

Marek SZUDROWICZ

LAYERED COMPOSITE INCREASING THE RESISTANCE OF PATROL AND INTERVENTION VEHICLES TO THE IMPACT OF IMPROVISED EXPLOSIVE DEVICES (IED) FROM BELOW

KOMPOZYT WARSTWOWY ZWIĘKSZAJĄCY ODPORNOŚĆ SAMOCHODÓW PATROLOWYCH I INTERWENCYJNYCH NA ATAK IMPROWIZOWANYCH ŁADUNKÓW WYBUCHOWYCH (IED) OD DOŁU*

Model layered composites were made of polyester resin reinforced with layers of glass fibre and aramid fibre fabrics. The fabrics for the study were selected in a manner enabling the comparison of their ballistic resistance depending on the material type and density. Additionally, aluminium plates were used to produce the composites. The study examined the resistance of the model composites to 1.1 g fragment simulating projectile (FSP) penetration, their susceptibility to deformation caused by shock waves produced by pure TNT charges, and their resistance to the effects of detonation of model improvised explosive devices (IED) containing fragments in the form of bearing balls. The analysis and optimisation of the test results enabled the selection of a layer configuration combining the materials studied that has the lowest area density and that protects car bottom structures against perforation in the case of a detonation of a small improvised explosive device.

Keywords: *polymer composites, terminal ballistics, ballistic resistance, 1.1 g FSP, improvised explosive devices.*

Wykonano modelowe kompozyty warstwowe do budowy których wybrane zostały: żywica poliestrowa zbrojona warstwami tkanin z włókien szklanych i aramidowych. Tkaniny do badań dobrano w sposób umożliwiający porównanie odporności balistycznej w zależności od rodzaju materiału i gęstości. Dodatkowo do konstrukcji kompozytów użyto blachy aluminiowej. Zbadano odporność wykonanych modeli kompozytów na przebicie pociskami symulującymi odłamki (FSP) o masie 1,1 g, ich podatność na deformację w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej czystych ładunków trotylu, odporność na detonację modelowych improwizowanych urządzeń wybuchowych IED, zawierające odłamki w postaci kulek łożyskowych. Analiza i optymalizacja wyników badań eksperymentalnych pozwoliła dobrać układ warstwowy, będący kombinacją badanych materiałów, o najmniejszej gęstości powierzchniowej chroniący dno samochodów przed przebiciem w przypadku detonacji małego improwizowanego ładunku wybuchowego.

Słowa kluczowe: *kompozyty polimerowe, balistyka końcowa, odporność balistyczna, odłamek FSP 1,1 g, improwizowane ładunki wybuchowe.*

1. Introduction

Patrol and intervention cars are used in regions threatened by terrorism for purposes such as:

- patrolling areas where there is a risk of fire attacks and explosions of explosive charges;
- intervention activities, in particular combating terrorist groups;
- peace-keeping operations, separating belligerents, and restoring and maintaining public order;
- transporting officers and other persons and cargoes requiring special protection;
- transporting and ensuring the functioning of devices and apparatus used for reconnaissance, identification, and recording.

As for the detonation of small fragmentation explosive charges, i.e.: anti-personnel mines, hand grenades, and improvised charges, two major types of impact that endanger the lives and health of personnel can be distinguished. These are: the impact of fragments and the impact of the shock wave. The most unfavourable situation is an under-vehicle explosion. Due to the small distance from the target (at the moment, the clearance in passenger off-road vehicles is approx.

0.3÷0.5 m), fragments hit the floor material, which is pre-loaded with the shock wave. Very frequently, in such types of cars, the personnel keep their legs directly on the floor and the seats are made of thin textiles.

Requirements for the ballistic protection of cars should be considered in parallel with requirements concerning their mobility [15]. This necessitates the use of light materials for ballistic protection covers. On the other hand, such protections are usually required to perform the function of structural components, e.g. due to the manner of their installation, which is why the materials should be characterised by appropriate strength and rigidity. Modern materials for automotive applications, including ballistic covers for special cars, need to satisfy the requirements of multifunctionality and cost-effectiveness in the areas of production, operation, and disposal [9,10,11,25,29].

The purpose of the study was to develop an additional, self-supporting ballistic cover for car bottoms, mounted on the outside to prevent the perforation of the base floor. In currently-used cars, the floor is usually made of ordinary steel sheets having a thickness of 1÷1.5 mm. New models have floors made of thicker plates (approx. 3 mm). A self-

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

supporting cover should have a weight and thickness enabling its use in non-armoured vehicles such as: Land Rover, Toyota, and Mercedes.

These assumptions were based on an analysis of damage to steel plates (used for the production of car floors — Fig. 1), performed after preliminary tests of resistance to detonation of small IEDs. Information about the existence of such damage and its structure was obtained from officers of Independent Anti-Terrorist Subunits (SPAT). An analysis of the mass distribution of fragments generated during detonation of F1 grenades, POMZ anti-personnel mines (Противопехотная Осколочная Мина Заграждения), and pipe bomb IEDs showed that statistically most fragments have a mass of approx. 1 g and heavier fragments are only generated singularly.

An additional cover installed under the floor will protect it against:

- deformation caused by the shock wave,
- perforation by fragments, as the cover, even if perforated, will reduce the kinetic energy of fragments sufficiently to prevent the perforation of the base floor material.

It was also assumed that raw minerals used for the production of said covers should be available and produced domestically.

Light-weight materials that can be used in ballistic covers of this type include: strong steel, aluminium-based alloys, magnesium- and titanium-based alloys, and metal and polymer matrix composites [6, 7, 13, 17, 18, 23, 26].

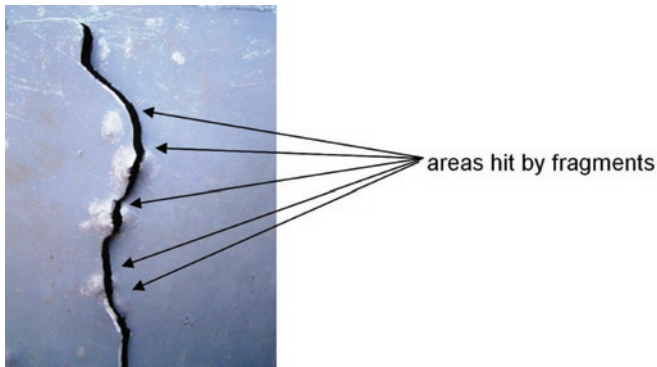


Fig. 1. Failure of a steel plate caused by the simultaneous impact of a shock wave and fragments Source: WITPiS, author's own work.

As fibre-reinforced polymer composites combine light weight with very good mechanical properties, they are used in demanding structural applications. Composites combine the strength and rigidity of the reinforcing fibres with the protective properties of the polymer matrix, which transfers loads among fibres [14, 27].

The materials that are currently used most commonly in composite ballistic covers are mainly glass-, aramid-, and carbon-fibre fabrics combined with a polymer matrix. Individually, these materials are not good structural materials, however, combined together, they offer properties that often surpass the properties of traditional metallic materials [8,33,36,38].

Layered composites have been studied under various load conditions, including shock wave loads. It was shown that for composites and monolithic materials having the same area density, composites are stronger [4, 31, 39, 40, 41].

There are several types of glass fibres. The most popular are E-type fibres. The advantages of this type of glass fibres include: high strength, good chemical and thermal resistance, easy processing, and low prices. Carbon fibres are reinforcements used in advanced structural composites due to their good mechanical properties and light weight. They are available in a number of varieties offering different properties and they are classified mainly according to their elastic modulus (fibres having a low, medium, and high elastic modulus). Ar-

amid fibres are light-weight and very strong. They have a high energy absorption capacity, which is why they are widely used in applications such as impact-resistant products, including ballistic applications. Their additional advantage in applications such as ballistic protections is their good fire resistance — they are a self-extinguishing material. Due to their relatively low shear strength, it is recommended that hybrid fabrics (e.g. with glass fibres) be used in special applications. The recommended matrix for composites are epoxy or polyester resins [19, 21, 37].

Polymer composites are sensitive to loads that are perpendicular to the surface (to which ballistic protections are exposed), as their mechanical properties in this direction are much worse than in the layer plane [12, 28, 30]. Damage to such composites depends on:

- the properties of the reinforcement and matrix materials,
- the proportion, form, and orientation of the reinforcement,
- the adhesive forces between the matrix and the reinforcement,
- the impact energy.

In general, a material's capacity for effective counteracting of ballistic impacts depends on the material hardness, which is critical for the phenomenon of projectile deformation, and the strain at which damage is inflicted, due to the material's capacity for absorbing energy through brittle fracture, in the case of ceramics and composites, and plastic deformation, in the case of some metals [35].

In the case of composites in which fibres are bound by a polymer matrix, the composite damage process can be divided into two phases (Fig. 3). Initially, the projectile, as it penetrates the material, causes damage due to the compression and shear on the upper layers. In the second phase, when the velocity of the penetrating projectile has decreased, the material is damaged due to delamination and due to fibres being pulled out from the matrix as a result of stretching [1, 22, 24, 32].

A composite, being an anisotropic material, undergoes complex states of stress and strain when subjected to impact. Due to the existing diversity of composites, the unlimited freedom in the selection of configurations of components and the complex damage mechanism, depending on the impact energy, it is very difficult to estimate the damage resistance based on existing fragmentary hypotheses [5, 20].

Study [16] examined the effect of type of reinforcement and stacking sequence in a composite on low velocity impact damage tolerance. The impact strength was determined using the compression after impact strength criterion. The criterion can also be referred to as low velocity impact damage tolerance. No major differences concerning the examined strength properties and impact damage tolerance were observed between the tested carbon-glass composites. Thus, the decisive factor in the selection of one of those materials may be the price. Taking into account the properties examined and the price, aramid-glass fabric composites behave in a similar manner to glass and carbon fabric-reinforced composites.

The main reason for using composites is the ability to reduce the weight of structural elements. However, high strength properties entail high production costs. Thus, reducing the production costs is currently one of the most important challenges in the area of polymer composite production.

A major advantage of using a unidirectional fibre arrangement is the ability to produce composites having precisely the required number of appropriately oriented layers. In comparison with woven fabrics, unidirectional layers have better mechanical properties due to the fact that individual fibres are not bound (tied up). Unidirectional fibres for use in composites are available in two forms. The first form are fibres arranged unidirectionally in a layer, pre-impregnated with resin enabling the preservation of the geometry and layout of a plate (prepregs) and the other form are adhesive-bonded (e.g. using elastomers) fabrics. Elements made of arranged prepregs are cured in autoclaves. This technology enables obtaining composites having

very good mechanical properties, especially in the composite plane. An alternative to the use of prepregs in the production of composites is adhesive bonding of individual layers in order to obtain an integrated fibre structure [2, 3, 34].

Table 1. Test materials

Material name	Material designation	Specimen area density [10^3 g/m^2]	
glass composite (flammable resin)	A	A1	10.4
		A2	16.2
		A3	21.0
glass composite (resin with flame-retardant additives)	B	B1	20.0
		B2	26.0
		B3	32.0
aramid composite (elastomer bonding)	C	C1	5.0
		C2	10.0
		C3	15.0
aramid composite (prepregs)	D	D1	4.4
		D2	10.4
		D3	16.3
Aluminium-based alloy	E	E1	8.4
		E2	14.0
		E3	22.4
Steel plate (armoured)	F	F1	19.5
		F2	23.4
		F3	31.2
Steel plate	G	G1	7.8
		G2	15.6
		G3	23.4

Materials characterised by fragment penetration resistance and shock wave-inflicted damage resistance were selected from among products offered by domestic companies. The materials include glass fabric and aramid fabric composites, aluminium alloy plates, and armour steel plates (Table 1).

