

FORENSIC SIGNIFICANCE OF PERFORATION PATTERN IN POLYCARBONATE SHEET AGAINST 9×19 MM PROJECTILE

Abhishek PRAJAPATI¹, Saurabh KUMAR², Richa ROHATGI¹, Tamanna JAITLY¹, Vinay ASERI³ 

¹ School of Forensic Science, NICFS NFSU Delhi Campus, New Delhi, India

² Institute of Forensic Science Senior Scientific Officer, NFSU-Ballistic Research Centre & Testing Range, Gandhinagar, India

³ School of Forensics, Risk Management and National Security, Rashtriya Raksha University, Gandhinagar, Gujarat, India

Abstract

Polycarbonate is widely used as structural material due to its extreme resistance to impact and perforation. In a crime involving firearms, the bullet may impact various objects fitted with or made of polycarbonate sheets leaving high chances of discovering the fractured PC sheets and fragments at the scene of crime; hence, these objects may become objects of the criminal investigation. In the present work the perforation pattern of PC sheets of thicknesses 8 mm, 10 mm, 12 mm and 15 mm at firing ranges 5 m and 10 m when impacted against 9×19 mm full metal jacket (FMJ) bullet were examined. It was observed that after impact, the PC sheet develops entry hole smaller than the calibre of bullet; formation of crack zone, plastic zone; and petalling on the distal face was observed. It was found that as the thickness of the sheet increases, the diameter of the entry hole increases, the diameter of the exit hole initially increases and then becomes constant. At 5 m range of fire the trend of crack zone becomes nearly constant from 8 mm to 15 mm thickness, however, at 10 m range of fire crack zone increases from 8 mm to 15 mm thickness. Furthermore, the diameter of the plastic zone increases as the thickness of the sheet increases (from 8 mm to 15 mm, respectively).

Keywords

Forensic significance; Perforation pattern; Polycarbonate sheet; 9×19 mm full metal jacket projectile; Ballistic impact; Fracture analysis.

Received 23 January 2023; accepted 15 May 2023

Introduction

Polycarbonate (PC) is a high-performance (Al-Aboodi, Sivasankaran, 2018) amorphous polymer known for its excellent ductility (Cao, Wang, Wang, 2014) and viscoelastic properties (Cui, Borgemenke, Liu, Li, 2019) that offers high resistance to impact and perforation (Dorogoy, Rittel, Brill, 2011; Ganguly, Channe, Jha, Mitra, Saha, 2021). PC has been utilized as a structural material due to its dimensional stability (Hasanov, Gupta, Nasirov, Fidan, 2020), toughness (Jadhav, Patil, Kandasubramanian, 2022),

UV protection (Jang, 2018), glass-transition temperature (Kausar, 2018), extreme impact strength, thermoplastic nature (Khan, Joshi, Deshmukh, 2022), decent production cost, lightweight (Landi, Logozzo, Moretini, Valigi, 2022), good fire rating, excellent weathering resistance (Li, Goldsmith, 1997), heat resistance (Moisa, Landsberg, Rittel, Halary, 2005) and transparency (Moradi et al., 2021). The polycarbonate sheet has 250 times better impact resistance than glass of the same thickness (Nomai, Schlarb, 2019). The wide range of applications of PC includes automotive parts, security shielding components (Park et al., 2020),

electronic components (Prajapati, Rohatgi, Kumar, 2022), telecommunication hardware (Raj, Kumar, 2021), polycarbonate-based composites (Ravi-Chandar, 1995), machine guards (Rittel, Levin, 1998), barrel vaults, skylights, covered walkways, bus shelters, sign boards (Rittel, 2000), household applications, medical applications (Shah, Abakr, 2008), aerospace applications (Shah, 2009), optical lenses (Shah, 2009), biocompatible materials, lightweight transparent armour for protection, jet fighter canopies and also used for the preparation of nanotubes and nanowires (Zhou et al., 2022).

In a crime involving firearms, the bullet may impact various objects made of or fitted with polycarbonate sheets, hence, these objects may become objects of the criminal investigation (Wright, Fleck, Stronge, 1993). A number of studies have been

conducted to characterise the static/dynamic flow and failure properties of polycarbonate structures (Wright, Huang, Fleck, 1992). In the year 1992 a team investigated the penetration behaviour of PC structures using circular cylindrical hardened steel punches based on quasi-static deep penetration tests. It was found that at the end of the punch a diffused zone of microcracks forms and is contained entirely within the plastic zone, the refractive index of PC changes markedly at yield, enabling the measurement of the plastic zone boundary (Zhang et al., 2020).

In 1993 the team further investigated the resistance of thin PC plates (2, 5 and 12 mm thickness) impact by round and cylindrical projectiles. It was concluded that five different modes of deformation are present, i.e., elastic dishing, petalling, deep penetration, cone cracking and plugging. In the year 1997, Li and

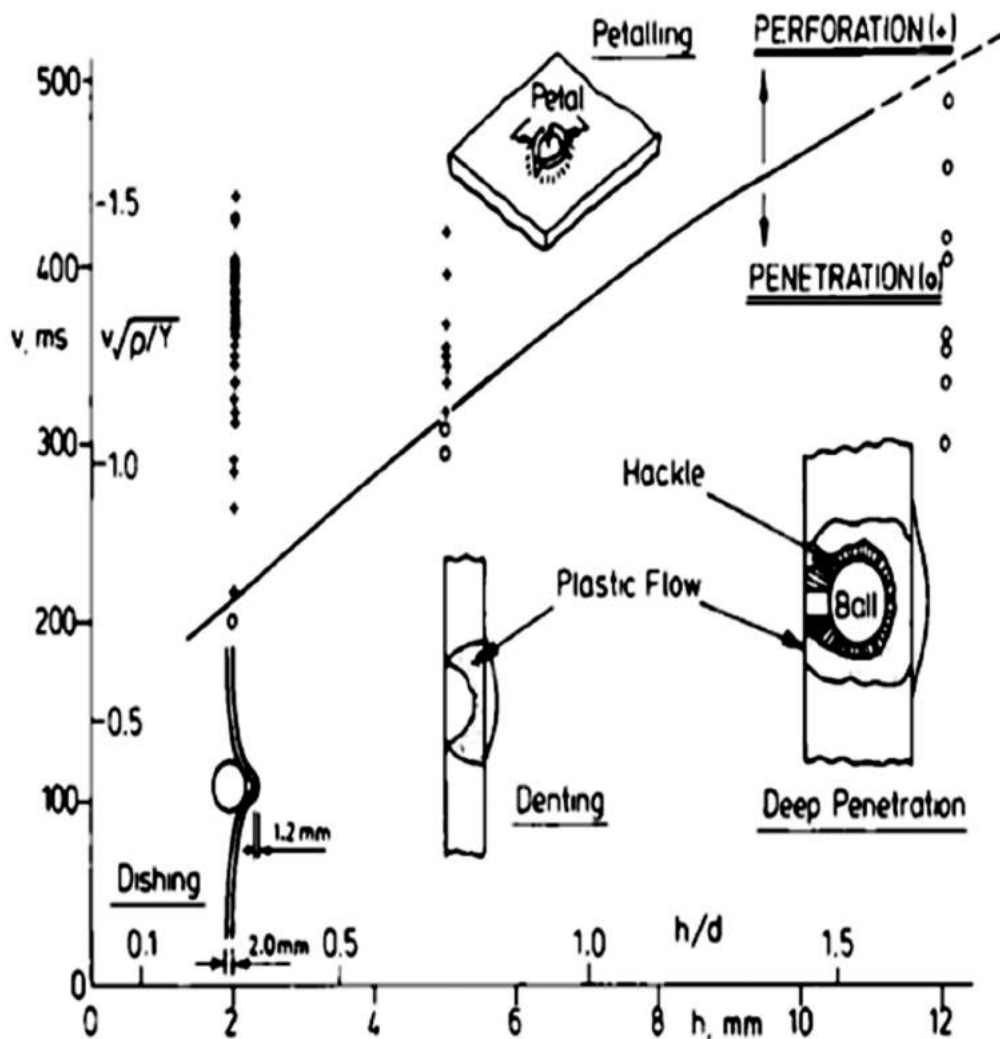


Figure 1. Failure mechanism for ballistic impact of polycarbonate by spherical missiles (hollow points indicate penetration, crossed indicate perforation; Zhang et al., 2020).

Goldsmith investigated the inclined impact on thin PC plates (less than 6.4 mm thick) and it is concluded that the resulting perforated hole exhibits a much smaller diameter than the projectile (Zhu et al., 2021), indicating a substantial capability for recovery the ballistic resistance of clamped thin PC plates to single and multiple ballistic impacts and it is concluded that reinforcements should be provided near the clamped edges (Zhou et al., 2022).

In the present work experimental firing of 9 × 19 mm full metal jacket (FMJ) bullet was conducted on polycarbonate sheets of thicknesses 8 mm, 10 mm, 12 mm and 15 mm at firing ranges of 5 m and 10 mm and the perforation pattern and its forensic significance is discussed in this paper.

Material and methods

1. Sample collection

Ultralite® UV2 solid polycarbonate (PC) sheets of thicknesses 8 mm, 10 mm, 12 mm and 15 mm were considered. Each PC sheet of size 150 mm × 150 mm was directly obtained from Saraswati Plastotech India Pvt Ltd. The physical and mechanical properties of PC sheet are presented in Table 1.

9 × 19 mm full metal jacketed (FMJ) bullet as shown in Figure 3 is used for the experiment. The physical parameters of the projectile are given in Table 2.

