні [11]:

- **Безмежна мішень:** не має впливу задньої поверхні.
- **Товста мішень:** вплив задньої поверхні відчувається після певного часу проникнення.
- **Мішень середньої товщини:** задня поверхня впливає на весь процес проникнення.
- **Тонка мішень:** градієнти напружень або деформації у всій товщині мішені є незначними.

Існує кілька механізмів руйнування мішеней при ударі, які залежать від властивостей матеріалу мішені та снаряда, швидкості удару, форми снаряда, геометрії підтримувальної структури мішені та інших факторів. Основні режими руйнування описані у розділі 3.3 [11].

3.3 Режими руйнування при балістичному ударі (Ballistic failure modes)

Існує кілька типів руйнування при балістичних випробуваннях, які представлені на **Рисунку 11**. Нижче наведено їх короткий опис.

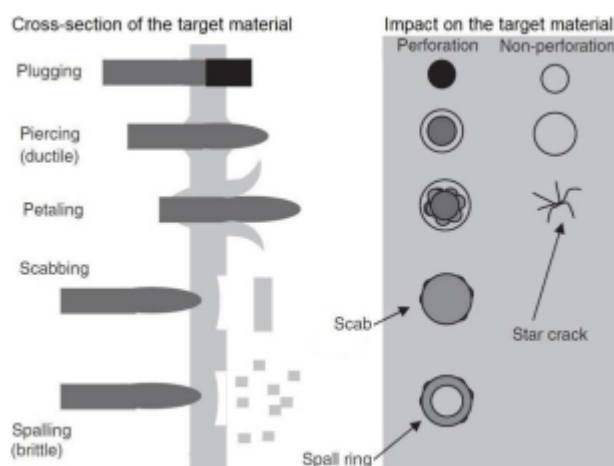


Рисунок 11. Різні режими руйнування при ударі снаряда в мішень.

Пробивання (Plugging) – найпоширеніше в матеріалах з відносно високою пластичністю і зазвичай виникає, коли швидкість удару снаряда близька до балістичного порогу.

Прошивання (Piercing) – явище, яке можна розділити на дві фази. Товстіші пластини часто зазнають руйнування саме за цим механізмом. Перша фаза складається з радіального зміщення матеріалу мішені, і в деяких випадках відбувається пробивання. Друга фаза включає пластичне витікання і плинність матеріалу мішені, що може трактуватися як текуча речовина у цій фазі.

Пелюсткування (Petaling) – відбувається, коли радіальні та окружні напруження є високими. Цей механізм руйнування характерний для випадків, коли швидкість удару снаряда близька до балістичного порогу.

Відшаровування (Scabbing) – спричиняється великими пластичними деформаціями, що починаються в тріщині при локальній неоднорідності. Обидва механізми (пелюсткування та відшаровування) є крихкими і зазвичай зустрічаються у слабких і менш щільних матеріалах. Радіальні тріщини найчастіше зустрічаються в керамічних матеріалах через те, що їхня міцність на розтяг нижча, ніж на стиск, але також цей процес можливий у деяких сталях.

Відшарування (Spalling) – є наслідком відбиття хвиль від задньої поверхні мішені. Цей механізм руйнування є дуже поширеним, особливо для матеріалів, що мають більшу міцність на стиск, ніж на розтяг [11].

3.4 Адіабатичне зсування (Adiabatic shearing)

Коли під час удару формується пробій (plug), відбувається адіабатичне зсування. Спочатку при ударі в матеріалі цілі утворюється локальна зона дуже інтенсивного зсуву. Оскільки цей процес відбувається дуже швидко, за лічені мілісекунди, мішень не встигає розпочати будь-який рух. В результаті цього в матеріалі утворюється локалізоване нагрівання. Через високу швидкість деформації та короткий часовий проміжок тепло не встигає розсіюватися. Висока температура призводить до ослаблення механічних властивостей матеріалу в цій зоні, що спричиняє локальну плинність і пластичне течіння. Даний процес продовжується самостійно, і в кінцевому підсумку пробій відокремлюється від мішені.

Зазвичай пробій руйнується, якщо швидкість пробиття перевищує мінімальну швидкість перфорації приблизно на 5-10%. Якщо використовуються снаряди з тупими носиками, ймовірність утворення пробою збільшується [11].

3.5 Стандарти загроз (Threat standards)

Практично кожна країна має власні стандарти для матеріалів балістичного захисту. Найпоширенішими стандартами, які використовують SSAB та їхні клієнти, є **STANAG 4569** [12] (прийнятий НАТО) та **EN 1522** [13]/**VPAM** [14] (ООН) [4].

3.5.1 STANAG 4569

НАТО розробило стандарт **STANAG 4569** [12], що визначає рівні захисту для екіпажу легкоброньованих транспортних засобів. Стандарт включає загрози, пов'язані з кінетичною енергією малокаліберних та середньокаліберних снарядів, а також уламковими ураженнями від артилерійських вибухів.

Стандарт визначає методики та відтворювані процедури випробувань для оцінки балістичної стійкості броньованих компонентів транспортних засобів, а також для оцінки вразливих зон техніки.

Загрози поділені на 5 рівнів залежно від ступеня небезпеки. **Рівень 1** передбачає захист від цивільних загроз, а **Рівень 2** і вище відповідають різним рівням військових загроз [12].

3.5.2 EN 1522 / VPAM

EN 1522 [13] визначає вимоги та класифікацію для вікон, дверей, жалюзі та захисних елементів, які повинні відповідати тестовим критеріям відповідно до **EN 1523** [15].

Цей стандарт застосовується до випробувань на кулестійкість вікон, дверей, жалюзі та захисних конструкцій, включаючи їхні рами та наповнювачі. Випробування можуть проводитися як для внутрішніх, так і для зовнішніх конструкцій. Щоб отримати класифікацію захисту від куль для жалюзі та штор, вони мають тестуватися окремо, без вікон або дверей [13].

Стандарти **VPAM** [14] і **EN 1522** [13] схожі, однак **EN 1522** призначений для будівельних конструкцій, тоді як **VPAM** стосується броньованих пластин і транспортних засобів. **VPAM** охоплює ширший спектр загроз та боєприпасів і може вважатися більш комплексним стандартом порівняно з **EN 1522**. Однак більшість клієнтів традиційно вимагають **EN 1522**, хоча їм слід звертати увагу на **VPAM**, який є новішим стандартом і ще не набув широкого поширення на ринку [4].

VPAM було засновано у 1999 році для сприяння обміну досвідом та взаємної підтримки з питань кулестійких матеріалів і конструкцій між його членами. На сьогодні ця організація включає представників шести європейських країн [14].

3.6 Боєприпаси (Ammunition)

Калібр зазвичай визначається як внутрішній діаметр ствола, тоді як діаметр снаряда зазвичай на 0,2 мм більший за нарізний канал ствола для забезпечення обертання снаряда. У більшості випадків калібри позначаються за розміром ствола в міліметрах або дюймах.

Снаряд може бути виготовлений різними способами, але основні типи – це звичайні боєприпаси (наприклад, із суцільною оболонкою) та бронебійні боєприпаси (AP – Armour Piercing) [4]. Звичайні боєприпаси мають свинцевий або м'який сталевий осердя, зазвичай покриті мідною оболонкою. Бронебійні боєприпаси мають осердя з загартованої сталі або твердих карбідів. Обидва типи показані на **Рисунку 12** [4].

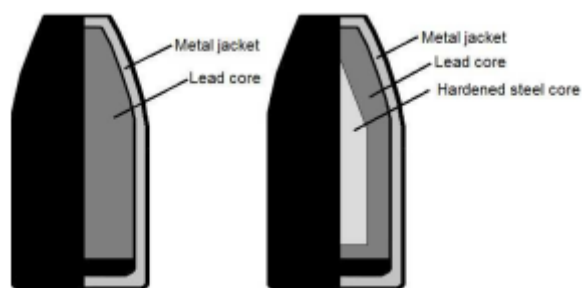


Рисунок 12. Куля з повною оболонкою (ліворуч) та бронебійна куля (праворуч).

Боєприпаси, що відповідають стандартам і рівням загроз, визначеним у **Розділі 3.5**, описані нижче у розділах **3.6.1 – 3.6.4**.

3.6.1 7.62x39 API BZ

Цей набій є стандартним для Збройних сил Росії. Усі американські виробники боєприпасів наразі пропонують цей набій з латунною гільзою та некорозійним капсулем Boxer. Військові боєприпаси надходять із колишніх і нинішніх комуністичних країн, зазвичай мають сталеві гільзи та корозійні капсулі Berdan [16].

Попередні військові набойі часто використовувалися для полювання, але 7.62x39 не підходить для цього, окрім як для дрібної дичини. Він чудово підходить для військового використання.

Цей набій найефективніший на коротких дистанціях. Діаметр ствола зазвичай **.311 дюйма (7,90 мм)**, але також можна використовувати кулі діаметром **.308 дюйма (7,82 мм)** із хорошими результатами [16].

API означає **Armour-Piercing-Incendiary** (бронебійно-запальний), а BZ є російським еквівалентом API і розшифровується як **Бронебойно-зажигательный** (Bronebojno-zazhigatel'naya) [4].

3.6.2 Імітаційний уламковий снаряд (Fragment Simulating Projectile – FSP)

Імітаційний уламковий снаряд (FSP – **Fragment Simulating Projectile**) базується на стандартизованому циліндричному снаряді із загостреним носиком, як показано на **Рисунку 13**. Доступний у калібрах **.22 Type 1, .22 Type 2, .30, .50 і 20 мм**. Цей снаряд розроблений для можливості стрільби зі зброї з метою спрощення випробувань броні [17].

FSP використовується для моделювання ефекту артилерійських снарядів [4].

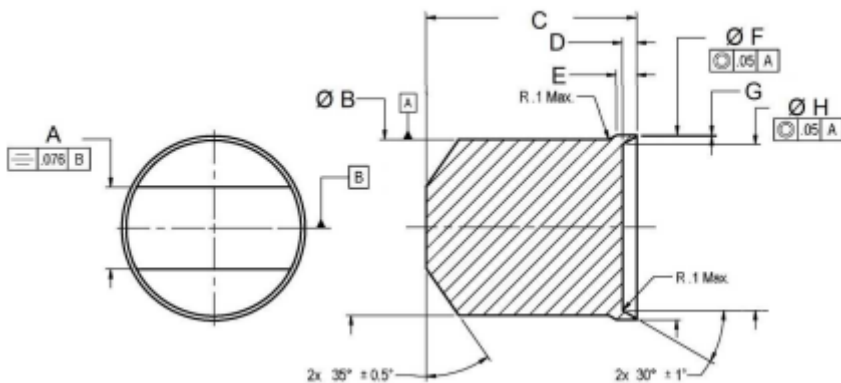


Рисунок 13. Креслення 20 мм імітаційного уламкового снаряда.