Rowings used in the production of glass fabrics by domestic companies are covered with a chemically-active substance that makes it possible to use those fabrics directly in the production of composites (without any additional application of the necessary surface finishes), at the same time ensuring good polymer-glass adhesion. The range of products offered comprises balanced and oriented fabrics. Unidirectional glass fabrics having a grammage of 500 g and fibre orientation [0,45] were used to produce the composites. The selection of the resin was made with a view to ensuring the price competitiveness of the product and thus the Polimal polyester resin, with and without flame-retardant additives, was selected for use in the tests. Due to the high viscosity of resins with additives, the polyester-glass composite production technology was manual lamination. Their density was 1.8 g/cm^3 , tensile strength – 210 MPa, and elongation – 10%.

No aramid fabrics are produced domestically. Two companies produce aramid composites based on imported unidirectional fabrics and used in the production of ballistic protections (vest inserts, helmets, composite armours). Each of the companies produces the composites using a different technology, i.e. prepreg pressing and adhesive bonding of individual fabric layers using elastomers. Their density was 1.1 g/cm^3 , tensile strength – 460 MPa, and elongation – 40%.

Plates of various thickness made of an aluminium-based alloy that is produced domestically and has parameters similar to the parameters of foreign alloys that are referred to as ballistic alloys were selected for the tests. The density was 2.8 g/cm^3 , tensile strength – 380 MPa, and elongation – 14%.

The armour steel plate selected for the tests was characterised by a density of 7.8 g/cm^3 , tensile strength of 1550 MPa, and elongation of 8%.

Additionally, low-alloy steel plates of several different thicknesses were prepared for the tests as reference material. The density was 7.8 g/cm^3 , tensile strength – 395 MPa, and elongation – 25%.

2. Test stand testing

The following tests were performed at test stands:

- resistance to penetration by explosive weapons: hand grenades, anti-personnel mines, small IEDs (selected from among actual threats according to SPAT's information),
- resistance to penetration by 1.1 g fragment simulating projectiles (FSP),
- susceptibility to deformation caused by shock waves,
- resistance to penetration by model IEDs.

As for fragment resistance, a recognised test allowing the comparison of different materials, primarily in terms of their area density, is the determination of the V50 ballistic limit using a 1.1 g fragment simulating projectile, referred to as the standard fragment in Polish standards (Fig. 2). The test is described in the Polish standard PN-V-87000: "Light ballistic protections. Bullet- and fragment-proof vests. General requirements and testing." The basic NATO document setting out requirements concerning this test is STANAG 2920: "Ballistic test method for personal armour."

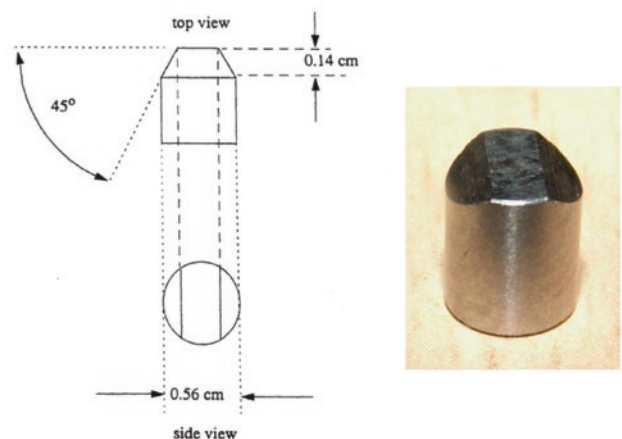


Fig. 2. 1.1 g fragment simulating projectile. Source: STANAG 2920.

The V50 ballistic limit is determined as the average of six perpendicular impact velocities (three lowest velocities with complete penetrations and three highest velocities with partial penetrations). In the determination of ballistic limits, the maximum permissible difference between the lowest and highest FSP impact velocities is 20 m/s. Only in cases where the lowest velocity with a complete penetration

is more than 20 m/s lower than the highest velocity with a partial penetration, the ballistic limit is calculated as the average of 10 velocities (five lowest velocities with complete penetrations and five highest velocities with partial penetrations). In this case, the velocity range is limited to the lowest possible level (as close to 20 m/s as possible).

V50 tests with the use of 1.1 g fragment simulating projectiles will mainly be used to compare the fragment resistance of individual layers comprising the composite, made of different materials.

Fragment resistance tests were performed with the use of 1.1 g FSPs and the characteristics of the prepared materials were established. A diagram of the test stand is shown in Figure 3.

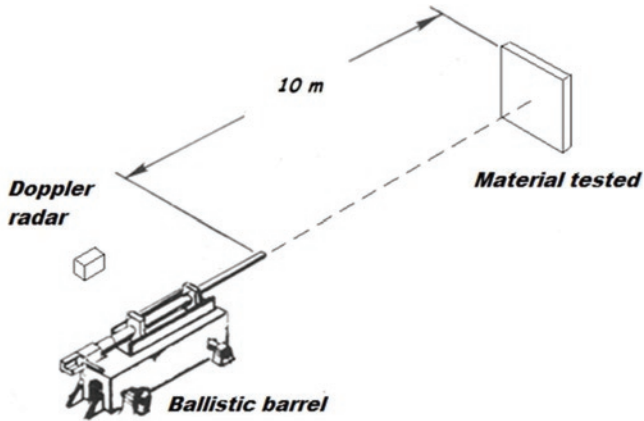


Fig. 3. Test stand diagram

Another test performed for the purpose of selecting materials was a self-developed test of material resistance to deformation during the explosion of a pure 75 g TNT charge placed 250 mm under the material tested, with the specimen measuring 500x500 mm.

The extent of material deformation was measured using witness plates: 0.5 mm aluminium alloy plates placed directly behind the material tested.

The next test involved the use of model IED charges and enabled evaluating particular materials under reproducible conditions combining the impact of the shock wave and fragments.

A separate issue addressed in relation to that method was the development of a model charge. The need to develop such a charge stemmed from the fact that assessment of a material's fragment resistance only on the basis of tests with the use of FSPs does not reflect the actual conditions of fragments hitting the material multiple times with the simultaneous action of the shock wave. Moreover, there is a great number and diversity of currently produced grenades and anti-personnel mines. The objective was to obtain a model charge enabling testing materials' resistance to penetration under the same repeatable conditions.

The charge proposed in the NATO Standardization Agreement STANAG 4569 "Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armored Vehicles" (Fig. 4), in which the casing is made of an aluminium-based alloy and the fragments are minimum 750 steel bearing balls having a diameter of 4.762 mm and a mass of 0.4 g, was

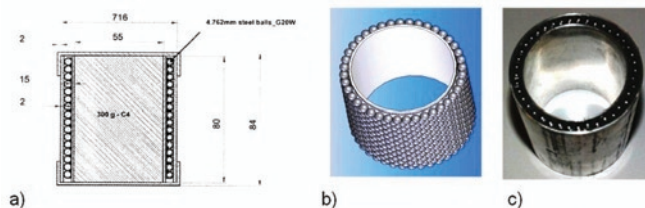


Fig. 4. a) diagram of an improvised explosive device presented in STANAG 4569; b) diagram of the ball arrangement in an IED model; c) IED model.

used as the model improvised explosive device. The content of the C4 explosive material was 300 g. STANAG 4569 states that fragments generated from a model charge should have a velocity of approx. 1200 m/s (Fig. 4).

3. Results and discussion

When a fragmentation charge explodes within a short distance, the material is subjected to the combined action of a shock wave and fragments.

In order to develop a layered composite that is resistant to such action, preliminary tests were performed in separate experiments: fragment resistance tests with the use of 1.1 g FSPs and pure 75 g TNT charge explosion resistance tests. The tests were followed by verification tests with the use of a model IED charge complying with STANAG 4569 Annex B Level 1.

In the preliminary fragment resistance tests with the use of 1.1 g FSPs, the V50 ballistic limit was determined for three different area densities of the prepared materials. The relation between the ballistic limit and the area density was plotted for each of those materials (Fig. 5).

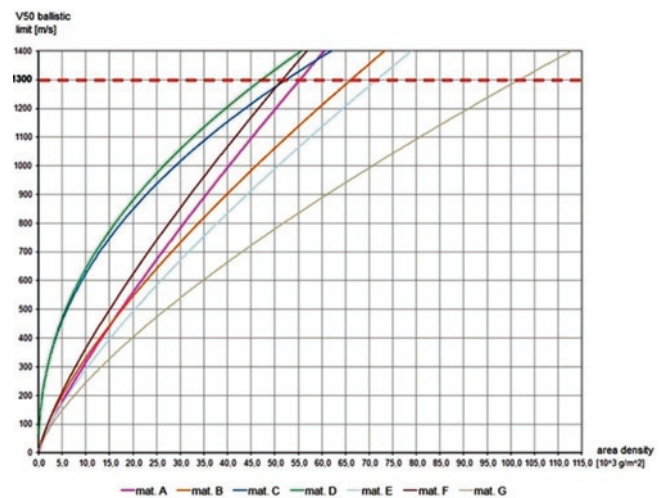


Fig. 5. Results of the fragment resistance tests with the use of 1.1 g FSPs, relation between the ballistic limits of the materials tested and their area densities, with the trend lines drawn. Source: WITPiS, author's own work

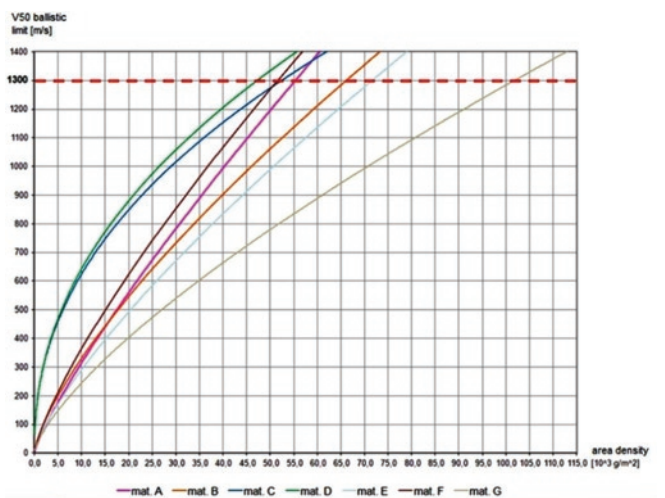


Fig. 6. Relation between the ballistic limits of the materials tested and their area densities. Source: WITPiS, author's own work.

Based on the graphs, area density values corresponding to the ballistic limits at 1300 m/s were evaluated (Fig. 6). This velocity is the maximum velocity of IED model fragments recorded during military field tests and was adopted as the criterion for comparative tests of the materials' fragment resistance.

The results obtained indicate that for the glass composite, the V50 ballistic limit for 1.1 g FSPs is 1300 m/s when the area density is $55 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$. As for the other materials, the following values were obtained: aramid composite — $47 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$, aluminium-based alloy — $72 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$, armour steel plate — $52 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$, and steel plate — $102 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$.