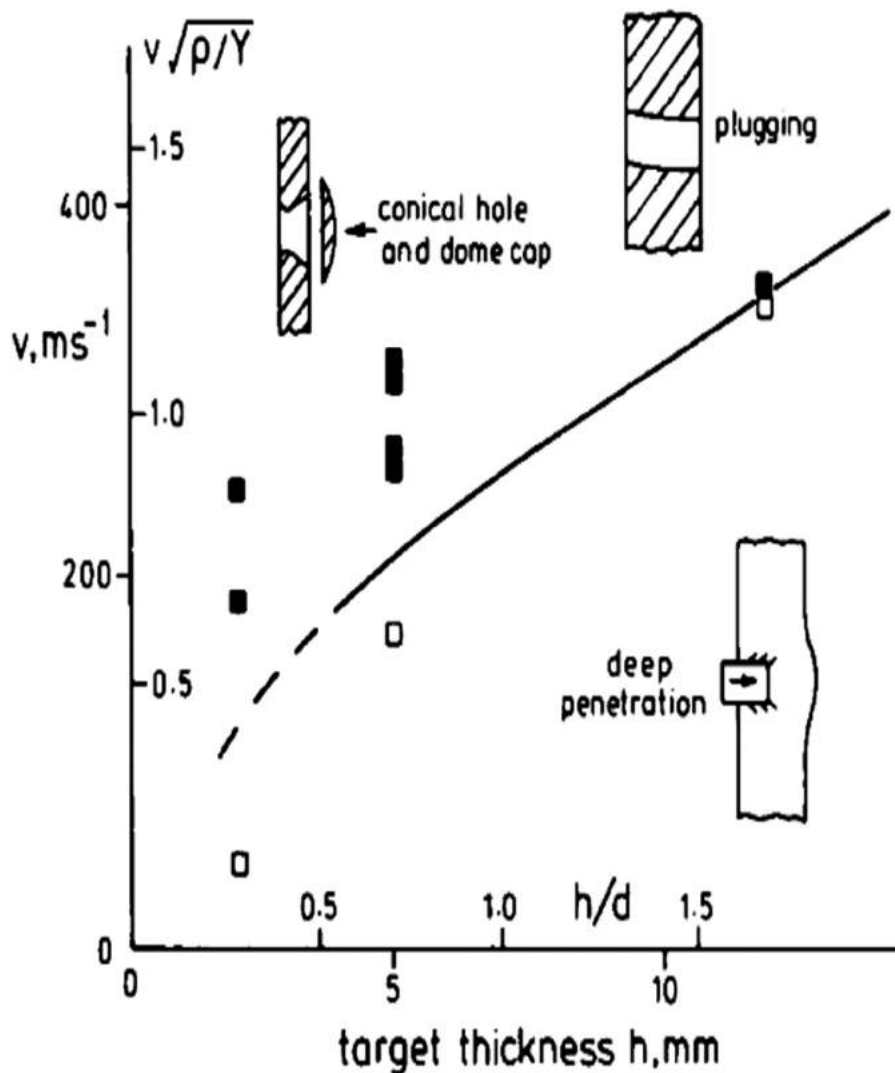


Figure 2. Mechanism for ballistic impact of polycarbonate by flat-ended cylindrical missiles (hollow points indicate penetration solid points indicate perforation; Wright et al., 1992).

Table 1
Physical and mechanical properties of polycarbonate (PC)

Property	Typical values	Unit	Test method
Density	1.2	g/cm ³	ASTM D 792
Refractive index	1.58	–	ASTM D 542
Tensile stress at yield	>60	MPa	ASTM D 638
Tensile strength	>60	MPa	ASTM D 638
Elongation at break	110	%	ASTM D 638
Elastic modulus	2400	MPa	ASTM D 638
Limiting flexural stress	93.1	MPa	ASTM D 790
Rockwell hardness	118	R	ASTM D 785

Table 2
Physical parameters of the projectile

Feature	9 × 19 mm full metal jacket (FMJ) bullet
Bullet mass	7.457 gm
Bullet type	Round nose, full metal jacket
Bullet length	14.71 mm
Bullet diameter	9 mm
Make	Indian
Manufactured by	Ammunition Factory Kirkee/Khadki (AFK)

As Figure 4 shows, the samples were given a unique identification code as PC/T8-15/R5, PC/T8-15/R10, with the initial alphabets representing the material of sheet, i.e. PC for polycarbonate, the letter T stands for thickness, while the next number signifies thickness of the sheet in millimeters (mm). The letter R stands for range, while the next number denotes the range of fire in meters (m).

The following terminology was used in this experiment: the strike face (SF) of the sheet is the surface that faces the incoming projectile (Ballistic Resistance of Personal Body Armor, 2008). Distal face is the one that runs parallel to and away from the impact surface. Crack zone is the zone of microcracks around the hole caused by the projectile, and plastic zone is the area outside the crack zone where the surface has deformed but no cracks have formed. The detailed configurations with the physical parameters of the samples are tabulated in Table 3.

Strain rate effects

The rate at which the load is applied to the polycarbonate sheet plays a significant role in its deformation



Figure 3. 9 × 19 mm full metal jacket bullet.

behavior. At high strain rates, the material response changes due to the increase in temperature caused by the deformation process itself. This is known as adiabatic heating, and it can cause a material to soften and become more ductile, leading to increased plastic deformation.

Shear thickening behaviour

Polycarbonate has been proven to exhibit a phenomenon known as shear thickening, where the material becomes stiffer and more resistant to deformation as the strain rate increases. However, beyond a certain critical strain rate, the material suddenly becomes much more deformable, leading to a significant increase in plastic deformation.

Localized heating

When a bullet strikes a polycarbonate sheet, it generates heat due to friction and deformation. This localized heating can cause the material to soften and become more ductile, leading to increased plastic deformation. Additionally, the heat generated by the bullet impact can also cause the material to undergo a phase change, leading to further changes in its mechanical properties. Due to the hard and brittle nature of PC

sheet, the material response of the reflective wave was not seen upon sudden impact between PC sheet and projectile, causing PC sheet to deform more severely.

Table 3
Detailed configuration and physical properties of samples

Sample code	Thickness of sheet (mm)	Number of sheets	Range of fire (m)	Size of sheet (mm)
PC/T8/R5	8	3	5	150 × 150
PC/T8/R10	8	3	10	150 × 150
PC/T10/R5	10	3	5	150 × 150
PC/T10/R10	10	3	10	150 × 150
PC/T12/R5	12	3	5	150 × 150
PC/T12/R10	12	3	10	150 × 150
PC/T15/R5	15	3	5	150 × 150
PC/T15/R10	15	3	10	150 × 150

2. Experimental procedure

The fragments and parts of PC are likely to be found at the scene of crime hence it is crucial to analyse the material of sample. This analysis was carried out by the application of Raman and Fourier transform infrared spectroscopy.

For the ballistic testing, a single shot impact at 90 degree was done through an universal test barrel of length 250 mm, right-hand twist consisting of 6 lands and 6 grooves, manufactured by Prototypa, Czech Republic. Samples were fixed on a metallic fixture. 9 × 19 mm full metal jacketed projectile was fired from firing distances of 5 m and 10 m respectively. A total of 24 samples were test-fired. Single-shot of 9 × 19 mm full metal jacketed bullet was fired on each sample. The target velocity of the projectile was measured at 2.5 m with the help of intelligent velocity light gates (manufactured by Prototypa). The schematic representation of experimental setup is given in Figure 5.

After firing, samples were collected for analysis. During the analysis, photographs of damaged area of samples were captured and different parameters such as diameter of entry hole, diameter of exit hole, diameter of crack zone and diameter of plastic zone were documented using digital vernier calliper. Identification of sample material was carried out by Raman spectrometer (Foster & Freeman, Model: Foram 785-3) and FTIR spectrometer (M/S Thermofisher Scientific, Model: Nicolet iS 20).

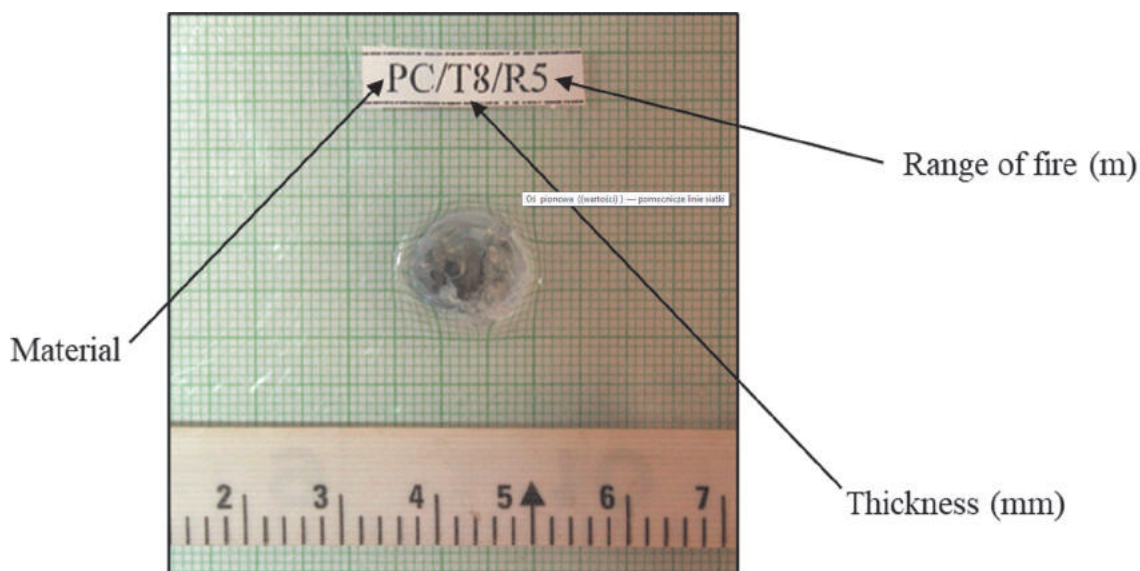


Figure 4. Representation of sample coding (PC is used for material of sheet, T stands for the thickness of the sheet in mm and R stands for range of fire in meters; the photograph shows the distal face of PC sheet after firing against 9 × 19 mm full metal jacketed bullet).