У Таблиці 1 наведені розміри для креслення, показаного на рисунку вище [17].

Таблиця 1. Розміри 20 мм імітаційного уламкового снаряда.

Weight (g)	A (mm)	Ø B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	Ø F (mm)	G (mm)	Ø H (mm)
53.8±0.26	9.27- 0.4	19.89±0.05	24.00	1.62±0.05	2.31±0.05	20.83±0.08	0.2 max	18.80±0.12

FSP використовується для моделювання гострокутних уламків сталевих корпусів бомб, які мають набагато більшу енергію, ніж кулі штурмових гвинтівок [18].

3.6.3 7.62x51 NATO Ball M80

У 1950-х роках США представили новий набій **T-65** для випробувань у стрілецькій зброї НАТО. По суті, це була вкорочена гільза **.30-06** з тим самим калібром кулі та майже тими самими розмірами денця гільзи. Довжина гільзи була скорочена з **63 мм** до **51 мм** для набою **7.62 мм T-65**, що призвело до створення легшого, більш компактного набою та гвинтівки. Деякі союзники НАТО представили більш вдосконалені варіанти, ніж набій **T-65**, але США використали свій вплив для прийняття саме **7.62x51 мм НАТО** як стандартного набою. Він досі є стандартом НАТО. У 1957 році армія США прийняла на озброєння гвинтівку **M-14** під цей набій. Також під нього була розроблена кулемет **M60**, а також різні снайперські гвинтівки [16].

Під час війни у В'єтнамі армія США прийняла на озброєння **5.56x45 мм** для нової гвинтівки **M-16**, що викликало невдоволення серед союзників НАТО. У кінці 1970-х років розпочалася серія випробувань НАТО, яка врешті-решт у 1980 році призвела до стандартизації **5.56x45 мм**. Обидва набої **7.62x51 мм** та **5.56x45 мм НАТО** залишаються стандартними до сьогодні. Останнім часом штурмові гвинтівки НАТО перейшли на **5.56x45 мм**, залишивши **7.62x51 мм** для кулеметів. Майже всі країни НАТО, а також деякі не-НАТО-виробники випускають цей набій [16].

3.6.4 5.56x45 SS109 (M855)

Набій **5.56x45** мм спочатку був розроблений для використання у гвинтівці **Armalite AR-15** і вперше випробуваний ВПС США як можлива заміна **M-1 Carbine** на початку 1960-х років. Пізніше AR-15 була перероблена у **M-16**, яка була прийнята на озброєння армією США у 1964 році після кількох років випробувань у **Continental Army Command** у Форт-Монро, Вірджинія. Вперше гвинтівка та набій були використані у бойових умовах під час війни у В'єтнамі на початку 1960-х років [16].

Спочатку набій **5.56x45** мм мав кулю вагою **55 гран (~3,56 г)** з формою **spitzer boattail** та початковою швидкістю **3250 fps (990,6 м/с)**. Він був стандартним боєприпасом армії США до 1984 року. У 1980-х роках НАТО прийняло нову **62-гранову (~4,02 г) кулю SS109**, розроблену компанією FN. США позначили її як **M855** замість **SS109**. Нова куля мала **сталю осердя у передній частині та свинцеву основу**, а її початкова швидкість становила **3100 fps (944,88 м/с)**. Для стабілізації довшої та важчої кулі у гвинтівках **5.56 мм** знадобився швидший крок нарізки – **1 оберт на 7 дюймів (~177,8 мм)**. Це покращення підвищило швидкість кулі на дальніх дистанціях, покращило точність та збільшило пробивну здатність [16].

3.7 Балістичний тест V50 (V50 ballistic test)

V50 – це швидкість, при якій певний снаряд пробиває певну ціль у 50% випадків. Стандарт MIL-STD-662F [19] містить загальні вказівки щодо процедур випробувань, обладнання, фізичних умов і термінології для визначення балістичної стійкості металевої, неметалевої та композитної броні від стрілецької зброї. Ця методика використовується для визначення балістичного порогу V50 [19].

Стандарт розроблений для досліджень та розробки нових броньованих матеріалів і застосовується до різних типів броні. Однак він має певні обмеження [19]:

- *Військові організації або підрядники Міністерства оборони можуть використовувати власні випробувальні полігони, не охоплені цим стандартом (MIL-STD-1161).*
- *Стандарт не має пріоритету над іншими методиками балістичних випробувань, визначених для конкретних типів броні.*
- *Унікальні вимоги до випробувань повинні бути чітко зазначені у контракті [19].*

V50-тест використовує **електронний хронограф** для вимірювання швидкості снаряда. Типова схема випробувань показана на **Рисунку 14** [19].

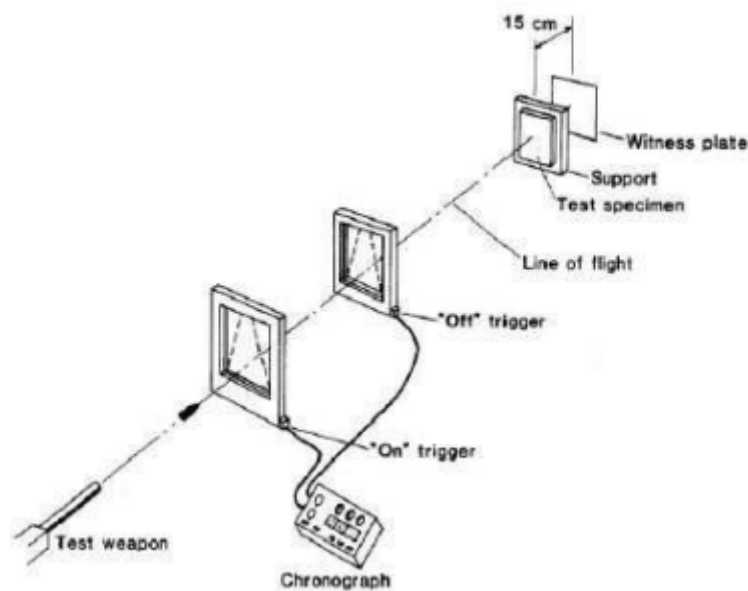


Рисунок 14. Схема випробувального стенду для тесту V50.

Процес тестування передбачає стрільбу по цілі, проходження снарядом двох хронографів для вимірювання швидкості та фіксацію результату. Якщо снаряд пробиває пластину-свідка позаду мішені, це вважається **повним пробиттям** [20].

3.7.1 Визначення тесту V50 (Definitions V50 test)

Деякі ключові терміни, визначені у стандарті тестування V50, пояснені нижче:

- **Балістичний удар (Ballistic impact)** – це удар, спричинений влученням снарядів, уламків або інших аеродинамічно-активних механізмів загрози [19].
- **Балістичний поріг (Ballistic limit)** – це мінімальна або максимальна швидкість для певного снаряда, при якій він регулярно пробиває або не пробиває броню заданої товщини та фізичних властивостей під певним кутом нахилу. Через складність точного контролю ударної швидкості під час випробувань, існує зона змішаних результатів. У таких умовах снаряд може або повністю пробити, або лише частково проникнути крізь броню. Тому для визначення порога використовується статистичний підхід, що базується на обмеженій кількості пострілів [19].
- **Точка V50 (V50-point)** – це швидкість, за якої ймовірність повного пробиття та неповного пробиття є рівними.
- **Точка V0 (V0-point)** – це швидкість, за якої жоден снаряд не може повністю пробити броню.
- **Точка V100 (V100-point)** – це мінімальна швидкість, за якої всі снаряди гарантовано повністю пробивають броню [19].

Балістичний поріг V50BL(P) – це середнє значення між найвищою частковою швидкістю проникнення та найнижчою повною швидкістю проникнення, що відбувається у певному діапазоні швидкостей [19].

Як свідок повного пробиття використовується пластина-свідок з алюмінієвого сплаву **2024T3** товщиною **0,51 мм**, розташована **152 ± 12,7 мм** позаду броньованої мішені. Якщо пластина-свідок пробита, це також означає повне пробиття броні [19]

3.7.2 Продуктивність (Performance)

Швидкість V50 спочатку оцінюється розрахунковим методом. Потім виконується постріл із початковою швидкістю, наближеною до розрахункової. Якщо перший постріл не пробиває ціль, швидкість другого пострілу збільшується. Якщо другий постріл повністю пробиває ціль, то V50 знаходиться між першими двома пострілами. Далі виконується третій постріл із середньою швидкістю між першими двома, і якщо він пробиває ціль, швидкість зменшується, щоб отримати часткове проникнення. Потім швидкість знову збільшується для наступного повного пробиття. Цей процес повторюється, доки не буде отримано **три повних пробиття та три часткових проникнення**, а різниця між максимальною та мінімальною швидкостями не стане меншою за **40 м/с**. Така методика відома як **тест «вгору-вниз»**, як показано на **Рисунку 15** [11].

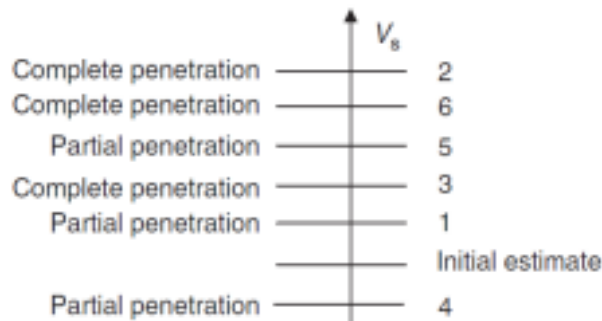


Рисунок 15. Процедура тесту «вгору-вниз».

Формула для експериментального визначення V50 наведена у Рівнянні 11 [11]:

$$V_{50} = \frac{\sum_{i=1}^6 V_i}{6} \quad (11)$$

На граничну швидкість (V50) впливають такі фактори [11]:

- **Твердість матеріалу** – чим твердіший матеріал, тим вища V50.
- **Кут зустрічі снаряда з мішенню (yaw at impact)** – збільшення кута підвищує ймовірність відколу або рикошету, що також збільшує V50.
- **Густина снаряда** – зі збільшенням густини снаряда V50 зменшується.
- **Форма носика снаряда** – тупіший носик зазвичай збільшує V50, але якщо мішень значно поступається снаряду, форма носика майже не впливає.
- **Співвідношення довжини до діаметра снаряда** – цей фактор може впливати в обидва боки і залежить від кута нахилу удару [11].

4. Method

У цьому розділі описані методи випробувань і матеріали, які використовувалися під час дослідження. Перші підрозділи (4.1 – 4.3) містять інформацію про механічні властивості матеріалів, типи боєприпасів та зразки. Решта розділу описує різні методи випробувань.

4.1 Матеріали (Materials)

Механічні властивості **Armoх 500Т** та **Armoх 440Т** наведені у **Таблиці 2**.