The fragment resistance results obtained were analysed for the purpose of optimising two-layer and three-layer material configurations. Two conditions were imposed with regard to the optimisation: the sum of the area densities of individual layers should be minimum and at the same time, the sum of the ballistic limit values of those layers should not be smaller than 1300 m/s. Tables 2 and 3 show examples of the optimisation for selected layer configurations. The minimum area density values of particular layer configurations for which the ballistic limit is 1300 m/s are marked in yellow.

The optimisation performed showed that the lightest layer configuration that meets the conditions is the three-layer configuration. The area density of the configuration is $31.5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$. The information presented in the tables can also be used to determine the thickness of the configuration, as the area densities of the individual layers in the configuration are known, and to evaluate the costs of the materials.

The fragment resistance tests with the use of 1.1 g FSPs made it possible to select the individual layers making up the composite. However, they did not indicate the layer stacking sequence in the composite. For this purpose, the pure 75 g TNT charge explosion resistance tests were performed.

As the area density of materials increases, their deformation caused by a TNT explosion decreases. The witness plate, made of an aluminium-based alloy, placed behind the material tested, becomes deformed together with the material. After each test, the extent of witness plate deformation was measured in two perpendicular directions. Figure 7 shows examples of witness plate deformation after tests on 1 mm, 2 mm, and 3 mm thick steel plates.

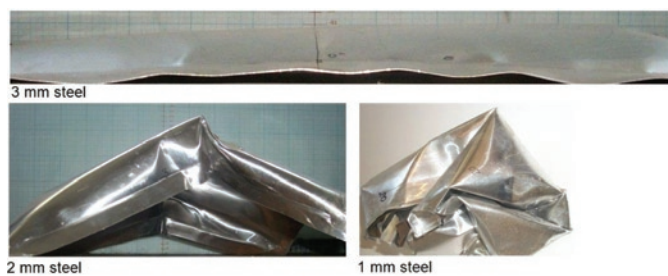


Fig. 7. Witness plate deformation after tests on steel plates of various thickness.

Source: WITPiS, author's own work.

Figure 8 presents the characteristics of the materials tested with the use of pure 75 g TNT charges. The tests conducted enabled arranging the materials based on their resistance to deformation caused by a pure TNT charge explosion. The material that was deformed to the smallest degree was the glass composite.

The results of the preliminary tests made it possible to determine the sequence in which the materials were to be stacked in the layered composite. It was decided that due to its highest resistance to deformation caused by TNT explosions and its high fragment resistance, expressed by the value of the V50 ballistic limit, the first material would be the glass composite. The last material would be the aramid

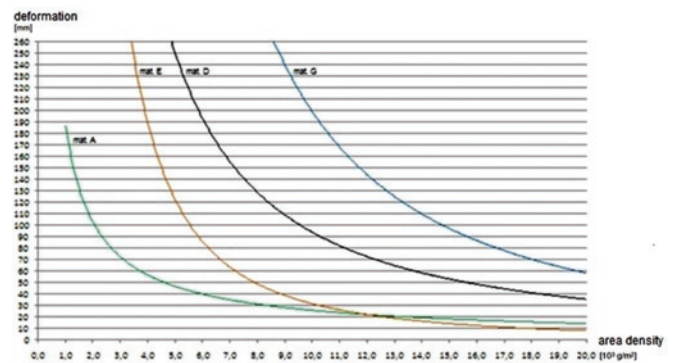


Fig. 8. Relation between the deformation of selected materials and their area densities.

Source: WITPiS, author's own work.

composite. It is characterised by a lower deformation resistance than the glass composite, however, it has the best fragment resistance.

IED models were used in the verification tests. The tests were military field tests. The IED models were placed on a concrete slab, 300 mm below the specimen tested.

The reference material for the test was a 480 HB steel plate, i.e. the so-called "armoured" steel plate. In the case of 4 mm thick plates ($32 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$), up to 5 penetrations were obtained. Under these test conditions, effective protection was provided by the 6 mm thick plate ($48 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$).

The resistance of selected two- and three-layer models was tested. 1 mm thick auto-body sheet metal that simulated the car floor was placed behind the material tested as a witness panel. Figure 9 shows the influence of the IED model on the developed three-layer composite ($31.5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$). The composite was not perforated.

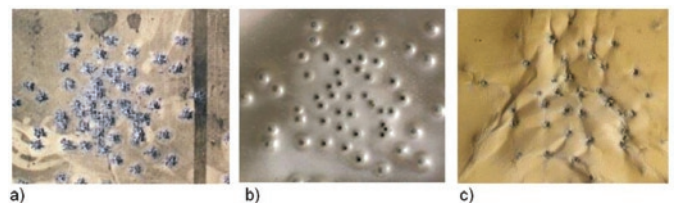


Fig. 9. Front sides of particular materials from the three-layer configuration: a) glass composite, b) aluminium plate, c) aramid composite.

Source: WITPiS, author's own work.

Summary

A material configuration for an additional bottom cover for non-armoured and light-armoured patrol and intervention cars was developed. The cover is a layered composite (the first layer being a 6 mm thick glass composite, due to the lowest degree of deformation during the tests with the use of TNT charges, and the second and third layers being a 2.5 mm thick aluminium plate and a 12.5 mm thick aramid composite) mounted on the bottom of the car, protecting occupants of the car against injury or death and the car floor structure against damage caused by detonation of small fragmentation charges.

Bearing in mind the type of application, it is recommended that the cover be produced by screwing together the particular layers. The rationale behind this recommendation is that:

- it is possible that in the case of detonation of lower-impact charges or as a result of mechanical damage related to moving over a difficult terrain, only the first layer of the cover, i.e. the glass composite, will be damaged. If this is the case, the other layers, in particular the expensive aramid composite, can continue to be used in the cover structure after the glass composite is replaced. This approach necessitates developing non-invasive methods of inspecting composite integrity,

- screwing particular layers together enables arranging the cover layers in any sequence depending on the anticipated dangers (and their anticipated impact),
- particular layers of the cover can be worked mechanically more easily than a three-layer configuration. There is no need to order ready custom-made cover templates. The user can cut out any shapes from large sheets of particular materials, according to the current needs, e.g. in field conditions.

The three-layer cover provides protection against perforation by fragments of F1 grenades, POMZ anti-personnel mines, and small IEDs at STANAG 4569 Level 1. The area density of the protection cover is $31.5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$.

The technology has been partially introduced (production of the glass composite). Additional protection covers for the bottoms of patrol and intervention cars used by the Armed Forces of the Republic of Poland were produced.

References

1. Abrate S. Impact on composite structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, ISBN 0-521-01832-3.
2. Abrate S. Impact on Laminated Composite Materials. Applied Mechanics Reviews 1991; 44(4): 155-190, <https://doi.org/10.1115/1.3119500>.
3. Amparo G, Graciani E, Paris F. Prediction of in-plane stiffness properties of Non-Crimp Fabric laminates by means of 3D Finite Element analysis. Composites Science and Technology 2008; 68(1): 121-131.
4. Andrews E W, Moussa N A. Failure mode maps for composite sandwich panels subjected to air blast loading. International Journal of Impact Engineering 2009; 36(3): 418-425, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.08.005>.
5. Bogusz P, Ochelski S, Panowicz R, Niezgodna T, Barnat W. Influence of loading rate on energy absorption performance of epoxy composites reinforced with glass fabric. Composites Theory and Practice 2012; 12(2): 110-114.
6. Borvik T, Dey S, Clausen A H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectile. International Journal of Impact Engineering 2009; 36(7): 948-964.
7. Borvik T, Langseth M, Hopperstad O S, Malo K A. Ballistic penetration of steel plates. International Journal of Impact Engineering 1999; 22(9): 855-886.
8. Committee on High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites, National Research Council. Report: High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites. Washington: The National Academies Press, 2005, ISBN: 0-309-54943-4.
9. Committee on Materials Research for Defense After Next, National Research Council. Report: Materials Research to Meet 21st Century Defense Needs. Washington: The National Academies Press, 2003, ISBN: 0-309-50572-0.
10. Committee on Lightweight Materials for 21st Century Army Trucks, National Research Council. Report: Use of Lightweight Materials in 21st Century Army Trucks. Washington: The National Academies Press, 2003, ISBN:0-309-50646-8.
11. Ernest S C. Army focused research team on functionally graded armor composites. Materials Science and Engineering 1999; A259: 155-161.
12. Fahmy A A. Report AD-A281587: Deformation, strength, and failure modes of laminated conventional and hybrid polymer-matrix composites loaded in the thickness direction. Defense Technical Information Center, 1994.
13. Galanis K. Hull construction with composite materials for ships over 100 m in length. Massachusetts Institute of Technology, 2002.
14. Gürdal Z, Haftka R T, Hajela P. Design and Optimization of Laminated Composite Materials. John Wiley & Sons, 1999, ISBN: 978-0-471-25276-4.
15. Hogg P J. Composites for Ballistic Applications. Proceedings of Composite Processing, 2003.
16. Imielińska K, Wojtyra R. Wpływ rodzaju zbrojenia i kolejności ułożenia warstw na tolerancję zniszczeń wywołanych udarami o małej prędkości laminatów epoksydowych zbrojonych włóknem węglowym, szklanym, kevlarowym i hybrydowych. Kompozyty - Composites 2002; 5: 364-368.
17. Jena P K, Mishra B, Ramesh Babu M, Singh A K, Sivakumar K, Bhat T B. Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. International Journal of Impact Engineering 2010; 37(3): 242-249, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.09.003>.
18. Jensen R E, McNight S H, Quesenberry M J. Report ARL-TR-2655: Strength and Durability of Glass Fiber Composites Treated With Multicomponent Sizing Formulations. Army Research Laboratory, 2002.
19. Kang T J, Kim C. Impact energy absorption mechanism of largely deformable composites with different reinforcing structures. Fibers and Polymers 2000; 1(1): 45-54.
20. Kant S, Verma S L. A Review on Analysis and Design of Bullet Resistant Jacket - Ballistic Analysis. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology 2017; 4(3): 71-80.
21. Kevlar Technical Guide. DuPont.
22. Kirkwood J E, Kirkwood K M, Lee Y S, Egres R G, Wagner N J, Wetzel E D. Report ARL-CR-538: Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in KevlarR KM-2 fabric: part II: predicting ballistic performance. Army Research Laboratory, 2004.
23. Lane R, Craig B, Babcock W. Materials for blast and penetration resistance. The Amptiac Quarterly 2002; 6(4): 39-45.
24. Liu D. Characterization of impact properties and damage process of glass/epoxy composite laminates. Journal of Composite Materials 2004; 38(16): 1425-1442, <https://doi.org/10.1177/0021998304042741>.
25. Madhu V, Balakrishna Bhat T. Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles. Defence Science Journal 2011; 61(4): 394-402.
26. Mamalis A G, Spentzas K N, Manolakos D E, Ioannidis M B. Composite and hybrid materials for next generation road and rail vehicles. Proceeding Synenergy Forum Conference, National Technical University of Athens 2008: 9-16.
27. Marston C, Gabbittas B, Adams J. The effect of fibre sizing on fibres and bundle strength in hybrid glass carbon fibre composites. Journal of Materials Science 1997; 32(6): 1415-1423, <https://doi.org/10.1023/A:1018537530192>.
28. McMahon P E, Ying L. Report 3607: Effects of fibre/matrix interactions on the properties of graphite/epoxy composites. NASA 1982.
29. MIL-HDBK-1002/6. Aluminum structures, composites structures, structural plastics, and fiber-reinforced composites. Department of Defence USA
30. MIL-HDBK-17. Composite Materials Handbook. Department of Defense USA.