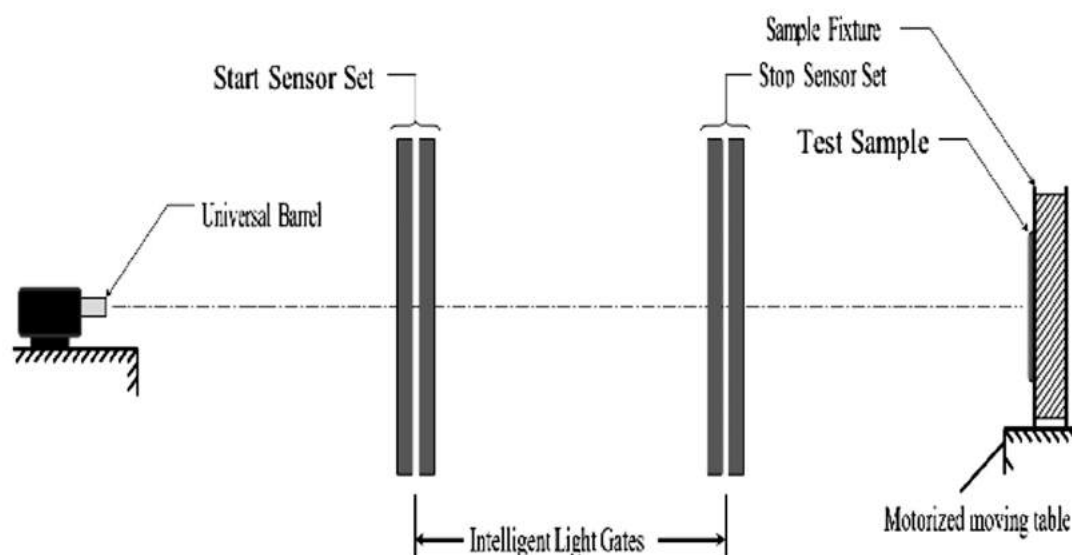


Figure 5. Schematic diagram of experimental setup.

Results and discussion

When polycarbonate sheet is impacted against the 9×19 mm projectile at the point of impact, transfer of energy takes place between the projectile and target surface. Due to the projectile's kinetic energy, the projectile deforms its shape and the sheet bends in the direction of the projectile. When the kinetic energy of projectile exceeds the ultimate tensile strength of the polymer plate, it ruptures and a hole is created. As the thickness of target sheet increases, the resistance offered by the sheet to the passage of projectile increases. Projectile imparts more kinetic energy to the sheet as the thickness of the sheet increases. The target sheet also takes up energy and moves in lateral direction causing the hole to expand. In some cases small particles/chips are projected in the direction of firing. The identification of obtained samples was carried out by the application of Raman spectroscopy and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The observed spectrum of the samples was matched with the Raman

and FTIR references respectively, indicating the presence of polymer material. The outcomes are displayed in Figure 6 and Figure 7.

Performance of PC sheet against 9×19 mm projectile

The impact of 9×19 mm projectile creates hole in the PC sheet. This hole is surrounded by micro cracks, the area of micro cracks is known as a crack zone. This crack zone is enclosed by the plastic zone which is the area where the surface has been deformed without any crack formation. Petalling has been noticed at the distal face. Figure 8 shows the perforation pattern in detail.

The diameter of the entry hole, diameter of the exit hole, diameter of the crack zone, and diameter of the plastic zone were used to analyse the perforation pattern on PC sheet. Table 4 shows the data of the performance of PC sheets.

(a) Identification of polycarbonate (PC) by Raman spectroscopy

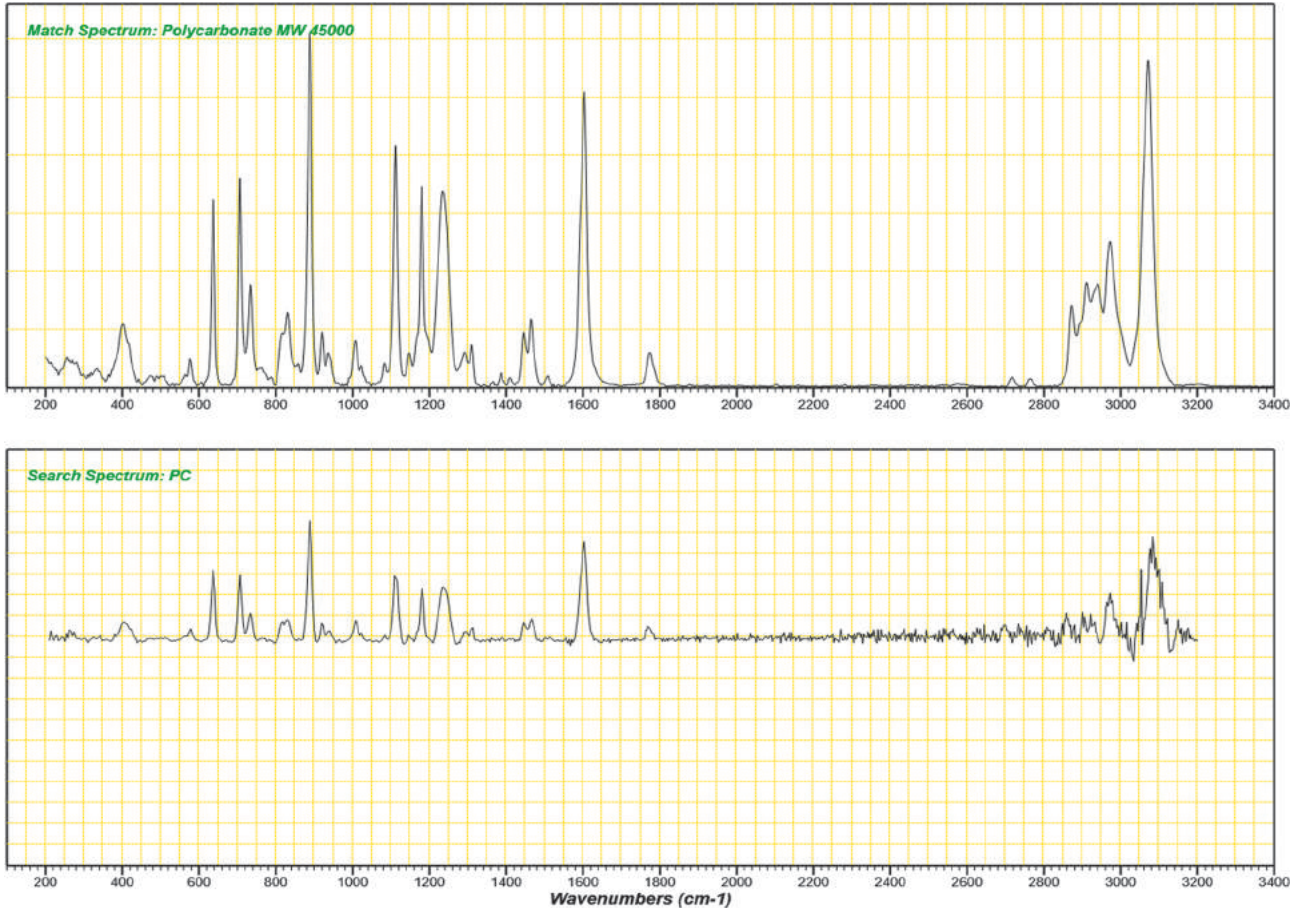


Figure 6. Raman spectrum of reference and obtained sample of PC showing match.

(b) Identification of polycarbonate (PC) by FTIR spectroscopy

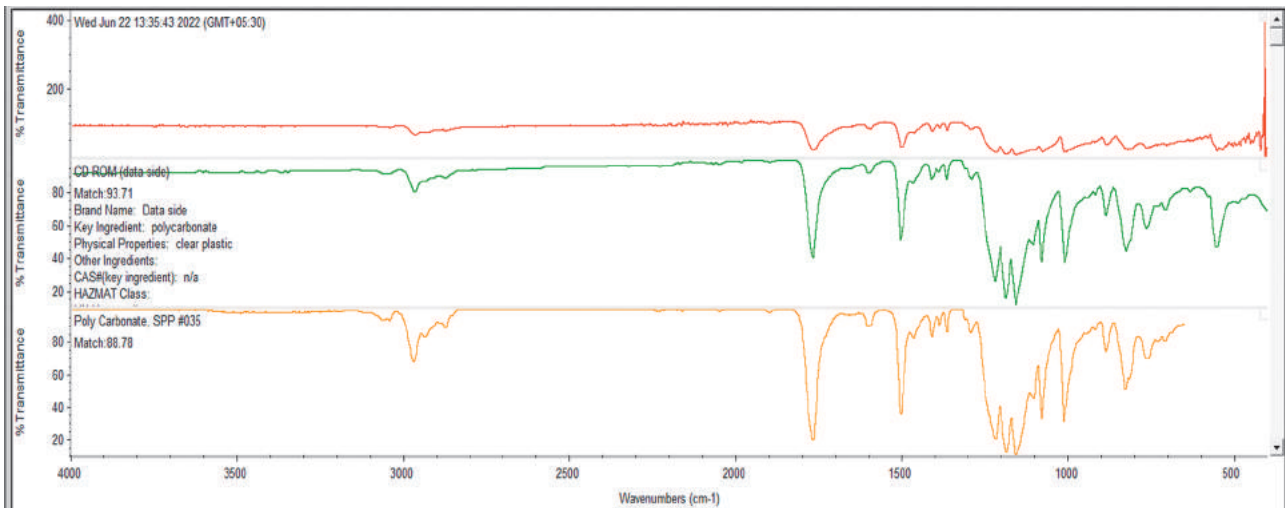


Figure 7. FTIR spectrum of reference and obtained sample of PC showing match.

The Figure 9 and Figure 10 show macro-pictorial representation consist of the perforation pattern caused by the 9×19 mm full metal jacketed bullet on PC sheets of thicknesses 8 mm, 10 mm, 12 mm, 15 mm at 5 and 10 m range of fire.

(a) Diameter of entry hole in PC sheets of different thicknesses at different range of fire

When the 9×19 mm full metal jacketed bullet was fired through sheets of various thicknesses at firing

ranges 5 m and 10 m, the resulting entry hole diameters are given below in Table 5 and are also shown in Figure 11. This table shows that at 5 m range of fire the diameter of entry hole increases when the thickness of sheet increases from 8 mm to 15 mm. At 10 m range of fire it initially increases from thickness 8 mm to 10 mm, then decreases at thickness 12 mm and again increases at thickness 15 mm. In other words, as the thickness of the sheet increases, the diameter of the entry hole increases.