Таблиця 2. Механічні властивості Armoх.

Товщина (мм)	Твердість (НВW)	Charpy- V -40°C (10x10 мм) (Джоулі)	Межа плинності R _p 0.2 (мін. МПа)	Міцність на розрив R _m (МПа)	Відносне подовження A5 (мін. %)	Відносне подовження A50 (мін. %)
500Т 3.0- 80.0	480-540	25	1250	1450- 1750	8	10
440Т 4.0- 30.0	420-480	35	1100	1250- 1550	10	12

Хімічний склад **Armoх 500Т** та **Armoх 440Т** наведений у **Таблиці 3**.

Таблиця 3. Хімічний склад Armoх.

	C max %	Si max %	Mn max %	P max %	S max %	Cr max %	Ni max %	Mo max %	B max %
500Т	0.32	0.4	1.2	0.015	0.010	1.0	1.8	0.7	0.005
440Т	0.21	0.5	1.2	0.010	0.010	1.0	2.5	0.7	0.005

Випробування на згин буде обмежене **Armoх 440Т** товщиною 4, 6, 8 і 12 мм, а також **Armoх 500Т** товщиною 3, 4, 5, 6.5, 8 і 12 мм. Усі вони будуть піддаватися випробуванню на згинання під кутом 90°, як показано в **Таблиці 4**.

Таблиця 4. Різні кути згинання залежно від якості та розмірів

	Armoх 440Т 4mm	Armoх 440Т 6mm	Armoх 440Т 8mm	Armoх 440Т 12mm	Armoх 500Т 3mm	Armoх 500Т 4mm	Armoх 500Т 5mm	Armoх 500Т 6,5mm	Armoх 500Т 8mm	Armoх 500Т 12mm
30°			X	X				X		X
60°			X	X				X		X
90°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Балістичні випробування будуть обмежені **Armoх 440Т** товщиною 8 мм і 12 мм та **Armoх 500Т** товщиною 6.5 мм і 8 мм. Вони також будуть виконані під кутами згину 30°, 60° та 90°, як показано в **Таблиці 4**

4.2 Боєприпаси (Ammunition)

Випробування боєприпасів були обмежені кількома типами набоїв та рівнями загроз, як зазначено у **Таблиці 5**. Вибір боєприпасів ґрунтувався на найзатребуваніших типах через обмеження у часі виконання роботи.

Таблиця 5. Різні типи боєприпасів для кожного виду сталі та товщини.

	Armoх 440T 8mm	Armoх 440T 12mm	Armoх 500T 6,5mm	Armoх 500T 12mm
7,62x39 API BZ (STANAG 4569 Level 2)		X		X
FSP (STANAG 4569)		X		X
7,62x51 NATO Ball M80 (EN 1522 FB6)	X		X	
5,56x45 SS109/M855 (STANAG 4569 Level 1)	X		X	

4.3 Зразки (Specimens)

Для розробки нових рекомендацій щодо згинання було необхідно виготовити велику кількість зразків. Стандартний лист має розміри **2400х6000 мм**, але **Армох 500Т 3 мм** постачається у форматі **2000х4000 мм**. Тому було використано **2 листи**, щоб отримати майже однакову кількість зразків, а схема різання також відрізнялася. Зразки були вирізані у розмірах **600х300 мм**, що показано на **Рисунку 16**.

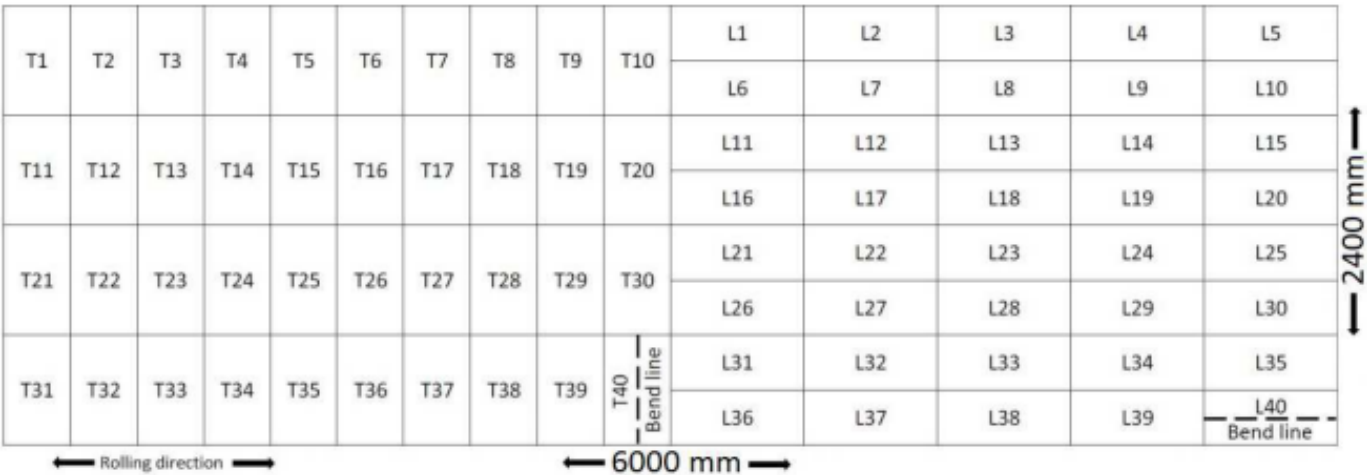


Рисунок 16. Схема розміщення зразків на аркуші сталі Армох 500Т, t=3 мм.

The cutting was done at the workshop at SSAB Oxelösund.

4.4 Металографія (Metallography)

Щоб виявити взаємозв'язок між радіусом згину та балістичною стійкістю, було проведено мікроструктурний аналіз. Для цього використовували попередньо зігнуті зразки з різними радіусами згину. Дослідження проводилося на двох листах **Armox 500T**:

- Товщина 4 мм, радіус згину 12 мм
- Товщина 6 мм, радіус згину 19 мм

Малі частини вигнутих листів були вирізані за допомогою **плазмового різання**, а потім обрізані **прецизійним різак**ом без деформацій. Після підготовки зразки були **запресовані у бакеліт**, відшліфовані та відполіровані у кілька етапів з використанням **етанолу** для очищення між етапами. Потім зразки піддавали **травленню у 3% розчині ніталу** для візуалізації мікроструктури.

Інша частина зразків була **травлена у пікриновій кислоті** для отримання контурів колишніх аустенітних зерен. Для цього зразки були **відпущені при 520°C протягом 16 годин**. Дослідження проводилося за допомогою **оптичного мікроскопа (LOM)**.

4.5 Мікротвердість (Microindentation hardness test)

Щоб оцінити твердість зігнутого матеріалу, було проведено вимірювання профілю твердості через товщину зразків. Для цього використовували ті ж два зразки, що й у **Розділі 4.4**, щоб дослідити взаємозв'язок між радіусом згину та балістичними характеристиками матеріалу.

Первинне вимірювання проводилося у трьох точках вигину, як показано на **Рисунку 17**:

- Центр згину
- 5 мм ліворуч від центру
- 5 мм праворуч від центру

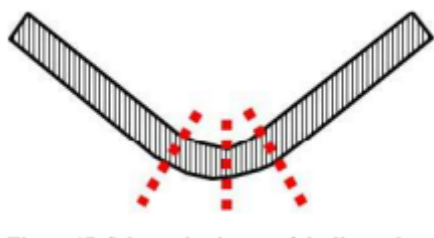


Рисунок 17. Схема ліній вимірювання профілю твердості.

Далі було проведено **картографування твердості** одного зразка – **Armox 500T**, товщиною 4 мм, радіусом згину 12 мм. Оскільки цей процес потребує значно більше часу, аналізувався лише один зразок. Картографування дає точніший і надійніший результат, що виправдовує його проведення. **Рисунок 18** демонструє схему картографування. Було виконано серію мікроіндентацій, після чого отримані значення твердості були нанесені на кольорову карту поверхні, що відображає деформацію зігнутого матеріалу.

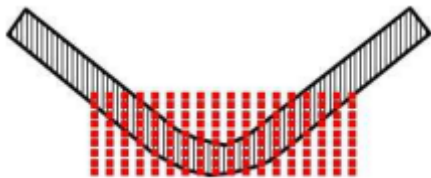


Рисунок 18. Схема позицій мікроіндентацій.

Після аналізу мікроструктури ті ж зразки використовувалися для оцінки твердості, за винятком тих, що піддавалися термообробці. Це дозволило створити загальну картину впливу згинання на матеріал.

На кожному зразку було проведено три профілі твердості через товщину, з навантаженням **500 г**. Перший профіль розташовувався у **центрі згину**, а два інших – **приблизно за 5 мм ліворуч і праворуч від центру**. Кожен профіль складався з **30 мікроіндентацій**. Більша кількість вимірювань займала б надто багато часу.

Оскільки товщина зразків становила **4 мм та 6 мм**, довжина кроку між індентаціями варіювалася відповідно до товщини. Було вирішено обмежити кількість індентацій **30 точками**, що забезпечувало оптимальний баланс між витратами часу та роздільною здатністю профілю твердості.

Після виконання індентацій результати були внесені у таблицю координат та значень твердості. Ці дані використовувалися для створення профілю твердості через товщину матеріалу.

Щоб оцінити розподіл твердості на більшій площі поперечного перерізу, було виконано **картографування твердості**. Було створено **22 ряди по 66 мікроіндентацій** у кожному, з відстанню **0,3 мм** у напрямках **X-** та **Y-**, що забезпечило високу роздільну здатність вимірювань.

Мікроіндентації у **бакеліті** мають значно нижчі значення твердості, ніж у металі, тому їх легко виключити з аналізу. Щоб виключити цей діапазон значень, на карті кольором було позначено лише інтервал, відповідний металу, а область бакеліту зроблена **білою**.

На **Рисунку 19** нижче показано розподіл мікроіндентацій твердості на зігнутому зразку.

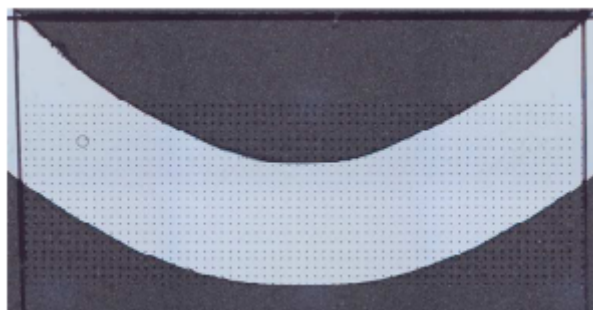


Рисунок 19. Розподіл мікроіндентацій твердості на зігнутому зразку.

4.6 Згинання зразків (Bending of specimens)

Згинання виконувалося в **ЕМ Eriksson** та лабораторії формування **SSAB**. **ЕМ Eriksson** – це центр обробки сталі у місті **Бурленге**. Зразки товщиною більше 6 мм згиналися у **ЕМ Eriksson**, а тонші зразки – у лабораторії **SSAB**.