31. Nurick G N, Langdon G S, Chi Y, Jacob N. Behavior of sandwich panels subjected to intense air blast - part 1: experiments. *Composite Structures* 2009; 91(4): 433-441.
32. Patel B P, Bholra S K, Ganapathi M, Makhecha D P. Penetration of Projectiles in Composite Laminates. Institute of Armament Technology. *Defence Science Journal* 2004; 54(2): 151-159, <https://doi.org/10.14429/dsj.54.2027>.
33. Pike R A, Novak R C. Report CR-134763: Design, fabrication and test of multi-fiber laminates. NASA 1975.
34. Randjbaran E, Zahari R, Majid D, Jalil N, Vaghei R and Ahmadi R. The Effects of Stacking Sequence Layers of Hybrid Composite Materials in Energy Absorption under the High Velocity Ballistic Impact Conditions: An Experimental Investigation. *Journal of Material Sciences & Engineering* 2013, 2(4): 1-8.
35. Razali N, Sultan M T H, Mustapha F, Yidris N, Ishak M R. Impact Damage on Composite Structures - A Review. *International Journal of Engineering and Science (IJES)* 2014; 3(7): 8-20.
36. Report ETL 1110-2-548: Composite materials for civil engineering structures, U.S. Army Corps of Engineers, 1997.
37. Schuster D. Ballistic impact on composites. *Transactions on Engineering Sciences* 1994; 4: 175-181.
38. Surowska B. Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2008; 3: 30-40.
39. Tekalur S A, Bogdanovich A E, Shukla A. Shock loading response of sandwich panels with 3-D woven E-glass composite skins and stitched foam core. *Composites Science and Technology* 2009; 69(6): 736-753, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.03.017>.
40. Wang E, Gardner N, Shukla A. The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores. *International Journal of Solids and Structures* 2009; 46(18-19): 3492-3502.
41. Zhu F, Lu G. A review of blast and impact of metallic and sandwich structures. *Electronic Journal of Structural Engineering* 2007; Special Issue: Loading on Structures: 92-101.

Marek SZUDROWICZ

Military Institute of Armored and Automotive Technology
(WITPiS)

Okuniewska 1, 05-070 Sulejów, Poland

E-mail: marek.szudrowicz@witpis.eu

Dr inż. Marek Szudrowicz

Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej
Okuniewska 1, 05-070 Sulejówek, Polska
E-mail: marek.szudrowicz@witpis.eu

Kompozyt warstwowy zwiększający odporność samochodów patrolowych i interwencyjnych na atak improwizowanych ładunków wybuchowych (IED) od dołu

Słowa kluczowe: *kompozyty polimerowe, balistyka końcowa, odporność balistyczna, odłamek FSP 1,1 g, improwizowane ładunki wybuchowe*

Streszczenie:

Wykonano modelowe kompozyty warstwowe do budowy których wybrane zostały: żywica poliestrowa zbrojona warstwami tkanin z włókien szklanych i aramidowych. Tkaniny do badań dobrano w sposób umożliwiający porównanie odporności balistycznej w zależności od rodzaju materiału i gęstości. Dodatkowo do konstrukcji kompozytów użyto blachy aluminiowej.

Zbadano odporność wykonanych modeli kompozytów na przebicie pociskami symulującymi odłamek (FSP) o masie 1,1 g, ich podatność na deformację w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej czystych ładunków trotylu, odporność na detonację modelowych improwizowanych urządzeń wybuchowych IED, zawierające odłamki w postaci kulek łożyskowych.

Analiza i optymalizacja wyników badań eksperymentalnych pozwoliła dobrać układ warstwowy, będący kombinacją badanych materiałów, o najmniejszej gęstości powierzchniowej chroniący dno samochodów przed przebiciem w przypadku detonacji małego improwizowanego ładunku wybuchowego.

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie samochodów patrolowych i interwencyjnych w rejonie zagrożeń terrorystycznych obejmuje, m.in. takie działania jak:

- patrolowanie rejonów, w których istnieje zagrożenie ostrzałem oraz narażenie na oddziaływanie ładunków wybuchowych;
- działania interwencyjne, szczególnie w przypadkach zwalczania grup terrorystycznych;
- działania w misjach utrzymania pokoju, rozdzielenia walczących stron, a także w służbie przywracania i utrzymania porządku publicznego;
- transportowanie funkcjonariuszy i innych osób oraz ładunków wymagających szczególnej ochrony;
- przewożenie oraz zapewnienie funkcjonowania aparatury i urządzeń, przeznaczonej do wykonywania czynności zwiadowczych, rozpoznania i rejestracji.

W przypadku narażenia na detonację małych fragmentujących ładunków wybuchowych tj.: min przeciwpiechotnych, granatów ręcznych i ładunków improwizowanych, można wyodrębnić dwa główne rodzaje oddziaływań, których wystąpienie zagraża życiu i zdrowiu załogi. Należą do nich: uderzenie odłamków i oddziaływanie fali uderzeniowej. Wybuch pod samochodem jest przypadkiem najbardziej niekorzystnym. Mała odległość wybuchu (obecnie prześwity

w samochodach osobowo - terenowych wynoszą ok. 0,3÷0,5 m) powoduje, że odłamki uderzają w materiał podłogi obciążony wstępnie falą uderzeniową. Bardzo często nogi załogi, w tego typu samochodach umieszczone są bezpośrednio na podłodze, a fotele, na których siedzą, wykonane są z cienkich materiałów tekstylnych.

Wymagania, co do ochrony balistycznej samochodów powinny być rozważane równolegle z wymaganiami utrzymania ich mobilności [15]. Wskazuje to na potrzebę stosowania na osłony balistyczne, lekkich rozwiązań materiałowych. Z drugiej strony osłonom takim stawia się wymagania elementu konstrukcyjnego, chociażby ze względu na sposób ich montażu, co powoduje, że materiały powinny charakteryzować się określoną sztywnością i wytrzymałością. Wymagania wielofunkcyjności oraz niskich kosztów: produkcji, eksploatacji i utylizacji, stawiane są nowoczesnym materiałom przeznaczonym do zastosowań w technice samochodowej, w tym na osłony balistyczne samochodów specjalnych [9,10,11,25,29].

Założono opracowanie dodatkowej, samonośnej osłony balistycznej podłogi samochodów, mocowanej od zewnątrz, w celu nie dopuszczenia do przebicia podłogi bazowej. W obecnie eksploatowanych samochodach podłogi wykonane są głównie ze zwykłych blach stalowych, grubości 1÷1,5 mm. Nowe konstrukcje posiadają podłogę wykonaną z blach grubszych (ok. 3 mm). Ciężar osłony oraz jej grubość powinny, w przypadku osłony samonośnej, umożliwiać jej zastosowanie w nieopancerzonych samochodach typu: Land Rover, Toyota, Mercedes.

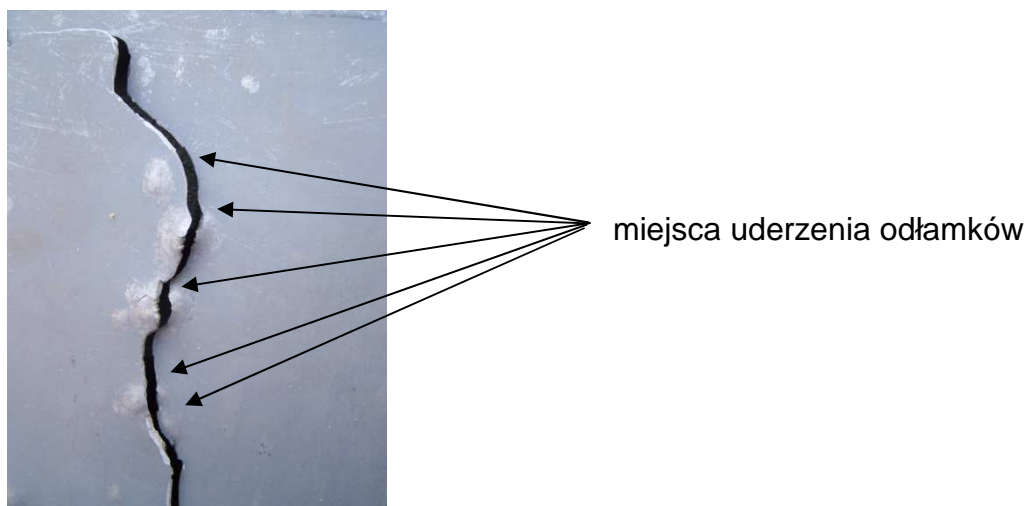
Założenia powyższe były wynikiem analizy uszkodzeń blach stalowych (używanych do produkcji podłóg samochodów – rys.1) przeprowadzonej po wstępnych testach odporności na detonację małych IED. Informacje o ich budowie i fakcie występowania uzyskano od funkcjonariuszy Samodzielnych Pododdziałów Antyterrorystycznych (SPAT). Analiza rozkładu masowego odłamków generowanych podczas detonacji granatów typu F1, min przeciwpiechotnych POMZ (Противопехотная Осколочная Мина Заграждения), IED typu bomby rurowej, wykazały, że statystycznie większość odłamków posiada masę około 1 g, odłamki o większej masie generowane są pojedynczo.

Dodatkowa osłona mocowana pod podłogą, zabezpieczy ją przed:

- deformacją w wyniku działania fali uderzeniowej,
- przebiciem odłamkami, poprzez wykonanie osłony, która nawet w przypadku jej przebicia, obniży energię kinetyczną odłamków na tyle, że nie dojdzie do perforacji materiału podłogi bazowej.

Założono również, że surowce stosowane do produkcji osłon powinny być dostępne i produkowane na terenie kraju.

Wśród lekkich materiałów do zastosowań w tego rodzaju osłonach balistycznych wymieniane są: wysokowytrzymała stal, stopy aluminium, stopy magnezu i tytanu, kompozyty z osnową metalową i polimerową [6,7,13,17,18,23,26].



Rys. 1. Pęknięcie blachy stalowej w wyniku jednoczesnego oddziaływania fali uderzeniowej i odłamków na materiał. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Kombinacja małej masy z bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi spowodowała, że kompozyty polimerowe zbrojone włóknami znalazły zastosowanie w wymagających aplikacjach konstrukcyjnych. Kompozyty łączą wytrzymałość i sztywność włókien zbrojenia z ochronnymi własnościami osnowy polimerowej, przenoszącej obciążenia pomiędzy włóknami [14,27].

Stosowane obecnie najszerzej materiały w kompozytowych osłonach balistycznych to głównie tkaniny z włókien szklanych, aramidowych i węglowych w połączeniu z osnową polimerową. Choć materiały te osobno nie stanowią dobrego materiału konstrukcyjnego, to w połączeniu z sobą ich własności przekraczają niejednokrotnie właściwości tradycyjnych materiałów metalowych [8,33,36,38].

Kompozyty warstwowe były badane w różnych warunkach obciążenia, w tym obciążenia falą uderzeniową. Zostało wykazane że dla kompozytów i materiałów monolitycznych o takiej samej gęstości powierzchniowej, odporność kompozytów jest wyższa [4,31,39,40,41].