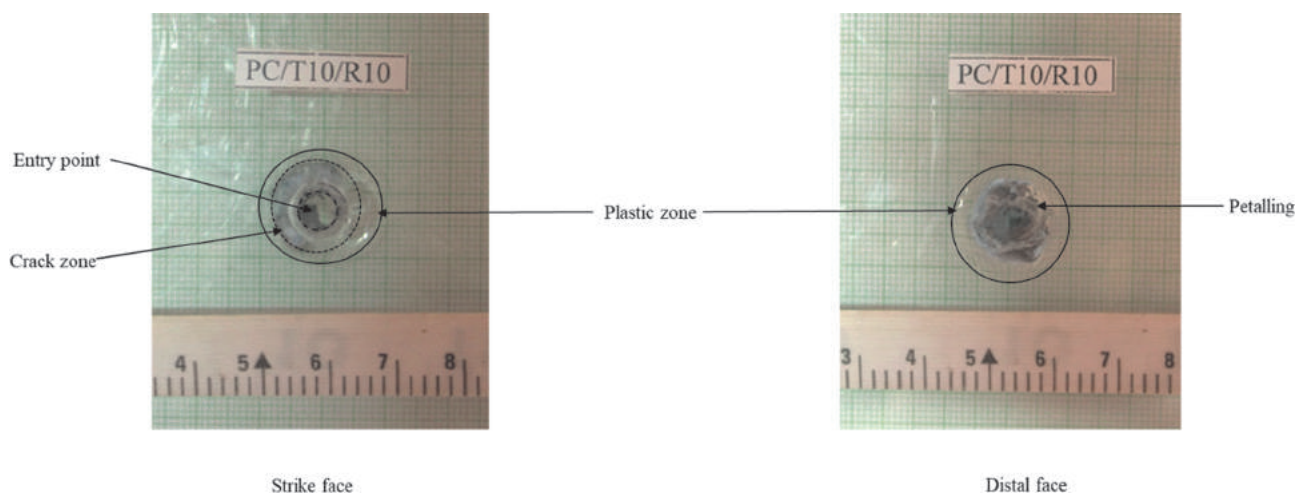


Figure 8. Detailed view of perforation pattern on PC sheet when impacted against 9×19 mm full metal jacketed bullet.

Table 4

Performance of PC sheet against 9×19 mm full metal jacketed bullet

Sample code	Test velocity (m/s)	Diameter of entry hole (mm)	Diameter of exit hole (mm)	Diameter of crack zone (mm)	Diameter of plastic zone (mm)
PC/T8/R5	432.97±0.29	6.73±0.15	8.88±1.02	10.08±0.09	15.24±0.74
PC/T8/R10	435.30±0.28	7.38±0.70	8.78±0.90	10.15±0.07	16.35±0.39
PC/T10/R5	433.30±2.34	7.22±0.27	10.02±0.49	11.73±0.04	16.32±0.99
PC/T10/R10	432.45±1.96	8.10±0.30	9.07±1.45	11.52±0.60	17.43±0.10
PC/T12/R5	431.37±0.49	7.69±0.50	10.1±1.16	11.23±0.32	17.63±0.36
PC/T12/R10	432.98±1.63	6.64±0.32	9.08±1.20	13.58±0.51	17.67±0.52
PC/T15/R5	434.02±0.18	7.76±0.12	10.2±0.41	10.54±0.29	17.88±0.68
PC/T15/R10	433.29±0.55	8.00±0.16	10.7±1.12	14.69±0.33	20.54±0.13

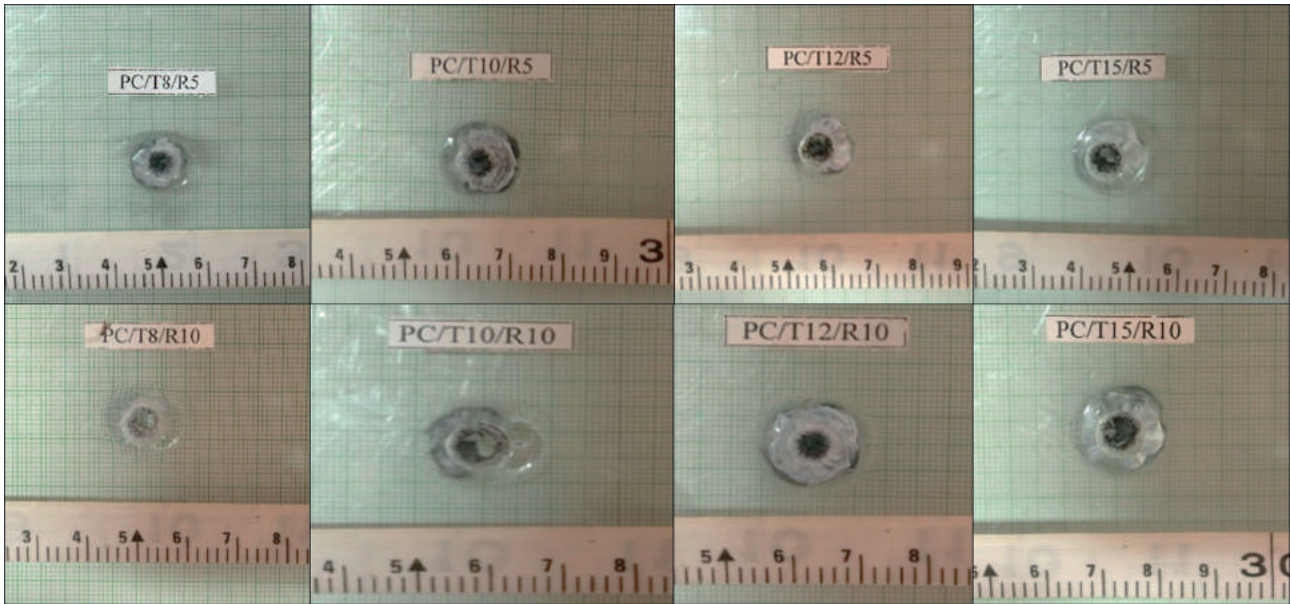


Figure 9. Strike face (entry hole) of PC sheets when impacted against 9×19 mm full metal jacketed bullet.

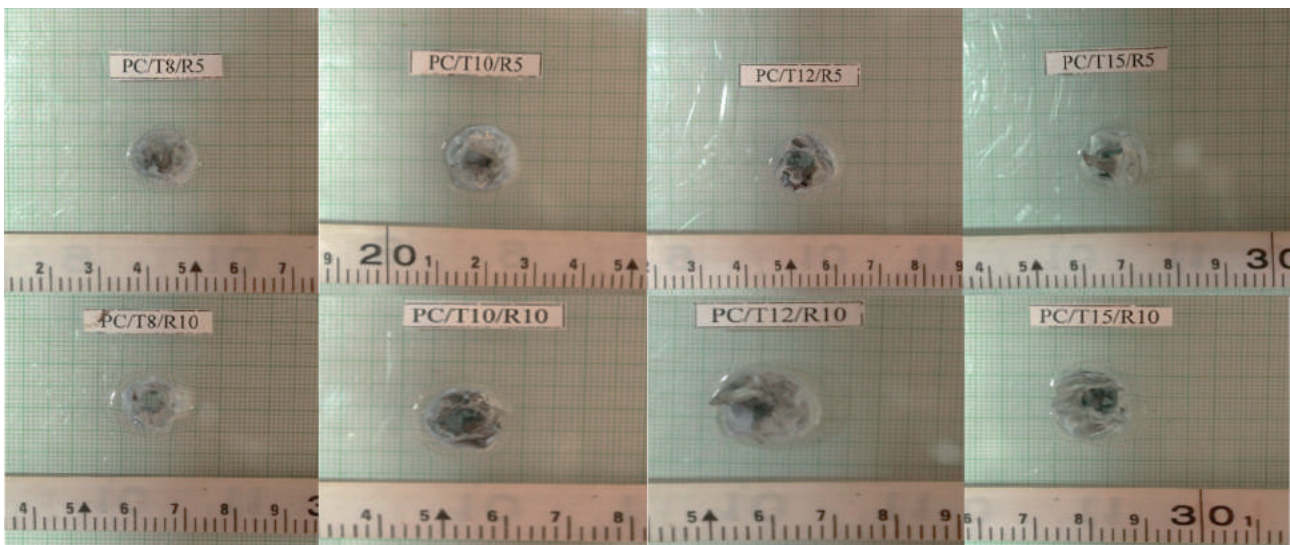


Figure 10. Distal face of PC sheets when impacted against 9×19 mm full metal jacketed bullet.