Половина зразків згиналася **перпендикулярно напрямку прокату**, а інша половина – **паралельно**. Для виготовлення зразків використовували лист розміром **6000x2400** мм кожного виду сталі та товщини. Додатково для **Armoх 500Т 3** мм використовували два листи по **4000x2000** мм.

Поточні рекомендації щодо згинання передбачають мінімальне співвідношення між **радіусом згину та товщиною матеріалу**. Ці співвідношення були відправною точкою тесту. **ЕМ Eriksson** також згинали зразки для балістичних випробувань під кутами **30°, 60° і 90°**, які позначені **жирним шрифтом** у **Таблиці 6**.

Щоб зразок пройшов тест на згинання, на ньому не повинно бути видимих тріщин. Якщо тріщини помітні неозброєним оком, зразок вважається непридатним. Нові рекомендації щодо згинання передбачають згинання під кутом **90°** із різними співвідношеннями між **радіусом згину та товщиною матеріалу**, як показано у **Таблиці 6**.

Таблиця 6. The distribution of specimens for bending.

		Armoх 440Т 4mm		Armoх 440Т 6mm		Armoх 440Т 8mm		Armoх 440Т 12mm		Armoх 500Т 3mm		Armoх 500Т 4mm		Armoх 500Т 5mm		Armoх 500Т 6,5mm		Armoх 500Т 8mm		Armoх 500Т 12mm	
		T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P
90° bending angle																					
R=8t																3	3				
R=7t				2	2	3	3									2	2	2	2		
R=6t				2	2	3	3									2	2	2	2		
R=5t	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
R=4t	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
R=3,5t	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	10	10	10	10	6	6	2	2	3	3
R=3t	10	9	10	10	3	3	6	6	10	10	2	2	4	2	3	3	3	7	7	7	7
R=2,5t	4	4	2	2	4	4	4	4	4	4						2	2	3	3	3	3
60° bending angle																					
R=8t																2	2				
R=7t					2	2										1	1				
R=6t					2	2										2	2				
R=5t					2	2	2	2								2	2			2	2
R=4t					2	2	2	2								2	2			2	2
R=3t					2	2	2	2												2	2
30° bending angle																					
R=8t																2	2				
R=7t																1	1				
R=6t						2	2									2	2				
R=5t						2	2	2	2							2	2			2	2
R=4t						2	2	2	2							2	2			2	2
R=3t						2	2														

T=Transverse, P=Parallel to rolling direction

4.7 Балістичний тест зразків (Ballistic test of specimens)

Стрільби проводилися у компанії **Åkers Krutbruk Protection AB** на їхньому полігоні в **Åkers Styckebruk**. Тестування зайняло **близько 5 тижнів** через значну тривалість процесу. Випробування базувалося на методі **V50**, що означає визначення балістичного порогу, за якого **50% із шести або більше пострілів** із максимально допустимим розкидом швидкості **40 м/с** пробивають броню, як описано у **Розділі 3.7.2**.

Чотири різні типи боєприпасів випробовувалися відповідно до стандартів **STANAG 4569** та **EN 1522** для матеріалів різної товщини, радіусу згину та кута згинання. Випробування почалося з **монтажу випробувальної пластини** на полігоні. Перший постріл виконувався для оцінки впливу на пластину та вимірювання початкової швидкості снаряда.

Перший постріл лише частково пробив пластину. Другий постріл виконували зі збільшеною швидкістю шляхом додавання пороху до гільзи, що призвело до повного пробиття. Процес продовжувався, доки три снаряди повністю не пробili пластину, а ще три лише частково проникли. Максимально допустиме розкидання швидкості між пострілами складало **40 м/с**. Після цього обчислювали середню швидкість серії, яка і була значенням **V50**.

5. Результати (Results)

5.1 Металографія (Metallography)

Армох є мартенситовою сталлю, і дослідження мікроструктури дало два еталонних зображення мікроструктури, обидва у нездеформованому стані. **Рисунок 20** нижче показує мікроструктуру нездеформованого **Армох 500Т** як еталон для структур у **Розділах 5.1.1 та 5.1.2**.



Рисунок 20. Мікроструктура нездеформованого Армох 500Т, матеріал із мартенситовою мікроструктурою, 50х.

Щоб візуалізувати деформацію у матеріалі, матеріал було відпущено та протравлено у **пiкриновій кислоті** для отримання контурів колишніх меж аустенітного зерна. **Рисунок 21** нижче демонструє мікроструктуру відпущеного та нездеформованого матеріалу як еталон для структур у **Розділі 5.1.4**.

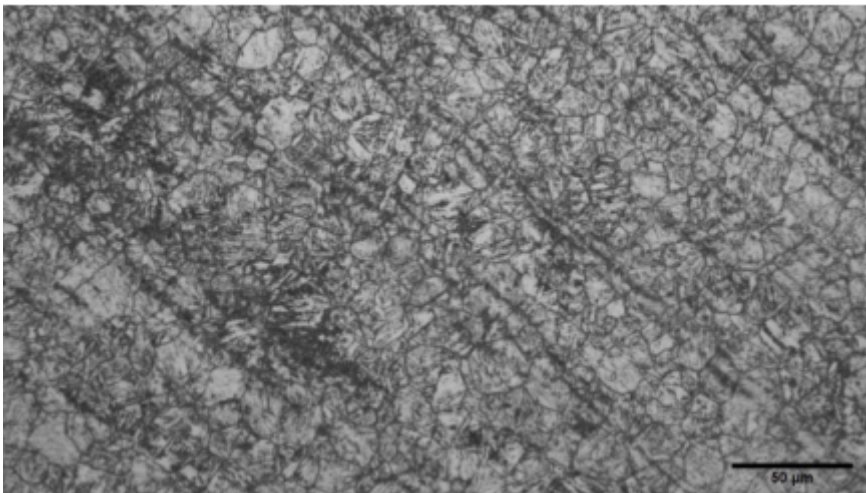


Рисунок 21. Мікроструктура нездеформованого та відпущеного матеріалу Армох 500Т із мартенситовою мікроструктурою, у якій видно колишні аустенітні зерна, 50х.

5.1.1 Arмох 500Т 4 мм, радіус 12 мм

Дослідження мікроструктури дало зображення мікроструктури двох товщин, обидва зразки Армох 500Т: перший – товщиною **4 мм**, з радіусом згину **12 мм**, другий – товщиною **6,5 мм** з радіусом згину **19,5 мм**.

Зображення нижче демонструють мікроструктуру з трьох зон у середині вигину. **Рисунок 22** показує мікроструктуру **опуклої сторони** вигину, **Рисунок 23** – **нейтральної площини**, а **Рисунок 24** – **увігнутої сторони** вигину.



Рисунок 22. Мікроструктура опуклої сторони вигину, Армох 500Т, товщина пластини $t=4$ мм, радіус згину $R=12$ мм, матеріал із мартенситовою мікроструктурою, 50х.



Рисунок 23. Мікроструктура нейтральної площини, Армох 500Т, товщина пластини $t=4$ мм, радіус згину $R=12$ мм, матеріал із мартенситовою мікроструктурою, 50х.



Рисунок 24. Мікроструктура увігнутої сторони вигину, Armox 500T, товщина пластини $t=4$ мм, радіус згину $R=12$ мм, матеріал із мартенситовою мікроструктурою, 50х.

5.1.2 Armox 500T 6,5 мм, радіус 19,5 мм

Зображення нижче демонструють мікроструктуру з трьох зон у середині вигину. **Рисунок 25** показує мікроструктуру опуклої сторони вигину, **Рисунок 26** – нейтральної площини, а **Рисунок 27** – увігнутої сторони вигину.



Рисунок 25. Мікроструктура опуклої сторони вигину, Armox 500T, товщина пластини $t=6,5$ мм, радіус згину $R=19,5$ мм, матеріал із мартенситовою мікроструктурою, 50х.



Рисунок 26. Мікроструктура нейтральної площини, Armoх 500Т, товщина пластини $t=6,5$ мм, радіус згину $R=19,5$ мм, матеріал із мартенситовою мікроструктурою, 50х.



Рисунок 27. Мікроструктура увігнутої сторони вигину, Armoх 500Т, товщина пластини $t=6,5$ мм, радіус згину $R=19,5$ мм, матеріал із мартенситовою мікроструктурою, 50х.

5.1.3 Відпущений Armoх 500Т 4 мм, радіус 12 мм (Tempered Armoх 500Т 4 mm radius 12 mm)

Зображення нижче показують колишні аустенітні зерна на опуклій стороні, нейтральній площині та увігнутій стороні вигину, щоб оцінити деформацію матеріалу.

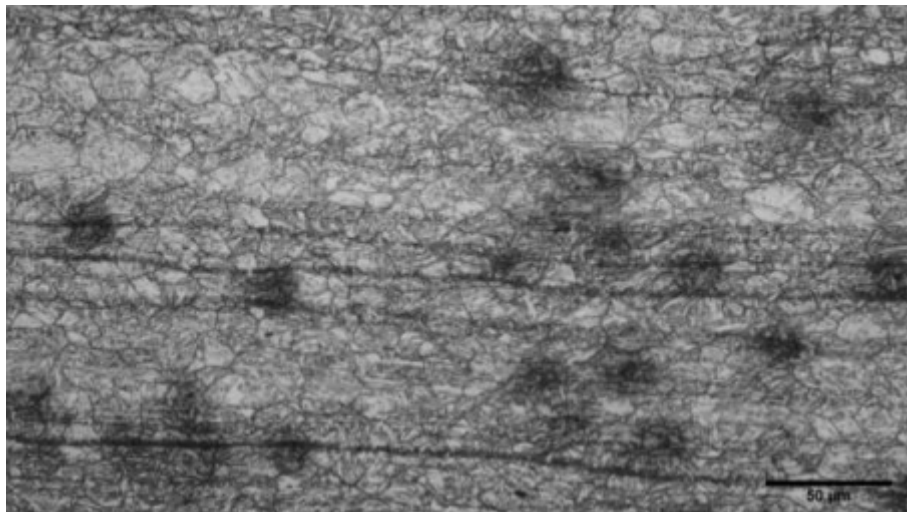


Рисунок 28. Колишні аустенітні зерна на опуклій стороні вигину, Armoх 500Т, товщина пластини $t=4$ мм, радіус згину $R=12$ мм, мартенситна мікроструктура, видимі колишні аустенітні зерна, 50х

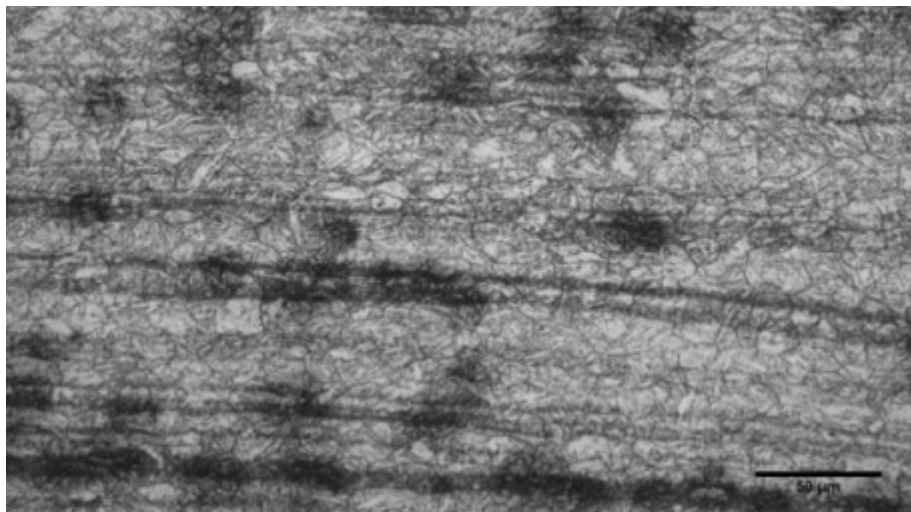


Рисунок 29. Колишні аустенітні зерна на нейтральній площині, Armoх 500Т, товщина пластини $t=4$ мм, радіус згину 12 мм, мартенситна мікроструктура, видимі колишні аустенітні зерна, 50х.