Istnieje kilka typów włókien szklanych. Najbardziej popularnym są włókna typu E. Korzyściami wynikającymi z użycia tych włókien szklanych są ich wysoka wytrzymałość, dobra odporność chemiczna i termiczna, łatwość przetwórstwa i niska cena. Włókna węglowe są zbrojeniami stosowanymi w zaawansowanych kompozytach konstrukcyjnych ze względu na ich wysokie własności mechaniczne i niską masę. Są dostępne w kilku odmianach, pod względem własności, a klasyfikowane są głównie ze względu na moduł sprężystości (włókna o niskim module, średnim i wysokim). Włókna aramidowe charakteryzują się małą masą i bardzo wysoką wytrzymałością. Posiadają wysoką zdolność pochłaniania energii, co wyjaśnia ich szerokie wykorzystanie w aplikacjach takich jak wyroby odporne na uderzenia, w tym balistyczne. Dodatkową zaletą w aplikacjach jakimi są osłony balistyczne jest ich wysoka odporność na działanie ognia, należą do grupy materiałów samogasnących. Ze względu na ich stosunkowo niską wytrzymałość na ścinanie, do zastosowań specjalnych zaleca się stosować tkaniny hybrydowe (np. z włóknem szklanym). Zalecaną osnową dla kompozytów są żywice epoksydowe lub poliestrowe [19,21,37].

Kompozyty polimerowe są wrażliwe na obciążenia prostopadłe do powierzchni (a na takie narażone są osłony balistyczne), ponieważ ich własności mechaniczne w tym kierunku są znacznie mniejsze niż w płaszczyźnie warstwy [12,28,30].

Niszczenie tych kompozytów, zależy od:

- własności materiału wzmocnienia i osnowy,
- udziału, postaci i orientacji wzmocnienia,
- sił adhezji osnowy do wzmocnienia,
- energii udaru.

Ogólnie zdolność materiału do skutecznego przeciwdziałania uderzeniom balistycznym zależy od twardości materiałów, która jest krytyczna dla zjawiska deformacji pocisków, i odkształcenia, przy którym następuje zniszczenie materiału, ze względu na zdolność materiału do pochłaniania energii poprzez kruche pękanie, w przypadku ceramiki i kompozytów, oraz plastycznej deformacji, w przypadku niektórych metali [35].

Dla kompozytów, gdzie włókna zespolone są osnową polimerową, proces niszczenia kompozytu można podzielić na dwie fazy (rys. 3). Początkowo pocisk penetrując materiał powoduje jego niszczenie w wyniku ściskania i ścinania górnych warstw. W drugiej fazie, gdy prędkość penetrującego pocisku zmaleje, niszczenie materiału jest skutkiem procesu delaminacji i wyciągania włókien z osnowy w wyniku rozciągania [1,22,24,32].

Kompozyt, jako materiał anizotropowy przy oddziaływaniu udarowym, podlega złożonym stanom naprężeń i odkształceń. Ze względu na różnorodność kompozytów, ich nieograniczoną swobodę w doborze konfiguracji składników i złożony mechanizm niszczenia, zależnego od energii udaru, szacowanie, na podstawie istniejących hipotez cząstkowych, odporności na niszczenie, jest bardzo trudne [5,20].

W pracy [16] badano wpływ rodzaju zbrojenia i kolejności ułożenia warstw w kompozycie na tolerancję zniszczeń wywołanych udarami o małej prędkości. Określono odporność udarową za pomocą kryterium poudarowej wytrzymałości na ściskanie. Kryterium to można też określić mianem tolerancji zniszczeń spowodowanych przez udary o małej prędkości. Nie zaobserwowano dużych różnic w zakresie badanych własności wytrzymałościowych i tolerancji zniszczeń udarowych pomiędzy badanymi kompozytami węglowo-szklanymi, zatem przy wyborze jednego z tych materiałów decydujące znaczenie może mieć jego cena. Biorąc pod uwagę badane własności i cenę, kompozyty na bazie tkaniny aramid-szkło wykazują podobne zachowanie jak kompozyty zbrojone tkaniną szklaną i węglową.

Głównym powodem wykorzystywania kompozytów jest możliwość obniżenia ciężaru elementów konstrukcyjnych. Jednak wysokie własności wytrzymałościowe wiążą się z wysokimi kosztami produkcji. Dlatego obniżenie kosztów produkcji jest w chwili obecnej jednym z najważniejszych wyzwań w obszarze produkcji kompozytów polimerowych.

Dużą korzyścią stosowania jednokierunkowego układu włókien jest możliwość konstruowania kompozytów o dokładnie wymaganej ilości odpowiednio zorientowanych warstw. W porównaniu do tkanin tkanych, warstwy jednokierunkowe wykazują lepsze własności mechaniczne ze względu na brak wiązania (krępowania) poszczególnych włókien. Włókna jednokierunkowe do wykorzystania w kompozytach występują w dwóch postaciach. W postaci włókien ułożonych jednokierunkowo w warstwie, wstępnie impregnowanych żywicą powodującą zachowanie geometrii i układu arkusza (prepregi) oraz tkanin sklejanymi (np. elastomerami). Elementy z ułożonych prepregów są utwardzane w autoklawach. W wyniku zastosowania tej technologii otrzymuje się kompozyty o bardzo dobrych własnościach mechanicznych, przede wszystkim w płaszczyźnie kompozytu. Alternatywą do stosowania prepregów w produkcji kompozytów jest wykorzystanie do uzyskania zintegrowanej struktury

włókien techniki klejenia poszczególnych warstw [2,3,34].

Na podstawie oferty firm krajowych wybrano rodzaje materiałów charakteryzujące się odpornością na przebicie odłamkami i odpornością na zniszczenie w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej. Do materiałów tych należą kompozyty na bazie tkanin szklanych i tkanin aramidowych, blachy ze stopów aluminium, blachy ze stali pancernej (tabela 1).

Tabela 1. Materiały do badań.

Nazwa materiału	Oznaczenie materiału	gęstość powierzchniowa próbek [10^3 g/m ²]	
kompozyt szklany (żywica palna)	A	A1	10,4
		A2	16,2
		A3	21,0
kompozyt szklany (żywica z dodatkami uniepalniającymi)	B	B1	20,0
		B2	26,0
		B3	32,0
kompozyt aramidowy (klejenie elastomerami)	C	C1	5,0
		C2	10,0
		C3	15,0
kompozyt aramidowy (prepregi)	D	D1	4,4
		D2	10,4
		D3	16,3
Stop aluminium	E	E1	8,4
		E2	14,0
		E3	22,4
Blacha stalowa (pancerna)	F	F1	19,5
		F2	23,4
		F3	31,2
Blacha stalowa	G	G1	7,8
		G2	15,6
		G3	23,4

Używane w kraju w produkcji tkanin szklanych rowingi pokryte są czynną chemicznie preparacją, co umożliwia bezpośrednie stosowanie tkanin w produkcji kompozytów (bez dodatkowych operacji nanoszenia potrzebnych wykończeń powierzchniowych) przy zapewnieniu dobrej adhezji polimer-szkło. Produkowany asortyment tkanin obejmuje tkaniny zrównoważone i ukierunkowane. Do wytworzenia kompozytów użyto tkanin szklanych, jednokierunkowych, o gramaturze 500 g w sekwencji ułożenia [0,45]. Przy wyborze żywicy kierowano się osiągnięciem konkurencyjności cenowej wyrobu, dlatego do badań wybrano żywicę poliestrową Polimal i tą samą żywicę z dodatkami uniepalniającymi. Ze względu na dużą lepkość żywic z dodatkami, technologią wykonania kompozytów poliestrowo-szklanych było laminowanie ręczne. Ich gęstość wynosiła 1,8 g/cm³, wytrzymałość na rozciąganie 210 MPa, wydłużenie 10 %.

W kraju nie są produkowane tkaniny aramidowe. Na bazie jednokierunkowych tkanin importowanych, dwie firmy wykonują kompozyty aramidowe, wykorzystywane do produkcji osłon balistycznych (wkłady do kamizelek, hełmy, pancerze

kompozytowe). Każda z firm produkuje kompozyty inną technologią tj. prasowania prepregów i klejenia poszczególnych warstw tkanin elastomerami. Ich gęstość wynosiła $1,1 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałość na rozciąganie 460 MPa , wydłużenie 40% .

Do badań wybrano różne grubości blach ze stopu aluminium, produkowanego w kraju, charakteryzującego się parametrami zbliżonymi do stopów zagranicznych, określanych jako balistyczne. Gęstość wynosiła $2,8 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałość na rozciąganie 380 MPa , wydłużenie 14% .

Wybrana do badań blacha ze stali pancerniej charakteryzowała się gęstością $7,8 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałością na rozciąganie 1550 MPa , wydłużeniem 8% .

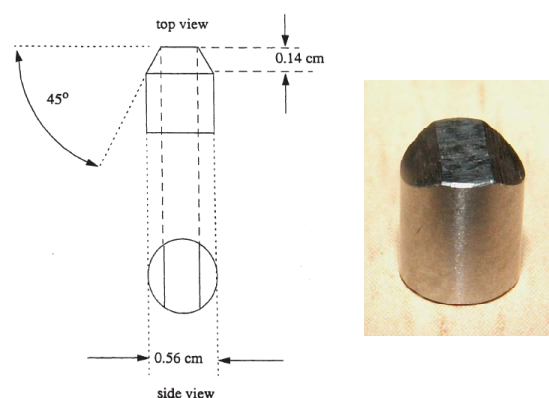
Dodatkowo do badań przygotowano kilka grubości blachy stalowej niskostopowej, jako materiał odniesienia. Gęstość wynosiła $7,8 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałość na rozciąganie 395 MPa , wydłużenie 25% .

2. Badania stanowiskowe.

Podczas badań stanowiskowych przeprowadzono następujące testy:

- odporność na przebicie środkami bojowymi: granaty ręczne, miny przeciwpiechotne, małe IED (wybrane spośród rzeczywistych zagrożeń wg. informacji SPAT),
- odporność na przebicie materiałów z użyciem pocisku symulującego odłamek (FSP) o masie $1,1 \text{ g}$,
- podatność na deformację w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej,
- odporność na przebicie modelowymi IED.

W zakresie odłamkoodporności uznanym testem umożliwiającym porównywanie różnych materiałów, przede wszystkim ze względu na ich gęstość powierzchniową, jest wyznaczanie granicy balistycznej V50 pociskiem symulującym odłamek, o masie $1,1 \text{ g}$, w normach polskich określanym jako odłamek standardowy (rys. 2). Test ten jest opisany w polskiej normie PN-V-87000 „Osłony balistyczne lekkie. Kamizelki kulo- i odłamko odporne. Wymagania ogólne i badania”. Podstawowym dokumentem NATO zawierającym wymagania co do przeprowadzenia tego testu jest STANAG 2920 „Ballistic test method for personal armour”.