Table 5
Relation between the thickness of PC sheet and diameter of entry hole at 5 m and 10 m range of fire

Thickness of PC sheet (mm)	Diameter of entry hole at 5 m range of fire (mm)	Diameter of entry hole at 10 m range of fire (mm)
8	6.73±0.15	7.38±0.70
10	7.22±0.27	8.10±0.30
12	7.69±0.50	6.64±0.32
15	7.76±0.12	8.00±0.16

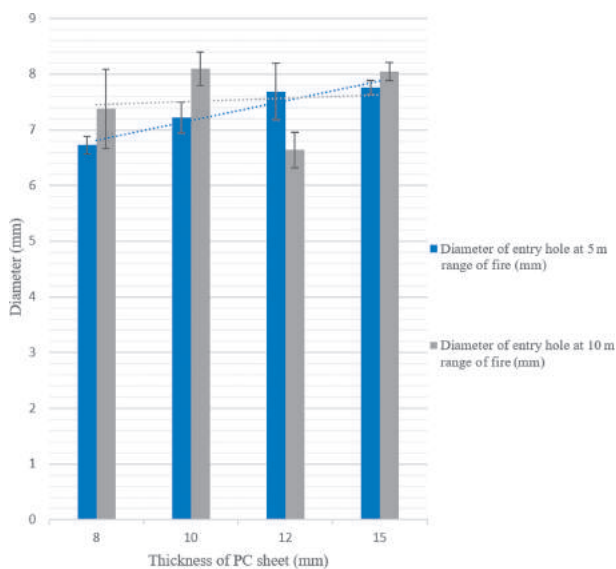


Figure 11. Relation between the thickness of PC sheet and diameter of entry hole at 5 m and 10 m range of fire when impacted against 9 × 19 mm full metal jacketed bullet

(b) Diameter of exit hole in PC sheets of different thicknesses at different range of fire

The resulting exit hole diameters of PC sheets of various thicknesses, when impacted against the 9 × 19 mm full metal jacketed bullet at firing ranges 5 m and 10 m, are given below in Table 6 and are also shown in Figure 12. Table 6 shows that at 5 m range of fire the diameter of exit hole initially increases when the thickness of sheet increases from 8 mm to 10 mm and it remains constant in thickness from 10 mm to 15 mm. At 10 m range of fire it initially increases from thickness 8 mm to 10 mm, then becomes constant at 10 mm to 12 mm, and then again increases at thickness 15 mm. In other words, as the thickness of the sheet increases, the diameter of the exit hole initially increases and then becomes constant. When the polycarbonate sheet is impacted by a bullet at a closer range, the kinetic energy of the bullet is higher, resulting in a larger

amount of energy being transferred to the material. This increased energy transfer can cause the material to undergo more significant deformation, resulting in a larger entry diameter.

As the 9 × 19 mm bullet’s kinetic energy is greatest at 5 metres, and as a result of yaw or other ballistic parameters, the entry hole diameter at 5 metres is larger than at 10 metres, the author might consider looking into or even include these parameters in future studies.

At a further range, the bullet loses kinetic energy due to air resistance, resulting in a lower amount of energy being transferred to the material. This decreased energy transfer can cause the material to undergo less deformation, resulting in a smaller entry diameter.

However, it is also important to note that other factors such as the velocity and size of the bullet, as well as the properties of the polycarbonate sheet, can also influence the deformation behavior and the resulting entry diameter. Therefore, a more detailed analysis of the experimental data and the material properties would be necessary to provide a more definitive explanation of the observed behavior.

Table 6
Relation between thickness of PC sheet and diameter of exit hole at 5 m and 10 m range of fire

Thickness of PC sheet (mm)	Diameter of exit hole at 5 m range of fire (mm)	Diameter of exit hole at 10 m range of fire (mm)
8	8.88±1.02	8.78±0.90
10	10.02±0.49	9.07±1.45
12	10.1±1.16	9.08±1.20
15	10.2±0.41	10.7±1.12

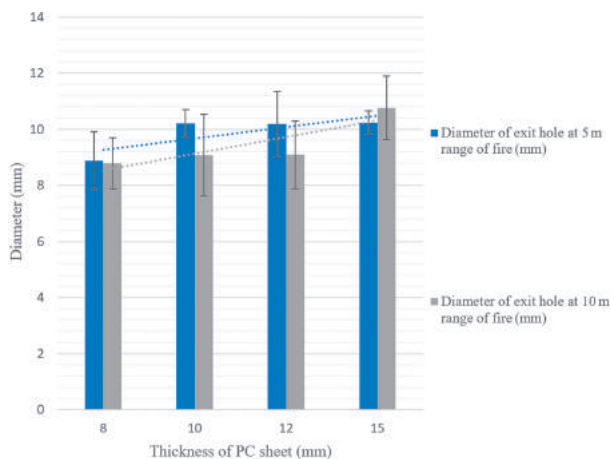


Figure 12. Relation between thickness of PC sheet and diameter of exit hole at 5 m and 10 m range of fire when impacted against 9 × 19 mm full metal jacketed bullet.

(c) Diameter of crack zone in PC sheets of different thicknesses at different range of fire

The impact result of 9 × 19 mm full metal jacketed bullet fired through PC sheets of various thicknesses at firing ranges 5 m and 10 m is given below in Table 7 and is also shown in Figure 13. This table shows that at 5 m range of fire the diameter of crack zone initially increases when the thickness of sheet increases from 8 mm to 10 mm, then decreases from 10 mm to 15 mm. From the values it is clear that at this range of fire the trend of crack zone becomes nearly constant from 8 mm to 15 mm thickness. At 10 m range of fire it increases from thickness 8 mm to 15 mm.

Table 7
Relation between thickness of PC sheet and diameter of crack zone at 5 m and 10 m range of fire

Thickness of PC sheet (mm)	Diameter of crack zone at 5 m range of fire (mm)	Diameter of crack zone at 10 m range of fire (mm)
8	10.08±0.09	10.15±0.07
10	11.73±0.04	11.52±0.60
12	11.23±0.32	13.58±0.51
15	10.54±0.29	14.69±0.33

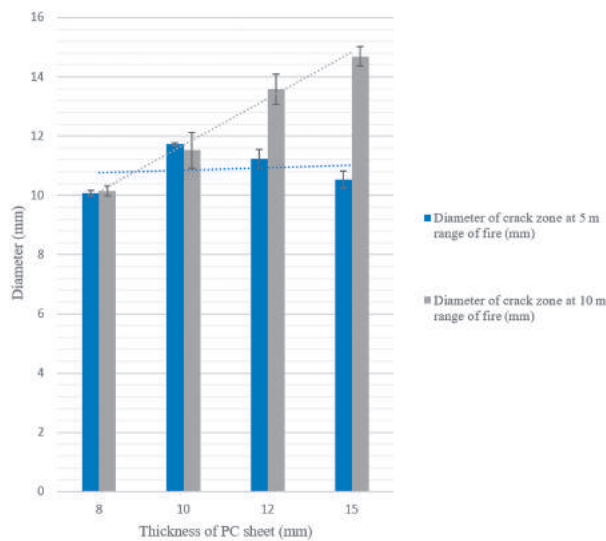


Figure 13. Relation between thickness of PC sheet and diameter of crack zone at 5 m and 10 m range of fire when impacted against 9 × 19 mm full metal jacketed bullet.

(d) Diameter of plastic zone in PC sheets of different thicknesses at different range of fire

The resulting diameters of plastic zone of PC sheet of various thicknesses at firing ranges 5 m and 10 m, against 9 × 19 mm full metal jacketed bullet are given in Table 8 and are also shown in Figure 14. This table shows that at both 5 m and 10 m range of fire, as the thickness of the sheet increases, the diameter of the plastic zone increases.

Table 8
Relation between thickness of PC sheet and diameter of plastic zone at 5 m and 10 m range of fire

Thickness of PC sheet (mm)	Diameter of plastic zone at 5 m range of fire (mm)	Diameter of plastic zone at 10 m range of fire (mm)
8	15.24±0.74	16.35±0.39
10	16.32±0.99	17.43±0.10
12	17.63±0.36	17.67±0.52
15	17.88±0.68	20.54±0.13

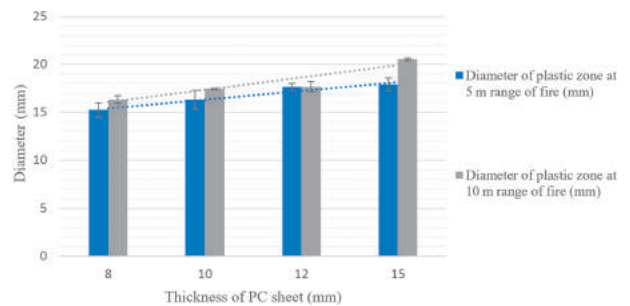


Figure 14. Relation between thickness of PC sheet and diameter of plastic zone at 5 m and 10 m range of fire when impacted against 9 × 19 mm full metal jacketed bullet.

Practical implications of the study

- When the projectile passes through the target sheet, the projectile loses its energy. Stress is developed on sheet. Some of the energy is used up in bending the sheet in the direction of motion of the projectile and some energy of the projectile is used up in the deformation of its nose. In PC sheets development of crack zone, plastic zone; and petalling on the distal face was observed.
- The perforation of PC sheets of various thickness results in different hole diameter. When the bullet impacts the PC sheet, the stress which cause the sheet to move in lateral direction depend upon

sheet thickness. The stresses together with nose deformation assist in determining whether the diameter of hole will be smaller or larger than the calibre of bullet. In thin sheets of PC, the stresses are less than the elastic limit of the sheet and the nose of the bullet does not deform much, which shows the diameter of bullet hole is smaller than the calibre of the bullet. As the thickness increases, more energy is used in lateral movement of PC sheet around the hole and also, nose of the bullet gets deformed and thus, the diameter of the hole becomes approximately equal to calibre of the bullet. But, when we move at higher thickness, stresses which help in lateral movement of sheet around the hole are large and it results in an increase in the diameter of bullet hole.

- Since of the viscoelastic nature of PC, the exit hole appears smaller because the impact site reverts to its original position after the impact, resulting in the development of a smaller seeming exit hole.
- On fixed parameters, regularity in the measurements was observed. In forensic investigation, these trends and observations may lead to the determination of the kind of weapon used in committing the crime.
- When the calibre is known, comparison between 5 m and 10 m range of fire demonstrate that range of fire may be calculated. Hole diameter measurements can be plotted in the respective graph and range of fire can be determined. The components and characteristics employed in this experiment, as well as other environmental factors, are used to determine distance. If one or more factors or parameters are altered, the observations and findings will change as well. In forensic investigations, bullet holes inquiry to discover these parameters with the use of fracture analysis might be profitable.

Provided the foregoing facts, it is clear that this type of research might be extended to examine the perforation pattern of PC sheets using weapons of different calibres, sheets of various thicknesses, with different ranges and angles and multiple fracture on a particular sheet. It is also worth considering bullet deformation. The results of this study are significant as they can help the forensic community investigate by interpreting the facts.