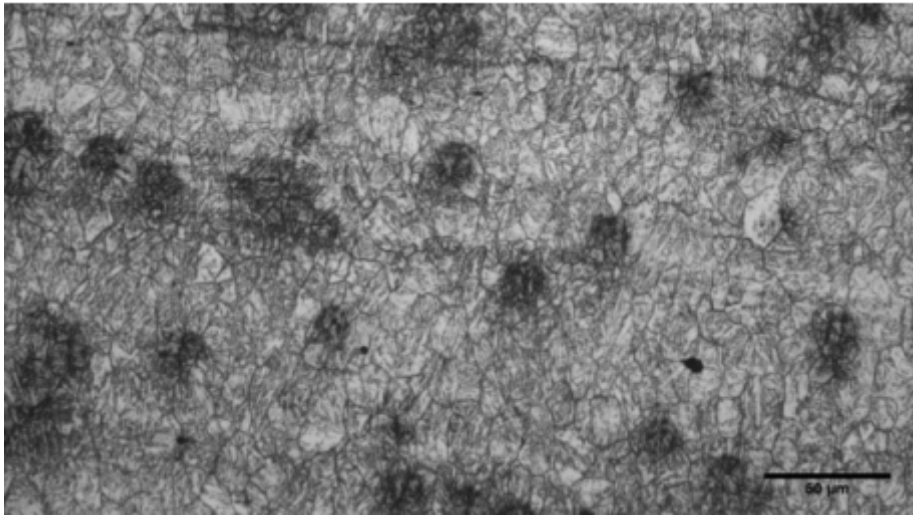


Рисунок 30. Колишні аустенітні зерна на увігнутій стороні вигину, Armoх 500Т, товщина пластини $t=4$ мм, радіус згину 12 мм, мартенситна мікроструктура, видимі колишні аустенітні зерна, 50х.

5.1.4 Відпущений Armoх 500Т 6,5 мм, радіус 19,5 мм (Tempered Armoх 500Т 6.5 mm radius 19.5 mm)

Зображення нижче показують колишні аустенітні зерна на опуклій стороні, нейтральній площині та увігнутій стороні вигину, щоб оцінити деформацію матеріалу.

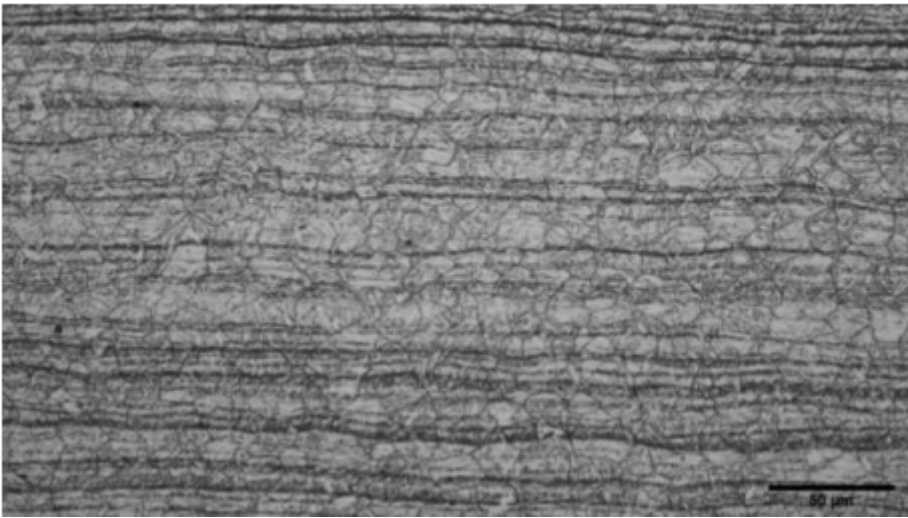


Рисунок 31. Колишні аустенітні зерна на опуклій стороні вигину, Armoх 500Т, товщина $t=6,5$ мм, радіус згину $R=19,5$ мм, мартенситна мікроструктура, видимі колишні аустенітні зерна, 50х.

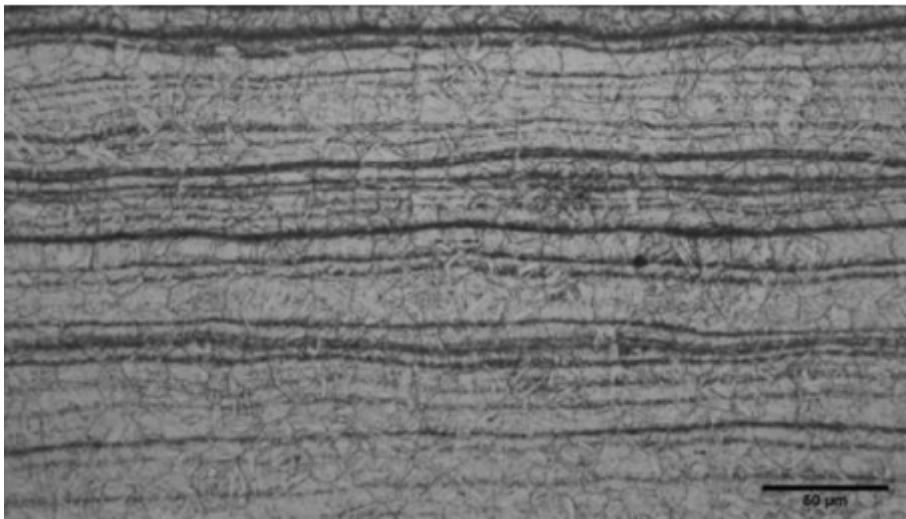


Рисунок 32. Колишні аустенітні зерна на нейтральній площині, Armoх 500Т, товщина $t=6,5$ мм, радіус згину $R=19,5$ мм, мартенситна мікроструктура, видимі колишні аустенітні зерна, 50х.

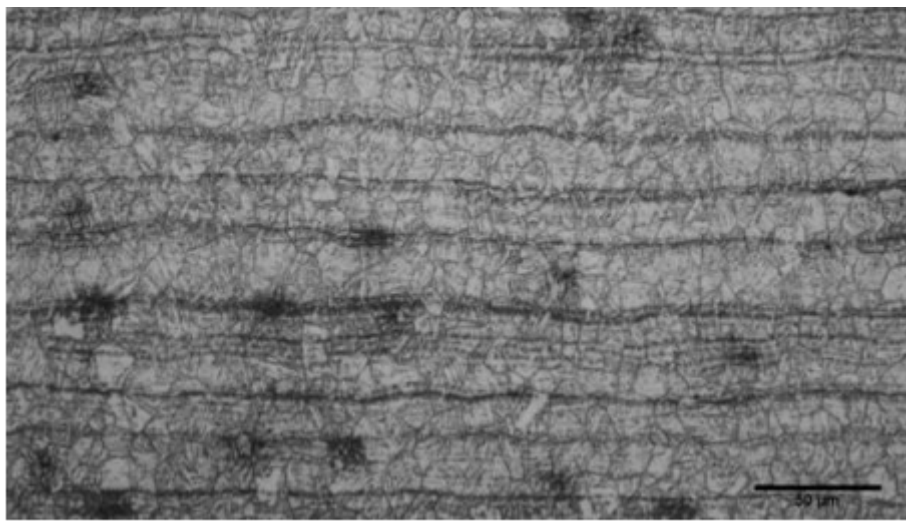


Рисунок 33. Колишні аустенітні зерна на увігнутій стороні вигину, Armoх 500Т, товщина $t=6,5$ мм, радіус згину $R=19,5$ мм, мартенситна мікроструктура, видимі колишні аустенітні зерна, 50х.

5.2 Мікроіндентаційний тест твердості (Microindentation hardness test)

Випробування на мікротвердість методом індентування дало два профілі твердості, по одному для кожної товщини. На **Рисунку 34** нижче показано профіль твердості для **Armoх 500Т** товщиною **4 мм** з радіусом **12 мм**.

Через **декарбонізацію** твердість є нижчою в областях, найближчих до поверхні. Нульова відстань представляє товщину вздовж згину, від увігнутої до опуклої сторони згину.

На **Рисунку 17**:

- **Ліва позначка** відповідає лівій кривій,
- **Середня позначка** – середній кривій,
- **Права позначка** – правій кривій.

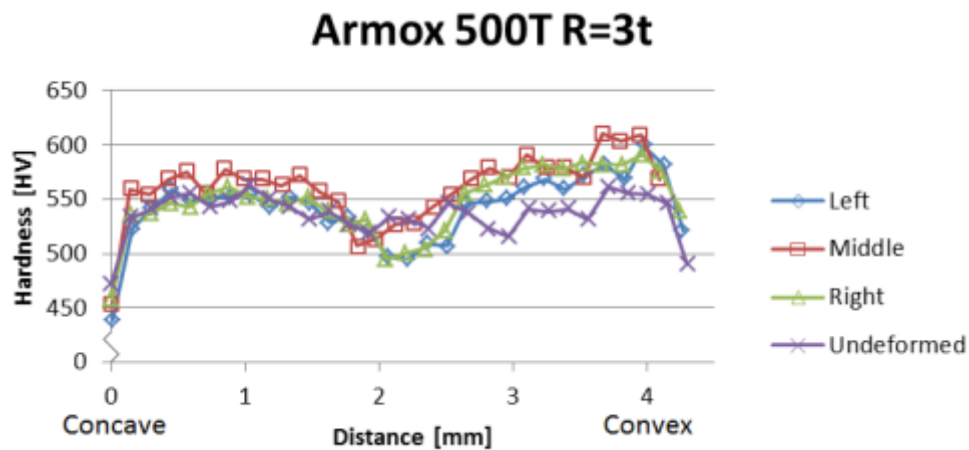


Рисунок 34. Профіль твердості через товщину Армох 500Т, радіус згину $R=12$ мм, товщина $t=4$ мм.