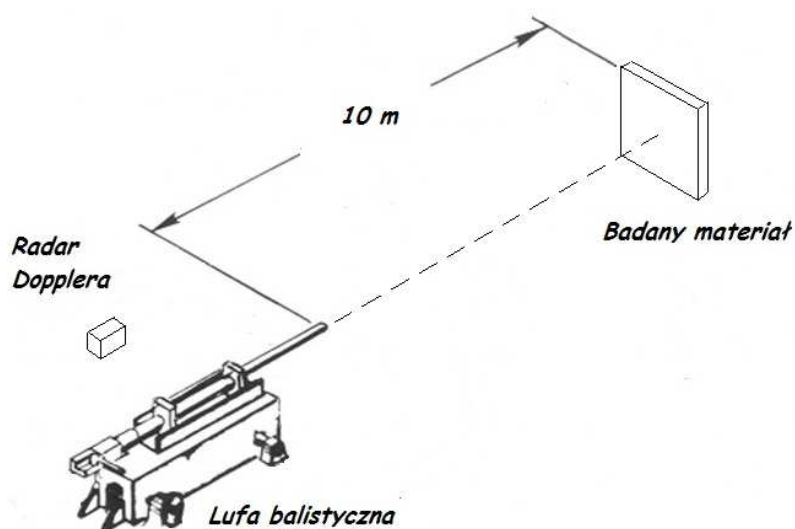
Rys. 2. Pocisk symulujący odłamek o masie $1,1 \text{ g}$. Źródło: STANAG 2920.

Granica balistyczna V50 wyznaczana jest jako średnia 6 prędkości uderzenia prostopadłego (trzech najniższych prędkości zakończonych całkowitym przebiciem i trzech najwyższych prędkości zakończonych częściowym przebiciem). W określaniu granic balistycznych dopuszcza się rozrzut pomiędzy najniższymi i najwyższymi prędkościami uderzenia FSP do 20 m/s . Tylko w przypadkach, gdy najniższa

prędkość zakończona całkowitym przebiciem jest niższa od najwyższej prędkości zakończonej częściowym przebiciem o ponad 20 m/s granice balistyczne oparte są na średniej wyciągniętej z 10 prędkości (5 najniższych prędkości zakończonych całkowitym przebiciem i 5 najwyższych prędkości zakończonych częściowym przebiciem). W tym przypadku zakres prędkości ograniczony jest do najniższego możliwego poziomu (jak najbliżej 20 m/s).

Testy V50 z użyciem pocisków symulujących odłamek o masie 1,1g posłużą głównie do porównywania odłamkoodporności poszczególnych warstw wchodzących w skład kompozytu, wykonanych z różnych materiałów.

Wykonano badania odłamkoodporności, z użyciem odłamka FSP o masie 1,1 g i wyznaczono charakterystyki przygotowanych materiałów. Schemat stanowiska do badań przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska do badań

Drugim testem wykorzystanym do wyboru materiałów była opracowana własna metoda badania odporności materiałów na deformację podczas wybuchu czystego ładunku 75 g trotylu (TNT), umieszczonego 250 mm pod badanym materiałem o wymiarach 500x500 mm.

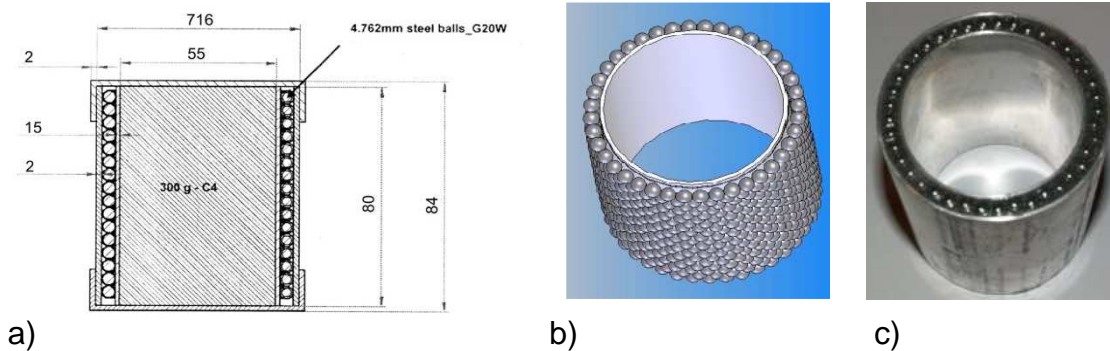
Wielkość deformacji materiałów mierzona była z wykorzystaniem blachy świadka, 0,5 mm blachy ze stopu aluminium, umieszczonej bezpośrednio za badanym materiałem.

W kolejnym teście zaproponowano metodę badań z użyciem modelowych ładunków IED pozwalającą na ocenę poszczególnych materiałów w powtarzalnych warunkach, w których występuje łączne oddziaływanie fali uderzeniowej i odłamków.

Osobnym zagadnieniem rozwiązany w ramach tej metody było opracowanie ładunku modelowego. Potrzeba opracowania takiego ładunku wynikała z faktu, że wnioskowanie o odłamkoodporności materiału tylko na podstawie wyników badań z użyciem FSP nie oddaje rzeczywistych warunków wielokrotnego uderzenia odłamków w materiał, z jednoczesnym działaniem fali uderzeniowej. Ponadto ilość i różnorodność obecnie produkowanych środków bojowych w obszarze granatów i min przeciwpiechotnych jest bardzo duża. Ideą opracowania ładunku modelowego było pozyskanie ładunku pozwalającego na badanie odporności materiałów na przebicie, w tych samych powtarzalnych warunkach.

Jako model ładunku improwizowanego posłużył ładunek zaproponowany w

umowie standaryzacyjnej NATO - STANAG 4569 „Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armored Vehicles” (rys. 4), w którym obudowa wykonana jest ze stopu aluminium, a odłamki stanowi minimum 750 stalowych kulek łożyskowych o średnicy 4,762 mm i masie 0,4 g. Zawartość materiału wybuchowego C4 wynosi 300g. W STANAG 4569 przyjęto założenie, że odłamki generowane z modelowego ładunku powinny mieć prędkość ok. 1200 m/s (rys. 4).



Rys. 4. a) schemat ładunku improwizowanego zaproponowany w STANAG 4569; b) schemat ułożenia kulek w modelu IED; c) model ładunku IED.

3. Wyniki i dyskusja

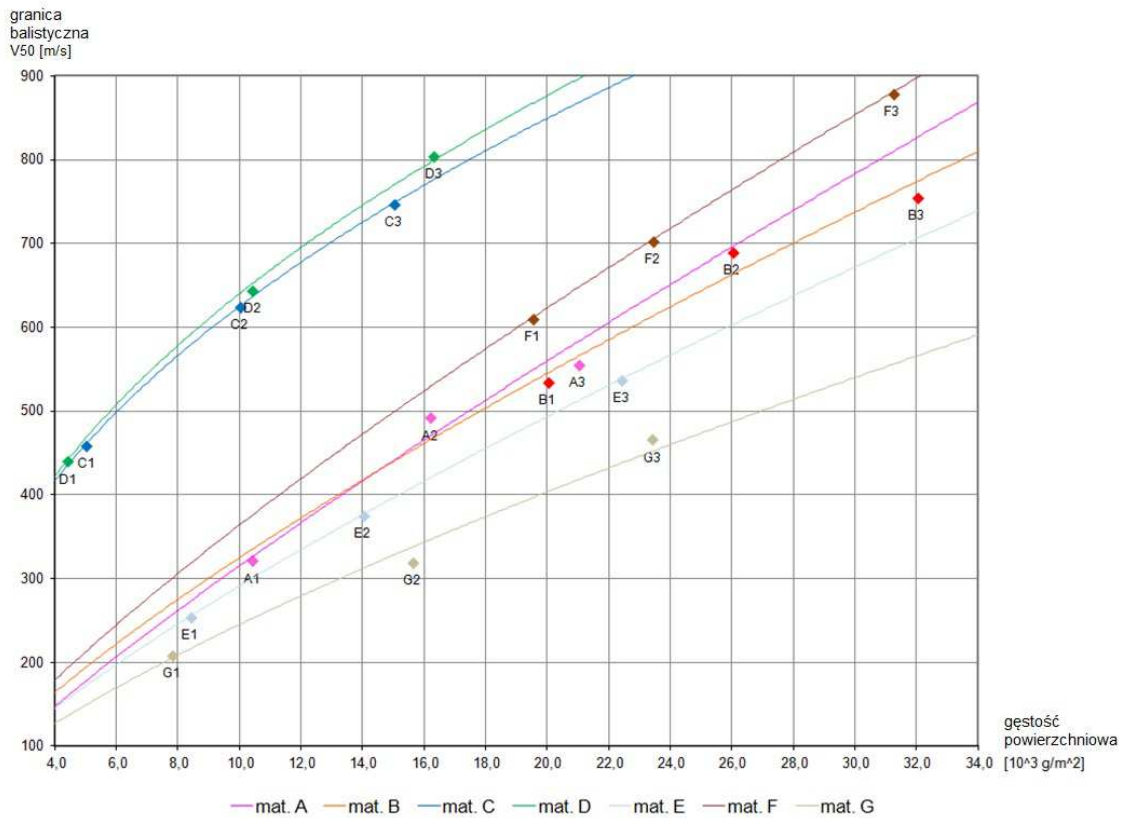
W czasie bliskiego wybuchu ładunku fragmentującego materiał poddawany jest łącznemu oddziaływaniu fali uderzeniowej i odłamków.

W celu opracowania kompozytu warstwowego odpornego na te oddziaływania przeprowadzono badania wstępne, w oddzielnych eksperymentach: badania odłamkoodporności z użyciem FSP 1,1 g oraz badania odporności na wybuch czystego 75 g TNT. Następnie badania weryfikacyjne z użyciem modelowego ładunku IED zgodnego ze STANAG 4569 aneks B poziom 1.

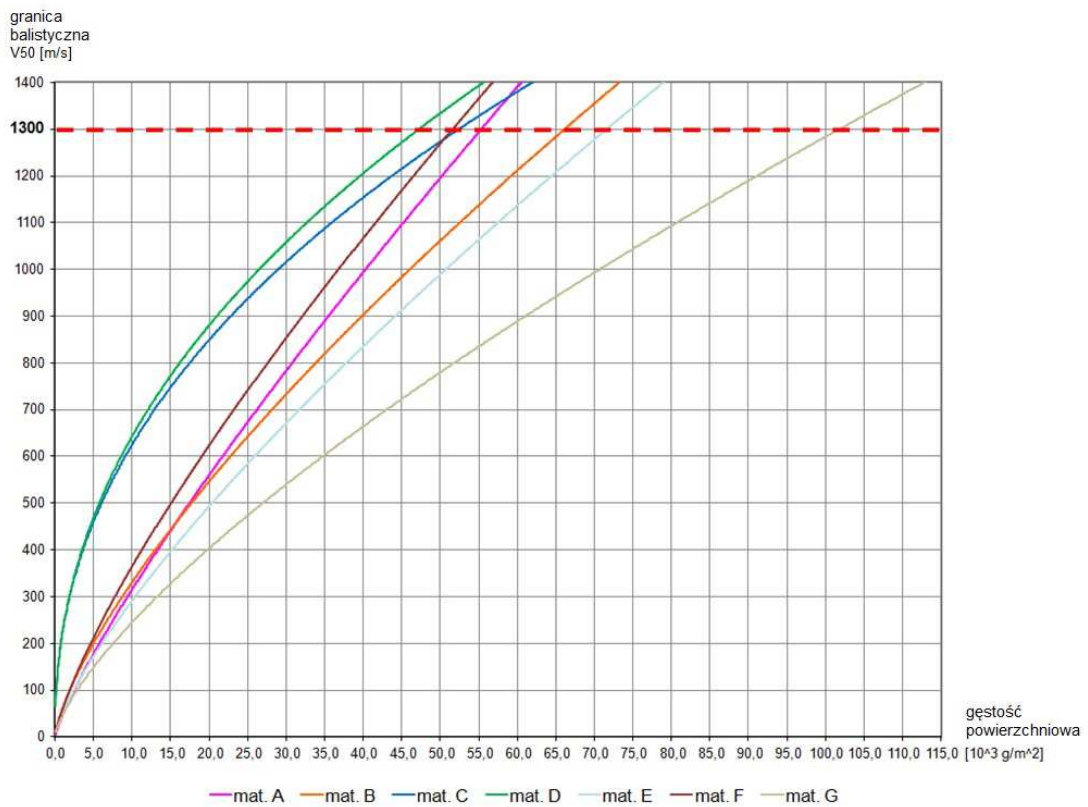
W badaniach wstępnych odłamkoodporności z użyciem FSP 1,1 g zbadano granicę balistyczną V50 dla trzech różnych gęstości powierzchniowych przygotowanych materiałów. Wyznaczono charakterystyki zależności granicy balistycznej od gęstości powierzchniowej, dla każdego z tych materiałów (rys.5).