Conclusion and future aspect

The ballistic impact behaviour of polycarbonate is similar to metals, although the specific mechanism of perforation is somewhat different. The use of PC

sheets is growing with time because of their properties including robustness, durability, high impact resistance, and much less threat of damage. There are high chances that the fractured PC sheets and fragments can be found at the scene of crime involving firearms. In the present work, the perforation pattern of PC sheets of various thicknesses when impacted against 9×19 mm full metal jacketed bullet were examined. The test velocities of the bullets were approximately 433 ± 2 m/s. The thicknesses of PC sheet considered were 8 mm, 10 mm, 12 mm and 15 mm. From these firings, given the information above it is clear that this kind of research might be broadened to look at multiple fracture patterns on PC sheet using weapons of different calibres with the effect of firing at different ranges and angles. Additionally, it's crucial to consider bullet deformation and an analysis of the gunshot residue on PC sheets of various thicknesses.

Acknowledgments

The authors appreciate the facilities and experimental support provided by Ballistic Research Centre and Testing Range (BRCTR), National Forensic Sciences University (NFSU) in Gandhinagar. The guidance and support offered by Shri S. G. Khandelwal, Head-BRCTR, Mr. Abhijitsinh Parmar, Scientific Assistant, and Ms. Kruti Panara during the ballistic trial was really beneficial. A special acknowledgement to Saraswati Plastotech India Pvt Ltd for providing Ultraliite® UV2 solid polycarbonate sheet for ballistic testing.

References

1. Alaboodi, A. S., Sivasankaran, S. (2018). Experimental design and investigation on the mechanical behavior of novel 3D printed biocompatibility polycarbonate scaffolds for medical applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 35, 479–491.
2. Ballistic Resistance of Personal Body Armor (2008). *NIJ Standard – 0101.04*. Washington D.C.: National Institute of Justice.
3. Cao, K., Wang, Y., Wang, Y. (2014). Experimental investigation and modeling of the tension behavior of polycarbonate with temperature effects from low to high strain rates. *International Journal of Solids and Structures*, 51(13), 2539–2548.
4. Cui, S., Borgemenke, J., Liu, Z., Li, Y. (2019). Recent advances of 'soft' bio-polycarbonate plastics from carbon dioxide and renewable bio-feedstocks via straightforward and innovative routes. *Journal of Cleaner Production*, 34, 40–52.

5. Dorogoy, A., Rittel, D., Brill, A. (2011). Experimentation and modeling of inclined ballistic impact in thick polycarbonate plates. *International Journal of Impact Engineering*, 38(10), 804–814.
6. Ganguly, A., Channe, P., Jha, R., Mitra, S., Saha, S. (2021). Review on transesterification in polycarbonate-poly(butylene terephthalate) blend. *Journal of Polymer Engineering*, 61(3), 650–661.
7. Hasanov, S., Gupta, A., Nasirov, A., Fidan, I. (2020). Mechanical characterization of functionally graded materials produced by the fused filament fabrication process. *Journal of Materials Processing Technology*, 58, 923–935.
8. Jadhav, V. D., Patil, A. J., Kandasubramanian, B. (2022). Polycarbonate nanocomposites for high impact applications. (In) S. Mallakpov, C. M. Hussain, Handbook of consumer nanoproducts (pp. 257–281). Springer.
9. Jang, K.-S. (2018). Mechanics and rheology of basalt fiber-reinforced polycarbonate composites. *Journal of Polymers*, 147, 133–141.
10. Kausar, A. (2018). A review of filled and pristine polycarbonate blends and their applications. *Journal of Polymer Films and Sheeting*, 34(1), 60–97.
11. Khan, S., Joshi, K., Deshmukh, S. (2022). A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. *Materials Today Proceedings*, 50, 2119–2127.
12. Landi, L., Logozzo, S., Morettini, G., Valigi, M. C. (2022). Withstanding capacity of machine guards: evaluation and validation by 3D scanners. *Applied Sciences*, 12(4), 2098.
13. Li, K., Goldsmith, W. J. (1997). Perforation of steel and polycarbonate plates by tumbling projectiles. *International Journal of Solids and Structures*, 34(35–36), 4581–4596.
14. Moisa, S., Landsberg, G., Rittel, D., Halary, J. L. (2005). Hysteretic thermal behavior of amorphous semi-aromatic polyamides. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*, 46(25), 11870–11875.
15. Moradi, M., Moghadam, M. K., Shamsborhan, M., Beiranvand, Z. M., Rasouli, A., Vahdati, M., Bakhtiari, A., Bodaghi, M. (2021). Simulation, statistical modeling, and optimization of CO₂ laser cutting process of polycarbonate sheets. *Optik*, 225, 164932.
16. Nomai, J., Schlarb, A. K. (2019). Effects of nanoparticle size and concentration on optical, toughness, and thermal properties of polycarbonate. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(23), 47634. <https://doi.org/10.1002/app.47634>
17. Park, S. J., Lee, J. E., Lee, H. B., Park, J., Lee, N.-K., Son, Y., Park, S.-H. (2020). 3D printing of bio-based polycarbonate and its potential applications in ecofriendly indoor manufacturing. *Additive Manufacturing*, 31, 100974. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100974>
18. Prajapati, A., Rohatgi, R., Kumar, S. (2022). Forensic significance of perforation pattern in polycarbonate sheet against 9×19 mm projectile. *Journal of Forensic Sciences*, 67(1), 328–336. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15037>
19. Raj, P., Kumar, R. (2021). A brief review: study on mechanical properties of polycarbonate with different nanofiller materials. (In) T. Rajmokaw, K. Palanikumar, J. P. Davim (Eds.), *Advances in Materials and Manufacturing Engineering* (pp. 285–291). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9362-7_37
20. Ravi-Chandar, K. (1995). On the failure mode transitions in polycarbonate under dynamic mixed-mode loading. *International Journal of Solids and Structures*, 32(6–7), 925–938. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)00128-6](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)00128-6)
21. Rittel, D. (2000). Experimental investigation of transient thermoplastic effects in dynamic fracture. *International Journal of Solids and Structures*, 37(21), 2901–2913. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00257-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00257-9)
22. Rittel, D., Levin, R. (1998). Mode-mixity and dynamic failure mode transitions in polycarbonate. *Mechanics of Materials*, 30(3), 197–216. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(98\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(98)00006-7)
23. Shah, Q. H. (2009). Impact resistance of a rectangular polycarbonate armor plate subjected to single and multiple impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 36(9), 1128–1135. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.02.001>
24. Shah, Q. H., Abakr, Y. A. (2008). Effect of distance from the support on the penetration mechanism of clamped circular polycarbonate armor plates. *International Journal of Impact Engineering*, 35(11), 1244–1250. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.10.008>
25. Wright, S., Fleck, N., Stronge, W. (1993). Ballistic impact of polycarbonate – an experimental investigation. *International Journal of Impact Engineering*, 13(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(93\)90058-F](https://doi.org/10.1016/0734-743X(93)90058-F)
26. Wright, S., Huang, Y., Fleck, N. (1992). Deep penetration of polycarbonate by a cylindrical punch. *Mechanics of Materials*, 13(4), 277–284. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(92\)90041-R](https://doi.org/10.1016/0167-6636(92)90041-R)
27. Zhang, J., Koubaa, A., Xing, D., Liu, W., Wang, H., Wang, X., Wang, Q. (2020). High-performance lignocellulose/polycarbonate biocomposites fabricated by in situ reaction: Structure and properties. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 138, 106068. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106068>
28. Zhou, J., Zhang, X., Zhang, X., Zhang, W., Li, J., Chen, Y., Liu, H., Yan, Y. (2022). Mechanical properties of tensile cracking in indium tin oxide films on polycarbonate substrates. *Coatings*, 12(4), 538. <https://doi.org/10.3390/coatings12040538>

29. Zhu, H., Xie, Y., Yang, B., Zhang, B., Liu, X., Lu, L. (2021). Impact and flexural properties studies on carbon fiber reinforced epoxy/polycarbonate hybrid laminates with different stacking sequence. *Advanced Engineering Materials*, 23(3), 2000934. <https://doi.org/10.1002/adem.202000934>

ORCID

Vinay Aseri  0000-0003-4308-3830

Corresponding author

Vinay Aseri
School of Forensics, Risk Management and National
Security
Rashtriya Raksha University
Gandhinagar, Gujarat
India
e-mail: vinay4n6@gmail.com

ZNACZENIE UKŁADU PERFORACJI NA PŁYTCIE POLIWĘGLANOWEJ PO UDERZENIU POCISKIEM 9 × 19 MM W BADANIACH KRYMINALISTYCZNYCH

Wprowadzenie

Poliwęglan (*polycarbon*, PC) to wysokowydajny (Alaboodi, Sivasankaran, 2018) amorficzny polimer znany z wyjątkowych właściwości viskoelastycznych (Cui, Borgemenke, Liu, Li, 2019) i ciągliwości (Cao, Wang, Wang, 2014), wykazujący również dużą odporność na uderzenia i perforacje (Dorogoy, Rittel, Brill, 2011; Ganguly, Channe, Jha, Mitra, Saha, 2021). Wykorzystuje się go jako materiał konstrukcyjny ze względu na jego stabilność wymiarową (Hasanov, Gupta, Nasirov, Fidan, 2020), wytrzymałość (Jadhav, Patil, Kandasubramanian, 2022), ochronę przed promieniowaniem UV (Jang, 2018), temperaturę zeszklenia (Kausar, 2018), znakomitą udarność, właściwości termoplastyczne (Khan, Joshi, Deshmukh, 2022), korzystne koszty produkcji, lekkość (Landi, Logozzo, Morettini, Valigi, 2022), dobrą ognioodporność, doskonałą odporność na warunki atmosferyczne (Li, Goldsmith, 1997), żaroodporność (Moisa, Landsberg, Rittel, Halary, 2005) oraz przezroczystość (Moradi i in., 2021). Płyta PC jest 250 razy bardziej udatna niż szkło o tej samej grubości (Nomai, Schlarb, 2019). Wśród szerokich zastosowań PC znajdują się części samochodowe, elementy osłon (Park i in., 2020), komponenty elektroniczne (Prajapati, Rohatgi, Kumar, 2022), urządzenia telekomunikacyjne (Raj, Kumar, 2021), kompozyty poliwęglanowe (Ravi-Chandar, 1995), osłony do maszyn (Rittel, Levin, 1998), sklepienia kolebkowe, świetliki, zadaszone chodniki, wiaty przystankowe, tablice informacyjne (Rittel, 2000); PC stosuje się też w gospodarstwach domowych, medycynie (Shah, Abakr, 2008) i lotnictwie (Shah, 2009) oraz do wyrobu soczewek optycznych (Shah, 2009), materiałów biokompatybilnych, lekkich przezroczystych pancerzy ochronnych, osłon kabiny do myśliwców odrzutowych, a także nanorurek i nanoprzewodów (Zhou i in., 2022).