У Рисунку 35 наведено профіль твердості для Армох 500Т, товщиною 6,5 мм, з радіусом згину 19,5 мм.

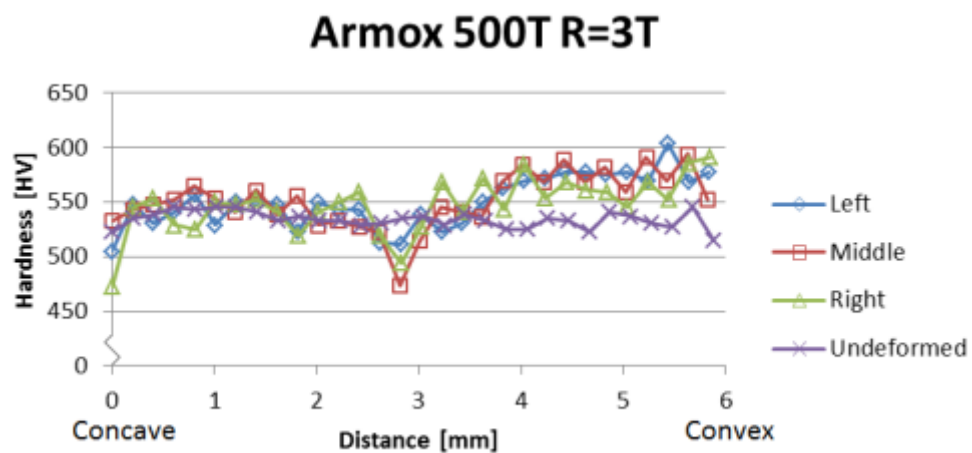


Рисунок 35. Профіль твердості через товщину Армох 500Т, радіус згину $R=19,5$ мм, товщина $t=6,5$ мм.

Картографування твердості Armoх 500Т, 4 мм, з радіусом згину 12 мм, дало результати, показані на **Рисунку 36**. Для створення карти твердості було зроблено **1452 індендації**, як показано у **Рисунку 18**, а отриману поверхню представлено на **Рисунку 19**. Кожен колір представляє певний інтервал твердості: чим тепліший колір, тим твердіша область матеріалу.

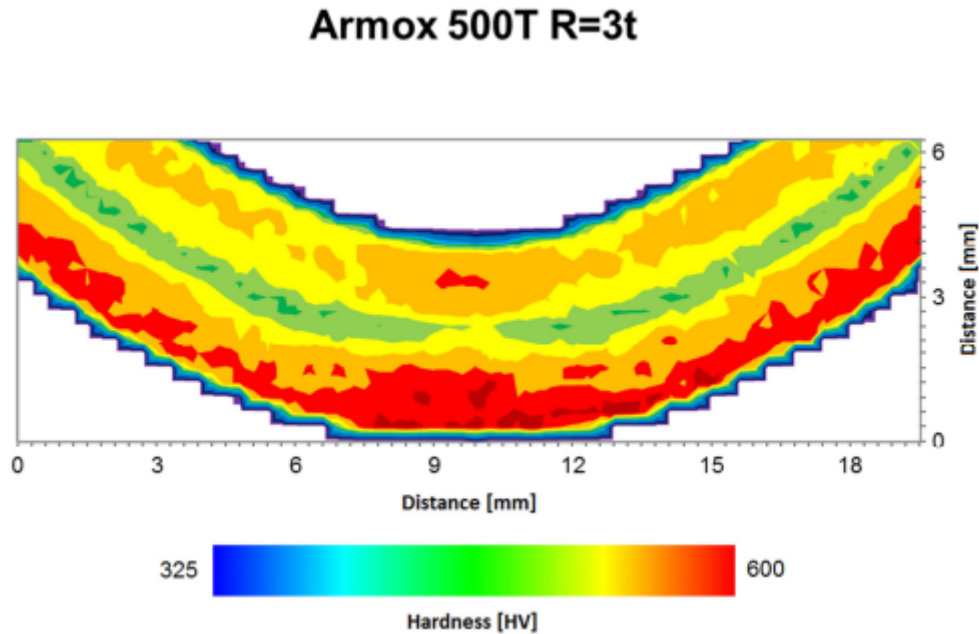


Рисунок 36. Картографування твердості Armoх 500Т, товщина 4 мм, радіус 12 мм, 1452 індендації.

5.3 Згинання зразків (Bending of specimens)

Результати випробувань на згинання наведені у **Таблиці 7**. Числа, виділені **зеленим**, означають, що тест пройдено, тоді як **червоні курсивні значення** вказують на зразки, що не витримали випробування (на яких були виявлені тріщини неозброєним оком).

Таблиця 7. Результати випробувань на згинання сталі Armoх.

Armoх 440T 4mm		Armoх 440T 6mm		Armoх 440T 8mm		Armoх 440T 12mm		Armoх 500T 3mm		Armoх 500T 4mm		Armoх 500T 5mm		Armoх 500T 6,5mm		Armoх 500T 8mm		Armoх 500T 12mm	
T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P
90° bending angle																			
R=8t														3	3				
R=7t		2	2	3	3									2	2	2	2		
R=6t		2	2	3	3									2	2	2	2		
R=5t		2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
R=4t		2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
R=3,5t		2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	10	10	10	10	6	6	2	2
R=3t		10	9	10	10	3	3	6	6	4	4	2	2	4	2	3	3	7	7
R=2,5t		4	4	2	2	4	4	4	4	4	4			2	2	3	3	3	3
60° bending angle																			
R=8t														2	2				
R=7t				2	2									1	1				
R=6t				2	2									2	2				
R=5t				2	2	2	2							2	2			2	2
R=4t				2	2	2	2							2	2			2	2
R=3t				2	2	2	2											2	2
30° bending angle																			
R=8t														2	2				
R=7t														1	1				
R=6t				2	2									2	2				
R=5t				2	2	2	2							2	2			2	2
R=4t				2	2	2	2							2	2			2	2
R=3t				2	2														

T=Transverse, P=Parallel to rolling direction

5.4 Балістичний тест зразків (Ballistic test of specimens)

Балістичні випробування проводилися для всіх випробуваних матеріалів, а результати кожного тесту V50 були занесені у протокол. Дані були узагальнені в **Excel-документі**, після чого для кожної комбінації товщини, якості та боєприпасів було створено **графіки**. Ці графіки представлені у розділах **5.4.1 – 5.4.4**. Контрольні мішені були виготовлені з використанням **недеформованих пластин**.

5.4.1 Armoх 500T 6,5 мм

Результати балістичних випробувань наведені у **Рисунках 37 та 38**. **Рисунок 37** демонструє результати для **5,56x45 SS109**, а **Рисунок 38** – для **7,62x51 NATO Ball**. Лінії на графіках показують контрольні значення V50, отримані на **недеформованому матеріалі**, щоб продемонструвати різницю у характеристиках.

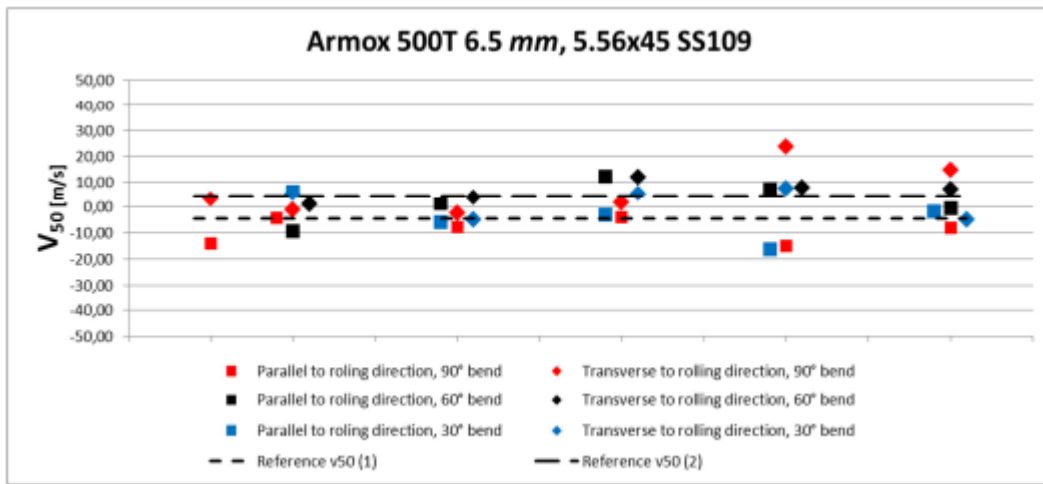


Рисунок 37. Результати балістичних випробувань Armox 500T, товщина $t=6,5$ мм, 5,56x45 SS109.

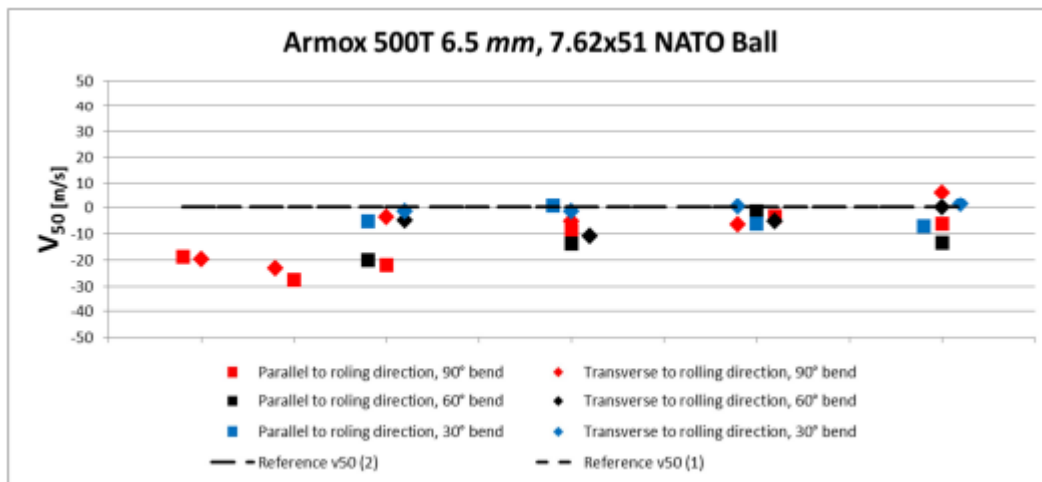


Рисунок 38. Результати балістичних випробувань Armox 500T, товщина $t=6,5$ мм, 7,62x51 NATO Ball.