Na ich podstawie szacowano wartość gęstości powierzchniowej spełniającą limit granicy balistycznej na poziomie 1300 m/s (rys. 6). Prędkość ta, to zmierzona w czasie prób poligonowych maksymalna prędkość odłamków modelu IED i została przyjęta jako kryterium w badaniach porównawczych odłamkoodporności materiałów.

Z otrzymanych rezultatów badań wynika, że dla wybranych materiałów: kompozyt szklany posiada granicę balistyczną V50 dla FSP 1,1 g równą 1300 m/s, przy gęstości powierzchniowej $55 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$. Pozostałe materiały odpowiednio: kompozyt aramidowy – $47 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$, stop aluminium – $72 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$, blacha stalowa pancerna – $52 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$ i blacha stalowa – $102 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$.



Rys. 5. Wyniki badań odłamkoodporności z użyciem odłamka FSP 1,1 g, zależność granicy balistycznej badanych materiałów od ich gęstości powierzchniowej, z naniesionymi liniami trendu. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.



Rys. 6. Zależność granicy balistycznej badanych materiałów od ich gęstości powierzchniowej. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników odłamkodporności w celu optymalizacji układów materiałowych dwuwarstwowych i trójwarstwowych. W optymalizacji przyjęto dwa warunki: suma gęstości powierzchniowych poszczególnych warstw powinna być minimalna i jednocześnie suma wartości ich granic balistycznych powinna być nie mniejsza niż 1300 m/s. W tabeli 2 i 3 przedstawiono przykładowe wyniki optymalizacji dla wybranych układów warstwowych. Kolorem żółtym oznaczono wartości minimalne gęstości powierzchniowej poszczególnych układów warstwowych, dla których granica balistyczna wynosi 1300 m/s.

Tabela 2. Optymalizacja układów dwuwarstwowych. Wybrane, spośród wszystkich wyników optymalizacji, wartości gęstości powierzchniowej materiałów układu [10^3 g/m^2] oraz najmniejsza gęstość powierzchniowa całego układu dwuwarstwowego, dla którego granica balistyczna wynosi 1300 m/s. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Układ A+E	71,67	63,57	59,50	56,72	54,79	53,51	52,79	52,59	52,87	53,65	54,96	56,92	52,59
mat. A	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	34,59
mat. E	71,67	58,57	49,50	41,72	34,79	28,51	22,79	17,59	12,87	8,65	4,96	1,92	18,00

Układ A+D	47,57	38,91	35,57	34,19	34,15	35,13	36,96	39,51	42,67	46,37	50,54	55,11	34,03
mat. A	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	17,65
mat. D	47,57	33,91	25,57	19,19	14,15	10,13	6,96	4,51	2,67	1,37	0,54	0,11	16,38

Układ D+E	47,57	39,79	37,19	36,33	36,61	37,76	39,59	42,01	44,93	48,28	52,03	56,11	36,31
mat. E	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	16,04
mat. D	47,57	34,79	27,19	21,33	16,61	12,76	9,59	7,01	4,93	3,28	2,03	1,11	20,26

Tabela 3. Optymalizacja układów trójwarstwowych. Wybrane, spośród wszystkich wyników optymalizacji, wartości gęstości powierzchniowej materiałów układu [10^3 g/m^2] oraz najmniejsza gęstość powierzchniowa całego układu trójwarstwowego, dla którego granica balistyczna wynosi 1300 m/s. Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Układ A+E+D	36,31	32,39	31,52	31,74	32,75	34,39	36,61	39,36	42,62
mat. A	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
mat. E	16,04	10,54	7,23	4,81	3,02	1,74	0,90	0,39	0,13
mat. D	20,26	16,85	14,29	11,94	9,73	7,65	5,71	3,97	2,49

Układ A+E+D	34,03	31,56	31,74	32,76	34,35	36,39	38,82	41,61	44,75	31,49
mat. A	17,65	12,32	9,10	6,61	4,64	3,10	1,93	1,09	0,55	11,20
mat. E	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	6,58
mat. D	16,38	14,23	12,64	11,15	9,71	8,29	6,89	5,52	4,20	13,71

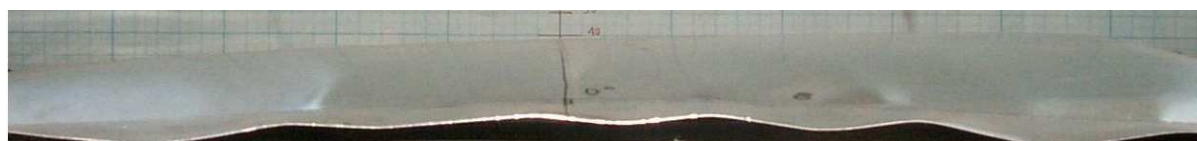
Układ A+E+D	52,59	34,58	31,91	31,53	32,35	33,94	36,13	38,79	41,88
mat. A	34,59	19,02	13,92	10,38	7,66	5,47	3,68	2,23	1,07
mat. E	18,00	10,56	7,99	6,15	4,69	3,48	2,44	1,56	0,81
mat. D	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00

Przeprowadzona optymalizacja wykazała, że najlżejszym układem warstwowym spełniającym postawione założenie jest układ trójwarstwowy. Gęstość

powierzchniowa takiego układu wynosi $31,5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$. Dodatkowymi informacjami do uzyskania z prezentowanych w tabelach wyników jest możliwość wyznaczenia grubości układu, ponieważ znane są gęstości powierzchniowe poszczególnych warstw materiałów w układzie i oszacowania kosztów materiałowych.

Badania odłamkoodporności z użyciem odłamka FSP 1,1 g pozwoliły na wybór poszczególnych warstw wchodzących w skład kompozytu. Nie wskazują jednak ich kolejności ułożenia w kompozycie. W tym celu przeprowadzono badanie odporności materiałów na wybuch czystego ładunku 75 g TNT.

W miarę wzrostu gęstości powierzchniowej materiałów ich deformacja, spowodowana wybuchem ładunku TNT, maleje. Blacha świadek, wykonana ze stopu aluminium, umieszczona za badanym materiałem deformuje się wraz z nim. Po każdym teście wielkość deformacji blachy świadka była mierzona w dwóch prostopadłych kierunkach. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowo deformację blach świadków po testach blach stalowych grubości 1 mm, 2 mm, 3 mm.



stal 3 mm



stal 2 mm

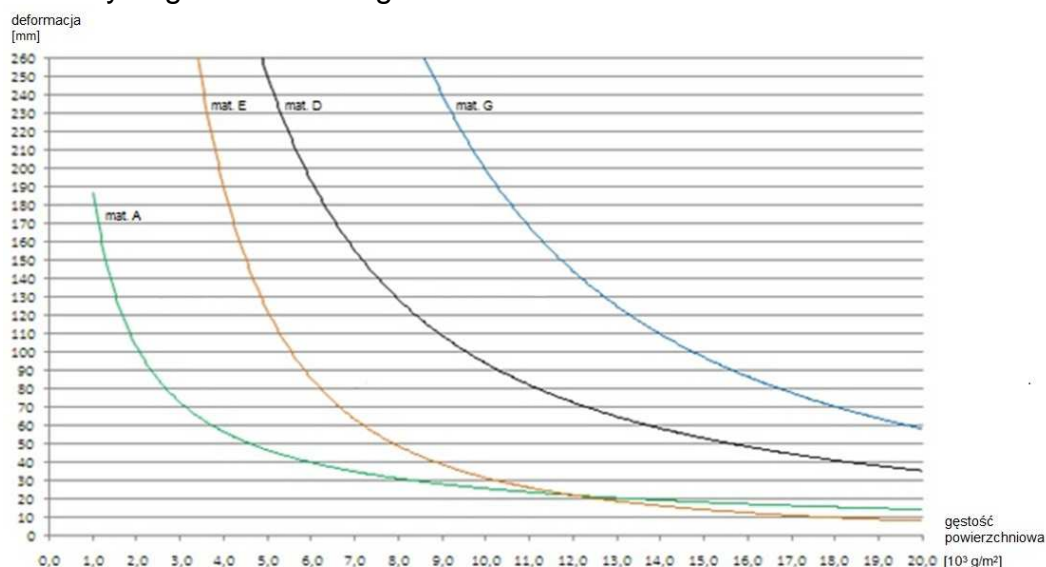


stal 1 mm

Rys. 7. Deformacja blach świadków po testach blach stalowych różnej grubości.

Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Na rysunku 8 przedstawiono wynikową charakterystykę badanych materiałów z użyciem czystego ładunku 75 g TNT.



Rys. 8. Zależność deformacji wybranych materiałów od ich gęstości powierzchniowej.

Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

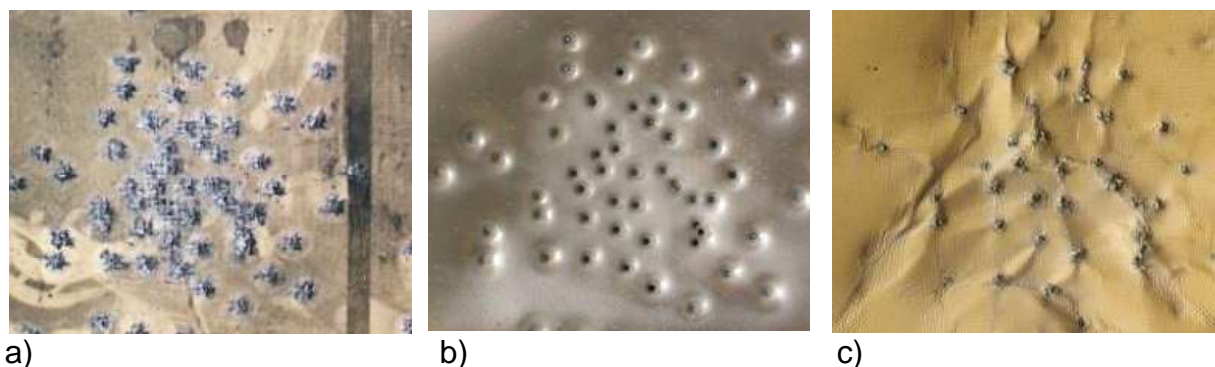
Przeprowadzone badania pozwoliły uszeregować materiały pod względem ich odporności na deformację w wyniku wybuchu czystego ładunku TNT. Materiałem, który deformował się w najmniejszym stopniu jest kompozyt szklany.