Pociski wystrzelone podczas przestępstw z użyciem broni palnej mogą trafić w różne obiekty pokryte płytami PC, w następstwie czego obiekty takie stają się przedmiotem badań kryminalistycznych (Wright, Fleck, Stronge, 1993). Przeprowadzono szereg badań w celu scharakteryzowania przepływu statycznego i dynamicznego oraz właściwości niszczących struktur PC (Wright, Huang, Fleck, 1992). W roku 1992 zespół badaczy przeprowadził quasi-statyczne próby właściwości penetrujących struktur PC za pomocą okrągłych i cylindrycznych dziurkaczy wykonanych ze stali hartowanej. Próby wykazały, że na czubku narzędzia tworzy się rozproszona

strefa mikropęknięć, zawarta w całości w obrębie strefy plastycznej, przy czym współczynnik załamania światła PC zmienia się zauważalnie przy granicy plastyczności, co pozwala wyznaczyć granicę strefy plastycznej (Zhang i in., 2020).

W roku 1993 ten sam zespół zbadał odporność cienkich płyt PC (o grubości 2, 5 i 12 mm) na uderzenia okrągłymi i cylindrycznymi pociskami. Zaobserwowano pięć różnych typów odkształcania: misczkowanie sprężyste, płatkowanie, głęboka penetracja, pęknięcie stożka i zatykanie. W roku 1997 Li i Goldsmith zbadali skutki uderzenia pocisku pod kątem w cienkiej płycie PC (o grubości poniżej 6,4 mm). Powstały w wyniku uderzenia otwór charakteryzował się znacznie mniejszą średnicą niż sam pocisk (Zhu i in., 2021), co wskazywało, że unieruchomione klamrami cienkie płyty PC mają znaczną odporność balistyczną na uderzenia zarówno jednym, jak i wieloma pociskami. Autorzy sugerują również wzmocnienie płyt przy unieruchamiających je klamrach (Zhou i in., 2022).

W niniejszym badaniu przeprowadzono eksperyment polegający na ostrzeleniu płyt PC o grubości 8 mm, 10 mm, 12 mm oraz 15 mm pełnopłaszczowymi nabojami 9 × 19 mm z odległości 5 m i 10 m. W pracy omówiono powstały wzór perforacji oraz jego znaczenie do badań kryminalistycznych.

Material i metody

1. Pobór próbek

Do badania użyto płyt wykonanych z litego PC marki Ultralite® UV2 o grubości 8 mm, 10 mm, 12 mm oraz 15 mm. Wszystkie płyty miały wymiary 150 mm × 150 mm i zostały pozyskane bezpośrednio od firmy Saraswati Plastotech India Pvt Ltd. W tabeli 1 przedstawiono fizyczne i mechaniczne właściwości płyt. Pełnopłaszczowe (*full metal jacket*, FMJ) naboje użyte do eksperymentu są przedstawione na rycinie 3, a ich parametry fizyczne – w tabeli 2.

Jak pokazuje rycina 4, każdej próbce nadano niepowtarzalny kod identyfikacyjny, np. PC/T8-15/R5 albo PC/T8-15/R10. Pierwsze dwie litery oznaczają materiał, z którego wykonano płyty. Litera „T” to skrót od grubości (*thickness*), a następująca po niej liczba – grubość płyty w milimetrach. Litera „R” (*range*) i następująca po niej liczba oznaczają odległość, z jakiej oddawano strzał w metrach.

W pracy stosuje się następującą terminologię: strona wlotowa (*strike face*, SF), czyli strona płyty, w którą uderza nabój (Ballistic Resistance of Personal Body Armor, 2008); strona wylotowa (*distal face*, DF), czyli strona położona równolegle, ale przeciwnie do wylotowej; strefa pęknięcia – obszar mikropęknięć wokół otworu powstałego w wyniku uderzenia pociskiem; strefa plastyczna – obszar wychodzący poza strefę pęknięcia, w którym nastąpiło odkształcenie powierzchni płyty bez pęknięć. Szczegółowe układy stref i parametry fizyczne próbek przedstawiono w tabeli 3.

Efekty szybkości odkształcania

Szybkość, z jaką na płytę PC jest wywierane naprężenie, ma znaczący wpływ na jej odkształcanie. Przy dużych szybkościach wzrost temperatury spowodowany samym procesem odkształcania zmienia reakcję materiału. Zjawisko to jest znane pod nazwą „ogrzewanie adiabatyczne”. Powoduje ono zmiękczenie materiału i wzrost jego plastyczności, co prowadzi do zwiększonego odkształcania plastycznego.

Dylatacja

Poliwęglan wykazuje dylatację, tj. wzrost sztywności materiału i jego odporność na odkształcanie wraz ze wzrostem szybkości odkształcania. Istnieje jednak szybkość krytyczna, po przekroczeniu której nagle i znacząco zwiększa się podatność materiału na odkształcania plastyczne.

Rozgrzanie miejscowe

Nabój uderzający w płytę PC wytwarza ciepło w wyniku tarcia i odkształcania. Takie miejscowe rozgrzanie może doprowadzić do zmiękczenia materiału i wzrostu jego ciągliwości, co z kolei zwiększa odkształcalność plastyczną. Ciepło wytwarzane przez uderzający nabój może również wywołać przemianę fazową materiału, jeszcze bardziej zmieniając jego właściwości mechaniczne. Z powodu dużej twardości i kruchości płyty PC nie zaobserwowano reakcji materiałowej w postaci fali odbijającej na nagłe zderzenie pocisku z płytą, co przełożyło się na jej silniejsze odkształcanie.

2. Przebieg doświadczenia

Na miejscu przestępstwa odłamki PC znajduje się często, dlatego analiza materiałowa próbek jest bardzo istotna. Analizę taką przeprowadzono, używając spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera i spektroskopii Ramana.

Testy balistyczne polegały na wystrzeliwaniu pojedynczo pełnopłaszczyznowych pocisków 9×19 mm pod

kątem 90 stopni w stosunku do celu z lufy uniwersalnej do badań o długości 250 mm pokrytej prawoskrętnie 6 polami i 6 bruzdami, wyprodukowanej przez firmę Prototypa (Czechy). Próbkę przymocowywano do metalowego rusztowania. Pociski wystrzeliwano z odległości 5 m i 10 m. Łącznie przebadano balistycznie 24 próbki. Do każdej próbki strzelano jednym pełnopłaszczyznowym nabojem 9×19 mm. Prędkość pocisku mierzono w odległości 2,5 m za pomocą inteligentnych prędkościomierzy świetlnych firmy Prototypa. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rycinie 5.

Po ostrzeleniu próbki pobierano do analizy. W trakcie analizy fotografowano uszkodzenia powstałe na próbkach oraz mierzono za pomocą suwmiarki cyfrowej wybrane parametry, takie jak średnica otworu wlotowego, średnica otworu wylotowego, średnica strefy pęknięć czy średnica strefy plastyczności. Materiał zidentyfikowano za pomocą spektroskopu ramanowskiego (Foster & Freeman, model Foram 785-3) i spektrometru FTIR (M/S Thermofisher Scientific, model Nicolet iS 20).

Wyniki i dyskusja

W miejscu uderzenia pocisku 9×19 mm w płytę PC następuje przekazanie energii pomiędzy pociskiem a celem. Energia kinetyczna pocisku powoduje odkształcenie płyty i jej wygięcie w kierunku pocisku. Jeśli energia kinetyczna pocisku przekroczy granicę wytrzymałości na rozciąganie płyty PC, powierzchnia płyty pęka i powstaje w niej otwór. Opór stawiany przez płytę przelatującemu przez nią pociskowi wzrasta wraz ze wzrostem jej grubości. Podobnie wraz ze wzrostem grubości płyty wzrasta energia kinetyczna przekazywana jej przez pocisk. Płyta pochłania energię uderzającego w nią pocisku i przemieszcza się bocznie, co powiększa powstający otwór. W niektórych przypadkach uderzenie powoduje wyrzucenie drobin płyty zgodnie z kierunkiem strzału. Otrzymane próbki zidentyfikowano za pomocą spektroskopii Ramana i spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR). Zaobserwowane widma porównywano ze wzorcami odpowiednio dla spektroskopii Ramana i FTIR w celu wykrycia PC. Wyniki badań spektroskopowych przedstawiają ryciny 6 i 7.

Skutki uderzenia pocisku 9×19 mm w płytę PC

W wyniku uderzenia pocisku 9×19 mm w płycie PC powstaje otwór otoczony mikropęknięciami. Obszar pokryty takimi mikropęknięciami nazywa się „strefą pęknięć”. Z kolei strefa pęknięć zawiera się w strefie plastycznej, czyli obszarze, na którym powierzchnia płyty odkształciła się, ale nie pękła. Na wylotowej stronie płyty zaobserwowano płatowanie. Rycina 8 przedstawia szczegółowy układ perforacji.

Na podstawie średnicy otworu wlotowego, średnicy otworu wylotowego, średnicy strefy pęknięć oraz średnicy strefy plastyczności zbadano układ perforacji na płycie PC. Tabela 4 przedstawia wyniki uderzenia pocisku w płytę PC.

Na rycinach 9 i 10 przedstawiono makrograficznie układy perforacji powstałe po uderzeniu pełnopłaszczyzowym pociskiem 9×19 mm z odległości 5 m i 10 m w płytę PC o grubości 8 mm, 10 mm, 12 mm i 15 mm.