5.4.2 Armox 440T 8 мм

Результати балістичних випробувань наведені у **Рисунках 39 та 40**. **Рисунок 39** демонструє результати для **5,56x45 SS109**, а **Рисунок 40** – для **7,62x51 NATO Ball**. Лінії на графіках показують контрольні значення V_{50} для нездеформованого матеріалу.

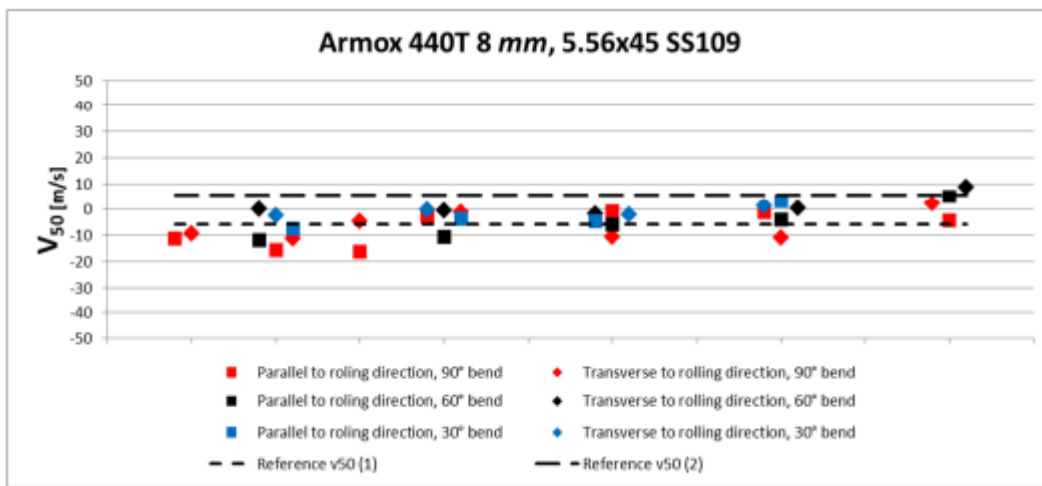


Рисунок 39. Результати балістичних випробувань Армох 440Т, товщина $t=8$ мм, 5,56x45 SS109.

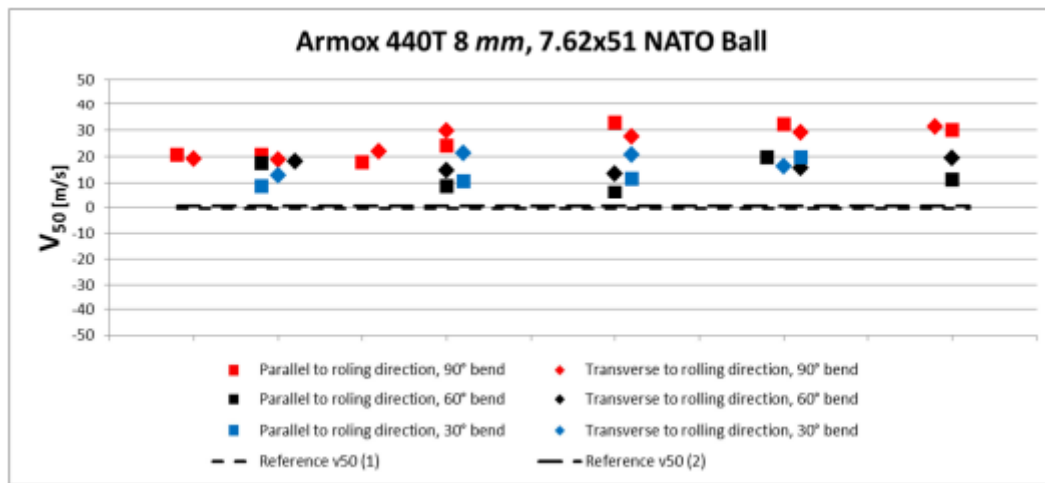


Рисунок 40. Результати балістичних випробувань Армох 440Т, товщина $t=8$ мм, 7,62x51 NATO Ball.

5.4.3 Armox 500T 12 mm

Результати балістичних випробувань, проведених у компанії Åkers Krutbruk Protection AB, наведені нижче у **Рисунку 41**. Тест із використанням 7.62x39 API BZ на Armox 500T 12 мм зазнав невдачі, оскільки не вдалося досягти повного пробиття мішені. У **Рисунку 41** представлені результати тестування із використанням 20 мм FSP. Лінії відображають референсні значення V_{50} , отримані для того ж боєприпасу на нездеформованому матеріалі. Це дозволяє порівняти ефективність мішеней із нездеформованими пластинами

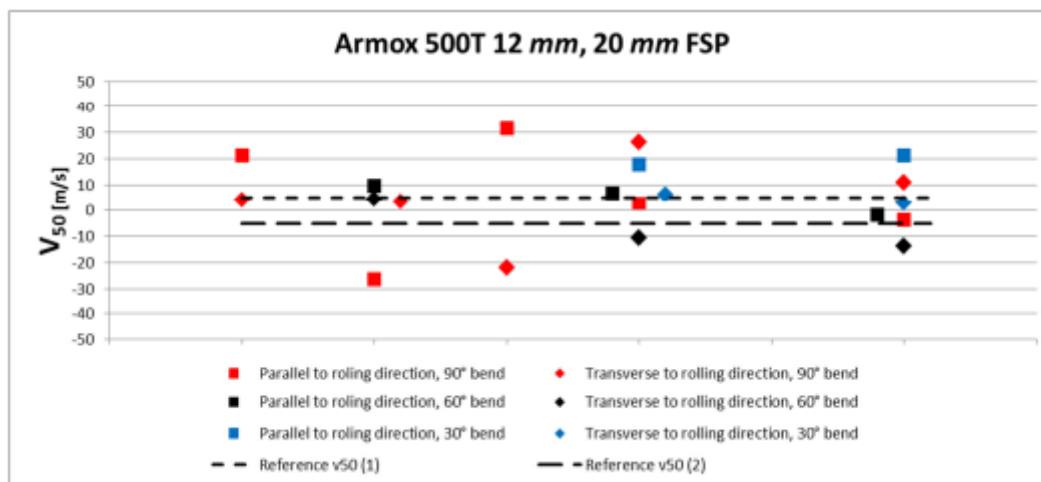


Рисунок 41. Результати балістичних випробувань Армох 500Т, товщина t=12 мм, 20 мм FSP.

5.4.4 Armox 440T 12 мм

Результати балістичних випробувань наведені нижче у **Рисунках 42 та 43**. **Рисунок 42** демонструє результати тестування із використанням **7.62x39 API BZ**, а **Рисунок 43** – із **20 мм FSP**. Лінії відображають референсні значення **V₅₀**, отримані для того ж боєприпасу на нездеформованому матеріалі, щоб показати, як поводить нездеформована мішень.

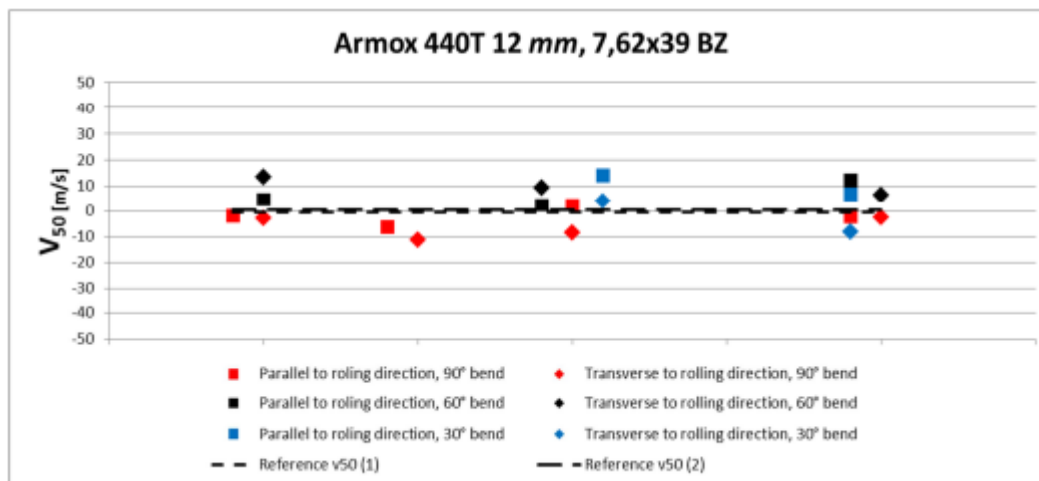


Рисунок 42. Результати балістичних випробувань Армох 440Т, товщина t=12 мм, 7.62x39 API BZ.

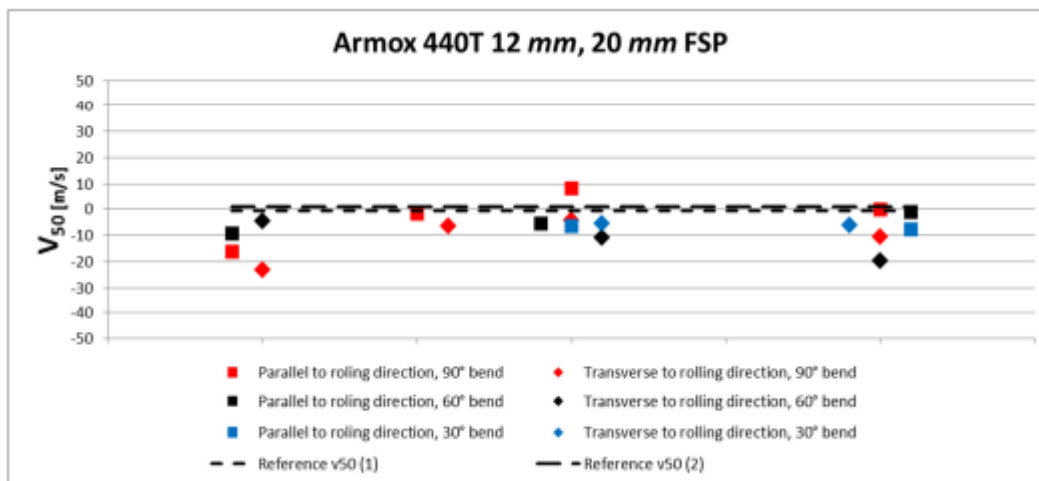


Рисунок 43. Результати балістичних випробувань Армох 440Т, товщина $t=12$ мм, 20 мм FSP.

6. Обговорення (Discussion)

Усі результати було проаналізовано, щоб виявити відмінності та причини впливу згину на балістичні характеристики. Кожен експеримент і його результати розглядаються в **Розділах 6.1 – 6.4**.