- (a) Średnica otworu wlotowego w płytach PC o różnej grubości przy strzale z różnych odległości

W tabeli 5 i na rycinie 11 przedstawiono średnice otworów wlotowych po uderzeniu pełnopłaszczyzowym nabojem 9×19 mm z odległości 5 m i 10 m w płyty PC o różnych grubościach. Jak wynika z tabeli 5, średnica otworu wlotowego po uderzeniu pociskiem z odległości 5 m wzrasta wraz ze wzrostem grubości płyty od 8 do 15 mm. Przy strzale z odległości 10 m średnica ta początkowo wzrasta przy grubości od 8 do 10 mm, następnie maleje przy grubości 12 mm i ponownie wzrasta przy grubości 15 mm. Innymi słowy, średnica otworu wlotowego wzrasta wraz ze wzrostem grubości płyty.

- (b) Średnica otworu wylotowego w płytach PC o różnych grubościach po strzale z różnych odległości

W tabeli 6 oraz na rycinie 12 przedstawiono średnice otworów wylotowych po uderzeniu pełnopłaszczyzowym nabojem 9×19 mm z odległości 5 m i 10 m w płyty PC o różnych grubościach. Jak wynika z tabeli 6, średnica otworu wlotowego po uderzeniu pociskiem z odległości 5 m wzrasta w przedziale grubości płyty od 8 mm do 10 mm, a następnie utrzymuje się na stałym poziomie w przedziale od 10 mm do 15 mm. Przy strzale z odległości 10 m średnica ta początkowo wzrasta dla grubości od 8 do 10 mm, utrzymuje się na stałym poziomie od 10 do 12 mm i ponownie wzrasta dla grubości 15 mm. Innymi słowy – wraz ze wzrostem grubości płyty średnica otworu wylotowego początkowo wzrasta, a następnie utrzymuje się na stałym poziomie. Nabój wystrzelony z bliższej odległości posiada większą energię kinetyczną. Tym samym przekazuje też przy uderzeniu większą ilość energii płycie PC. Taki zwiększony przekaz energii może spowodować silniejsze odkształcenie płyty, a w rezultacie – powstanie otworu wlotowego o większej średnicy.

Ponieważ nabój 9×19 mm posiada największą energię kinetyczną przy strzale z odległości 5 m, a także ze względu na kąt yaw i inne parametry balistyczne, średnica powstającego otworu wlotowego jest większa niż przy strzale z odległości 10 m. Stąd autorzy niniejszej pracy

rozważają przeprowadzenie dalszych badań uwzględniających te parametry.

Przy strzale z większych odległości nabój wytraca energię kinetyczną z powodu oporu powietrza, co przekłada się na mniejszą ilość energii przekazanej płycie PC. Mniejszy przekaz energii oznacza mniejsze odkształcenie materiału, a mniejsze odkształcenie oznacza powstanie otworu wlotowego o mniejszej średnicy.

Należy jednak wziąć pod uwagę, że na odkształcanie i wynikający z niego otwór wlotowy mogą wpływać również inne czynniki, takie jak prędkość i wymiary naboju oraz właściwości samej płyty PC. Należy zatem przeprowadzić bardziej szczegółową analizę danych eksperymentalnych i właściwości PC w celu lepszego wyjaśnienia zaobserwowanej reakcji na uderzenia pociskiem.

- (c) Średnica strefy spękania powstającej na płytach PC o różnych grubościach po strzale z różnych odległości

W tabeli 7 oraz na rycinie 13 przedstawiono skutki uderzenia pełnopłaszczyzowym nabojem 9×19 mm z odległości 5 m i 10 m w płyty PC o różnych grubościach. Z tabeli 7 wynika, że na dystansie 5 m średnica strefy pęknięcia początkowo zwiększa się wraz ze wzrostem grubości płyty od 8 mm do 10 mm, a następnie zmniejsza się w przedziale od 10 mm do 15 mm. Na podstawie tych wartości widać wyraźnie, że przy strzale z odległości 5 m średnica strefy pęknięć utrzymuje się na prawie stałym poziomie w przedziale grubości od 8 mm do 15 mm. Przy strzale z odległości 10 m średnica ta zwiększa się w przedziale grubości od 8 mm do 15 mm.

- (d) Średnica strefy plastyczności na płytach PC o różnych grubościach po strzale z różnych odległości

W tabeli 8 oraz na rycinie 14 przedstawiono średnice strefy plastyczności po uderzeniu pełnopłaszczyzowym nabojem 9×19 mm z odległości 5 m i 10 m w płyty PC o różnych grubościach. Z tabeli 8 wynika, że w miarę wzrostu grubości płyty wzrasta też średnica strefy plastyczności przy strzale zarówno z 5 m, jak i 10 m.

Wnioski praktyczne z badania

- Pocisk przelatujący przez ostrzeliwaną płytę wytraca energię, na płytę zaś jest wywierane naprężenie. Część energii zostaje zużyta na zgięcie płyty w kierunku ruchu pocisku, a część na odkształcenie czubka pocisku. W niniejszym badaniu zaobserwowano powstawanie strefy spękania i strefy plastyczności oraz zjawisko płatkowania na stronie wylotowej płyt PC.

- Perforacja płyt PC o różnej grubości prowadzi do powstania otworów o różnych średnicach. Naprężenia pochodzące z uderzenia pociskiem powodują przemieszczenie boczne płyty PC w zależności od jej grubości. Naprężenia te wraz z odkształceniami czubka pocisku pozwalają ustalić, czy średnica powstałego otworu będzie mniejsza czy większa od kalibru naboju. Wartości naprężeń w płytach PC o mniejszej grubości są niższe od granicy sprężystości płyty, a odkształcenie czubka naboju jest niewielkie, przez co średnica powstającego otworu będzie mniejsza niż kaliber naboju. W miarę wzrostu grubości płyty wzrasta ilość energii zużyta na jej przemieszczenie boczne wokół otworu, a czubek naboju odkształca się bardziej, stąd średnica otworu będzie zbliżona do kalibru naboju. Natomiast w przypadku płyt o dużej grubości naprężenia wywołujące przemieszczenie boczne wokół powstającego otworu są silne, przez co zwiększa się średnica.
- Wiskoelastyczne właściwości PC powodują, że otwór wydaje się mniejszy niż w rzeczywistości, ponieważ materiał ten powraca do pierwotnej pozycji w miejscu uderzenia, a zatem powstający otwór można mylnie ocenić jako mniejszy.
- Zaobserwowano pewne regularności w wynikach pomiarów prowadzonych przy ustalonych parametrach. W kontekście badań kryminalistycznych tego typu regularności i obserwacje mogą okazać się pomocne w ustalaniu typu broni użytej do popełnienia przestępstwa.
- Badania porównawcze pomiędzy strzałami oddanymi z odległości 5 m i 10 m pokazały, że jeśli kaliber jest znany, można ustalić odległość strzału, mierząc średnicę otworu i nanosząc dane na odpowiedni wykres. Wykorzystane w niniejszym eksperymencie układy, parametry oraz pozostałe czynniki środowiskowe pozwalają ustalić odległość. Zmiana w jednym lub wielu czynnikach czy parametrach prowadzi również do zmiany wyników obserwacji. W badaniach kryminalistycznych pomocna może okazać się analiza otworów powystrzałowych przeprowadzona na podstawie powstałych pęknięć w celu ustalania tychże czynników i parametrów.

Powyższe wnioski pokazują jasno, że badania tego typu warto rozszerzyć o analizę układu perforacji powstałych po strzale z broni o różnym kalibrze na płytach PC o różnych grubościach, wymiarach i kątach oraz o analizę wielokrotnych pęknięć na poszczególnych płytach. Warto również wziąć pod uwagę odkształcenia naboju. Wyniki niniejszego badania są istotne, ponieważ mogą wspomóc środowisko specjalistów zajmujących się tym obszarem kryminalistyki w kontekście interpretacji faktów.

Podsumowanie i przyszłe badania

Poliwęglan wykazuje podobną reakcję na uderzenia balistyczne jak metale, choć mechanizm powstawania perforacji jest w jego przypadku nieco inny. Płyty PC są stosowane coraz powszechniej ze względu na trwałość, wytrzymałość, dużą odporność na uderzenia i uszkodzenia oraz inne właściwości tego materiału. Odłamki płyt PC mogą z dużym prawdopodobieństwem znaleźć się na miejscu przestępstwa z użyciem broni palnej. W niniejszej pracy analizowano wzory perforacji powstałe na skutek uderzeń pełnopłaszczowych naboju 9 × 19 mm w płyty PC o różnej grubości. Naboje w trakcie badań osiągały prędkość 433±2 m/s. Analizowano płyty PC o grubości 8 mm, 10 mm, 12 mm i 15 mm. Uzyskane wyniki i wnioski jasno wskazują, że tego typu badania wzorów pęknięć na płytach PC można rozszerzyć o broń o innym kalibrze oraz zastosować inne odległości i kąty strzału. Istotnymi czynnikami, które należy brać pod uwagę w badaniach, są też odkształcenia naboju oraz ślady prochu pozostawione na płytach PC o różnej grubości.

Podziękowania

Autorzy pracy dziękują Centrum Badań Balistycznych z Poligonem Doświadczalnym przy Państwowym Uniwersytecie Nauk Kryminalistycznych w Gandhinagar (Ballistic Research Centre and Testing Range, BRCTR, National Forensic Sciences University, NFSU) za pomoc i udostępnienie infrastruktury do badań. Autorzy dziękują Pani Shri S. G. Khandelwal, dyrektorce BRCTR, Panu Abhijitsinh Parmarowi, asystentowi naukowemu, oraz Pani Kruti Panarze za ich nieocenioną pomoc przy próbach balistycznych. Specjalne podziękowania należą się firmie Saraswati Plastotech India Pvt Ltd za dostarczenie litych płyt poliwęglanowych, model Ultralite® UV2, do badań balistycznych.