6.1 Металографія (Metallography)

Ці тести були проведені для того, щоб дослідити, як змінюється мікроструктура після згинання, і чи впливають очікувані зміни на балістичні характеристики матеріалу.

Очікувалося, що в мікроструктурі з'являться витягнуті зерна на **опуклій стороні** вигину через **розтягуючі напруження**, а на **увігнутій стороні** – **стиснуті зерна** через **стискаючі напруження**.

Після аналізу різних зразків із різними співвідношеннями **радіуса пуансона до товщини матеріалу** за допомогою **ЛОМ** (оптичного мікроскопа) не вдалося виявити змін у мікроструктурі вигнутого матеріалу. На той момент зразки були **протравлені у 3% розчині ніталу**, що дозволяло побачити лише мартенситну мікроструктуру, але не сліди деформації.

Наступним етапом було виявлення **колишніх меж аустенітного зерна**. Після консультації з **Йонасом Естбергом з відділу металографії**, зразки було протравлено у **пiкриновій кислоті**, що дозволило отримати контури колишніх зерен аустеніту. Проте навіть після цього **не вдалося виявити деформації зерен**.

Було отримано консультацію у професора **Горана Енгберга**, який заявив, що у мартенситових сталях **не очікується** візуальних ознак деформації.

Після цього відбулася зустріч із **доктором Дженні Фріц з відділу досліджень та розробок SSAB** для обговорення механізму деформації мартенситових сталей. Було встановлено, що механізм деформації мартенситу **досі не є повністю дослідженим** і існують лише теоретичні припущення щодо змін у мікроструктурі під час деформації. Через це подальше дослідження мікроструктури не проводилося.

6.2 Мікроіндентаційний тест твердості (Microindentation hardness test)

Щоб визначити, що відбувається з матеріалом при його деформації, була обрана інша методика для виявлення впливу згинання на матеріал, що може впливати на його балістичні характеристики.

Було прийнято рішення зробити **профілі твердості** через товщину у трьох точках на кожному зразку з різними співвідношеннями **товщини та радіуса пуансона**. Результати підтвердили теорію, що твердість збільшується на **опуклій стороні** вигину через **наклеп**, а також збільшується на **увігнутій стороні**, але не так значно, як на опуклій стороні. Нейтральна вісь залишалася незмінною, що відповідає теорії.

Після обговорення з **Йонасом Естбергом** було запропоновано застосувати **картографування твердості**, що дало змогу отримати повну картину ефекту деформації на вигнутий матеріал.

Результати дослідження були порівняні з раніше отриманими профілями твердості, і вони збіглися. Проте залишалося відкрите питання: як ці зміни впливають на балістичні властивості **Armox**.

Якщо твердість збільшується разом зі ступенем деформації, пластичність повинна зменшитися. Це означає, що може існувати точка рівноваги, де збільшення твердості позитивно впливає на стійкість до пробиття, але зниження пластичності може призвести до зниження здатності поглинати енергію від удару снаряда.

6.3 Згинання зразків (Bending of specimens)

Для створення нових рекомендацій щодо згинання, внутрішня політика **SSAB** вимагає, щоб загальна випробувана довжина згину становила **5000 мм**. Відповідно, розмір зразка було визначено як **600 мм x 300 мм**. Глибина зразків мала бути не меншою за **300 мм**, щоб вони могли бути зігнуті на пресі.

Тест базувався на попередніх рекомендаціях, але також передбачав перевірку менших співвідношень між **радіусом пуансона та товщиною матеріалу** для подальшого розвитку рекомендацій. Основна частина тесту була спрямована на виявлення найменшого можливого співвідношення, що робило нижчі значення більш пріоритетними для тестування.

Результати тесту були **дуже успішними**, і жодних проблем під час випробувань не виникло. Отримані результати суттєво перевершують попередні рекомендації щодо згинання.

Деякі товщини матеріалу не витримали тесту при **найменших радіусах згину**. Для певних товщин та марок сталі результати відрізнялися між **паралельними та поперечними зразками**.

Згідно з теорією, **згинання є кращим для поперечних зразків**, ніж для паралельних до напрямку прокату, через **анізотропію після прокатки**.

Результати для **Armox 500T** товщиною **5 мм** та **6,5 мм** відповідають цій теорії. Однак це явище було зафіксовано лише для зазначених товщин. Можливо, це пов'язано з тим, що **граничні значення розташовані на межі між успішним та невдалим проходженням тесту**.

Одним із покращень, які можна було б внести у тест, було б **змащування прокатних валів між кожним циклом згинання та використання очищених зразків**.

6.4 Балістичне тестування зразків (Ballistic test of specimens)

Результати балістичних випробувань **не відповідали очікуванням SSAB**. Вважалося, що балістичні характеристики поступово погіршуватимуться зі зменшенням співвідношення між товщиною та радіусом пуансона. Ці припущення ґрунтувалися на інформації з попередніх випробувань.

За отриманими результатами, згинання **незначно впливає на балістичні характеристики** для випробуваних комбінацій **матеріалів та боєприпасів**. Це може бути пов'язано з тим, що **збільшення твердості внаслідок деформації під час згинання** не призвело до значної втрати здатності матеріалу поглинати енергію від снаряда.

Різниця між значеннями **V50** для деформованих і недеформованих зразків була **досить незначною**—менш ніж **5%** у відносному вираженні.

Випробування були **дуже тривалими**, оскільки основні проблеми виникали через **розкид швидкостей снарядів та точність попадання**.

7. Пропозиції для подальших досліджень (Proposals to further studies)

Подальші дослідження в цій темі можуть бути проведені, оскільки це широка та відносно невивчена область. Існує багато різних факторів, які можуть впливати на результати, тому ця тема підходить для подальшого вивчення. Ось деякі пропозиції для подальших досліджень:

- Аналіз декількох співвідношень між радіусом штампу та товщиною матеріалу з картографуванням твердості.
- Аналіз матеріалу за допомогою **SEM/EBSD** на нездеформованому зразку та зігнутому зразку, щоб визначити будь-які зміни у текстурі матеріалу.
- Дослідження декількох зразків, різних товщин, марок сталі та типів боєприпасів. Через складність балістичних випробувань необхідно тестувати кожен систему окремо для отримання достовірних висновків

8. Висновки (Conclusion)

Метою цього дослідження було вивчення впливу згинання на балістичні властивості **Armox**.

Результати випробувань показали, що згинання не має значного впливу на балістичні властивості випробуваних комбінацій матеріалів та боєприпасів. Основні висновки:

- Можливість розробки нових та покращених рекомендацій щодо згинання для **Armox 440T** та **Armox 500T**.
- Згинання не має значного впливу на балістичні властивості досліджених матеріалів та боєприпасів.
- Можливо, що згинання впливає на балістичні властивості матеріалу, збільшуючи твердість, що є позитивним фактором, але також зменшує здатність поглинати енергію під час удару, що є негативним. На жаль, межа, коли здатність поглинати енергію стає надто низькою, не була знайдена під час випробувань.
- Потрібне подальше дослідження для підтвердження цих теорій.

9. Подяки (Acknowledgements)

Я хотів би висловити свою глибоку подяку всім, хто сприяв завершенню цього дослідження. Особливу подяку висловлюю моєму керівнику, **B.S. Oscar Ivarsson** із **SSAB Protection & Tooling**, чийі цінні поради та підтримка допомогли успішно завершити цей проєкт.

Також хочу висловити вдячність співробітникам **SSAB EMEA**, які надали доступ до необхідного обладнання та матеріалів для проведення випробувань. Особливо дякую **M.Sc. Jonas Östberg** з відділу металографії **SSAB** за його підтримку та неоціненне керівництво в лабораторії.

Окрема подяка моєму науковому керівнику з **Dalarna University**, **Doc. Lars Karlsson**, за його підтримку, відданість справі та професійні поради у написанні цього дослідження.

Також висловлюю подяку **Åkers Krutbruk Protection AB** за співпрацю у проведенні балістичних випробувань, зокрема **Fredrik Bratt** за допомогу на цьому етапі дослідження.

10. References

- [1] SSAB EMEA, "The steel you want between you and the risk," 2014. [Online]. Available: <http://www.ssab.com/Global/ARMOX/>. [Accessed 01 06 2014].
 - [2] "SSAB," [Online]. Available: <http://www.ssab.com>. [Accessed 05 02 2014].
 - [3] SSAB EMEA, "The steel book," 2012. [Online]. Available: <http://www.ssab.com/Global/SSAB/Brochures/>. [Accessed 01 06 2014].
 - [4] O. Ivarsson, Interviewee, *Ballistic Engineer*. [Interview]. 17 02 2014.
 - [5] SSAB EMEA, "Armox workshop recommendations," [Online]. Available: <http://www.ssab.com/Global/ARMOX/Brochures/en/>. [Accessed 01 06 2014].
 - [6] P. Jönsson, "KTH," Framställningsmetoder metaller, [Online]. Available: <http://www.met.kth.se/utbildning/4H1063/Lect10a-4H1063-metals.pdf>. [Accessed 03 02 2014].
 - [7] B. Bergman and M. Selleby, *Materiallära för materialdesign*, KTH, 2009.
 - [8] SSAB EMEA AB, *Plåthandboken*, Nyköping, 2010.
 - [9] SSAB Tunnpå, *Formningshandboken*, 1998.
 - [10] ASM Handbook, *Bending of Sheet Metal, Metalworking: Sheet Forming*, Vol 14B, 2006.
 - [11] D. Carlucci and S. Jacobson, "Ballistics, theory and design of guns and ammunition," Taylor & Francis Group, 2007.
 - [12] NATO, "Standardization Agreement," 2004.
 - [13] CEN, "Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance - requirements and classification," 1998.
 - [14] VPAM, "General basis for ballistic material, construction and product tests," 2009.
 - [15] CEN, "Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance - Test method.," 1998.
 - [16] F. C. Barnes, *Cartridges of the World*, 12th Edition, 2009.
 - [17] U.S. Department of Defense, "DETAIL SPECIFICATION, PROJECTILE, CALIBERS .22, .30, .50, AND 20MM FRAGMENT-SIMULATING," 2006.
 - [18] Transeco Bremen, "Material | Transeco Bremen," [Online]. Available: <http://www.transeco-bremen.de/ballistic/material/>. [Accessed 18 02 2014].
 - [19] U.S. Department of Defense, "V50 Ballistic test for armor," 1997.
 - [20] NIJ, "Ballistic Resistant Protective Materials," 1985.
 - [21] S. Jonsson, *Mechanical Properties of Metals and Dislocation Theory from an Engineer's Perspective*, 2008.
 - [22] J. Östberg, Interviewee, *M.Sc.*. [Interview]. 2014.
 - [23] G. Engberg, Interviewee, *Professor*. [Interview]. 13 03 2014.
 - [24] J. Fritz, Interviewee, *Doctor*. [Interview]. 10 04 2014.
- <https://www.kth.se/>