Otrzymane wyniki badań wstępnych pozwoliły na ustalenie kolejności ułożenia materiałów w kompozycie warstwowym. Przyjęto, że pierwszym materiałem będzie kompozyt szklany, ze względu na jego największą odporność na deformację podczas wybuchu ładunku TNT oraz wysoką odłamkoodporność, wyrażoną wartością granicy balistycznej V50. Ostatnim materiałem będzie kompozyt aramidowy. Charakteryzuje się on mniejszą odpornością na deformację, niż kompozyt szklany, ale posiada największą odłamkoodporność.

Do badań weryfikacyjnych użyto modeli IED. Badania te były badaniami poligonowymi. Modele IED umieszczano na płycie betonowej, 300 mm pod badaną próbką.

Materiałem odniesienia w tym teście była blacha stalowa o twardości 480 HB tzw. pancerna. W przypadku blach o grubości 4 mm ($32 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$) otrzymywano do 5 przebić. Skuteczną ochronę, przy tych warunkach testu, zapewniła blacha o grubości 6 mm ($48 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$).

Zbadano odporność wybranych modeli dwu- i trójwarstwowych. Jako świadek przebicia, za badanym materiałem, umieszczano blachę karoseryjną grubości 1 mm, która symulowała podłogę samochodu. Na rysunku 9 przedstawiono efekty oddziaływania modelu IED na opracowany kompozyt trójwarstwowy ($31,5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$). Kompozyt nie został przebity.



Rys. 9. Frontowe strony poszczególnych materiałów z układu trójwarstwowego:
a) kompozyt szklany, b) blacha aluminiowa, c) kompozyt aramidowy.

Źródło: WITPiS, opracowanie własne autora.

Podsumowanie

Opracowano układ materiałowy dodatkowej osłony dna samochodów patrolowych i interwencyjnych nieopancerzonych i lekko opancerzonych. Osłona jest kompozytem warstwowym (kompozyt szklany o grubości 6 mm jako pierwsza warstwa ze względu na najmniejszą deformację podczas badań z użyciem ładunków TNT, blacha aluminiowa o grubości 2,5 mm i kompozyt aramidowy o grubości 12,5 mm) mocowanym od spodu samochodu, chroniącym załogę samochodu przed zranieniem lub śmiercią oraz konstrukcję podłogi przed uszkodzeniem, w wyniku detonacji małych ładunków fragmentujących.

Ze względu na eksploatację osłon proponuje się wykonywanie osłony poprzez skręcanie poszczególnych warstw. Podstawą takiego wniosku jest:

- w wyniku detonacji ładunków o mniejszej sile rażenia lub w wyniku uszkodzeń mechanicznych, związanych z pokonywaniem przeszkód terenowych przez samochód, uszkodzeniu może ulec tylko pierwsza warstwa osłony tj. kompozyt szklany. W takim przypadku pozostałe warstwy, zwłaszcza kosztowny kompozyt aramidowy, może być wykorzystywany nadal w konstrukcji osłony, po wymianie kompozytu szklanego. Takie podejście wymusza opracowanie bezinwazyjnych metod diagnostycznych spójności kompozytów,
- skręcanie poszczególnych warstw pozwala na komponowanie struktury osłony w dowolny sposób, pod kątem przewidywanych zagrożeń (ich siły rażenia),
- poszczególne warstwy osłony są łatwiejsze w obróbce mechanicznej, niż układ sklejonny z trzech warstw. Nie ma konieczności zamawiania gotowych formatek osłon, przygotowanych na wymiar. Użytkownik ma możliwość wycięcia dowolnych kształtów, z dużych arkuszy poszczególnych materiałów, zgodnie z doraźnymi potrzebami np. w warunkach polowych.

Osłona w układzie trójwarstwowym chroni przed przebicciem odłamkami granatów, typu F1, min przeciwpiechotnych, typu POMZ i małych ładunków improwizowanych IED, na poziomie 1 STANAG 4569. Gęstość powierzchniowa osłony wynosi $31,5 \cdot 10^3 \text{ g/m}^2$.

Technologia została częściowo wdrożona (produkcja kompozytu szklanego). Wykonane zostały dodatkowe osłony dna samochodów patrolowo – interwencyjnych eksploatowanych w SZ RP.

Literatura

1. Abrate S. Impact on composite structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, ISBN 0-521-01832-3.
2. Abrate S. Impact on Laminated Composite Materials. Applied Mechanics Reviews 1991; 44(4): 155-190.
3. Amparo G., Graciani E., Paris F. Prediction of in-plane stiffness properties of Non-Crimp Fabric laminates by means of 3D Finite Element analysis. Composites Science and Technology 2008; 68(1): 121-131.
4. Andrews E.W., Moussa N.A. Failure mode maps for composite sandwich panels subjected to air blast loading. International Journal of Impact Engineering 2009; 36(3): 418-425.
5. Bogusz P., Ochelski S., Panowicz R., Niezgoda T., Barnat W. Influence of loading rate on energy absorption performance of epoxy composites reinforced with glass fabric. Composites Theory and Practice 2012; 12(2): 110-114.
6. Borvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectile. International Journal of Impact Engineering 2009; 36(7): 948-964.
7. Borvik T., Langseth M., Hopperstad O., S., Malo K., A. Ballistic penetration of steel plates. International Journal of Impact Engineering 1999; 22(9): 855-886.
8. Committee on High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites, National Research Council. Report: High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites. Washington: The National Academies Press, 2005, ISBN: 0-309-54943-4.
9. Committee on Materials Research for Defense After Next, National Research Council. Report: Materials Research to Meet 21st Century Defense Needs. Washington: The National Academies Press, 2003, ISBN: 0-309-50572-0.

10. Committee on Lightweight Materials for 21st Century Army Trucks, National Research Council. Report: Use of Lightweight Materials in 21st Century Army Trucks. Washington: The National Academies Press, 2003, ISBN: 0-309-50646-8.
11. Ernest S.C. Army focused research team on functionally graded armor composites. *Materials Science and Engineering* 1999; A259: 155–161.
12. Fahmy A. A. Report AD-A281587: Deformation, strength, and failure modes of laminated conventional and hybrid polymer-matrix composites loaded in the thickness direction. Defense Technical Information Center, 1994.
13. Galanis K. Rozprawa: Hull construction with composite materials for ships over 100 m in length. Massachusetts Institute of Technology, 2002.
14. Gürdal Z., Haftka R.T., Hajela P. Design and Optimization of Laminated Composite Materials. John Wiley & Sons, 1999, ISBN: 978-0-471-25276-4.
15. Hogg P.J. Composites for Ballistic Applications. *Proceedings of Composite Processing*, 2003.
16. Imielińska K., Wojtyra R. Wpływ rodzaju zbrojenia i kolejności ułożenia warstw na tolerancję zniszczeń wywołanych udarami o małej prędkości laminatów epoksydowych zbrojonych włóknem węglowym, szklanym, kevlarowym i hybrydowych. *Kompozyty - Composites* 2002; 5: 364-368.
17. Jena P.K., Mishra B., Ramesh Babu M., Singh A.K. Sivakumar K., Bhat T.B. Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *International Journal of Impact Engineering* 2010; 37(3): 242-249.
18. Jensen R.E., Mcnight S.H., Quesenberry M.J. Report ARL-TR-2655: Strength and Durability of Glass Fiber Composites Treated With Multicomponent Sizing Formulations. Army Research Laboratory, 2002.
19. Kang T.J., Kim C. Impact energy absorption mechanism of largely deformable composites with different reinforcing structures. *Fibers and Polymers* 2000; 1(1): 45-54.
20. Kant S., Verma S. L. A Review on Analysis and Design of Bullet Resistant Jacket - Ballistic Analysis. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 2017; 4(3): 71-80.
21. Kevlar Technical Guide. DuPont
22. Kirkwood J.E., Kirkwood K.M., Lee Y.S., Egres R.G., Wagner N.J., Wetzel E.D. Report ARL-CR-538: Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar® KM-2 fabric: part II: predicting ballistic performance. Army Research Laboratory, 2004.
23. Lane R., Craig B., Babcock W. Materials for blast and penetration resistance. *The Amptiac Quarterly* 2002; 6(4): 39-45.
24. Liu D. Characterization of impact properties and damage process of glass/epoxy composite laminates. *Journal of Composite Materials* 2004; 38(16): 1425-1442.
25. Madhu V., Balakrishna Bhat T. Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles. *Defence Science Journal* 2011; 61(4): 394-402.
26. Mamalis A. G., Spentzas K. N., Manolakos D. E., Ioannidis M. B. Composite and hybrid materials for next generation road and rail vehicles. *Proceeding Synenergy Forum Conference*, National Technical University of Athens 2008: 9-16.
27. Marston C., Gabbittas B., Adams J. The effect of fibre sizing on fibres and bundle strength in hybrid glass carbon fibre composites. *Journal of Materials Science* 1997; 32(6): 1415-1423.
28. McMahon P.E., Ying L. Report 3607: Effects of fibre/matrix interactions

- on the properties of graphite/epoxy composites. NASA 1982.
29. MIL-HDBK-1002/6. Aluminum structures, composites structures, structural plastics, and fiber-reinforced composites. Department of Defence USA
 30. MIL-HDBK-17. Composite Materials Handbook. Department of Defense USA.
 31. Nurick GN, Langdon GS, Chi Y, Jacob N. Behavior of sandwich panels subjected to intense air blast – part 1: experiments. *Composite Structures* 2009; 91(4): 433-441.
 32. Patel B.P., Bhola S.K., Ganapathi M., Makhecha D.P. Penetration of Projectiles in Composite Laminates. Institute of Armament Technology. *Defence Science Journal* 2004; 54(2): 151-159.
 33. Pike R.A., Novak R.C. Report CR-134763: Design, fabrication and test of multi-fiber laminates. NASA 1975.
 34. Randjbaran E., Zahari R., Majid D., Jalil N., Vaghei R. and Ahmadi R. The Effects of Stacking Sequence Layers of Hybrid Composite Materials in Energy Absorption under the High Velocity Ballistic Impact Conditions: An Experimental Investigation. *Journal of Material Sciences & Engineering* 2013, 2(4): 1-8.
 35. Razali N., Sultan M.T.H., Mustapha F., Yidris N., Ishak M.R. Impact Damage on Composite Structures – A Review. *International Journal of Engineering and Science (IJES)* 2014; 3(7): 8-20.
 36. Report ETL 1110-2-548: Composite materials for civil engineering structures, U.S. Army Corps of Engineers, 1997.
 37. Schuster D. Ballistic impact on composites. *Transactions on Engineering Sciences* 1994; 4: 175-181.
 38. Surowska B. Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2008; 3: 30-40.
 39. Tekalur S.A., Bogdanovich A.E., Shukla A. Shock loading response of sandwich panels with 3-D woven E-glass composite skins and stitched foam core. *Composites Science and Technology* 2009; 69(6): 736-753.
 40. Wang E., Gardner N., Shukla A. The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores. *International Journal of Solids and Structures* 2009; 46(18-19): 3492-3502.
 41. Zhu F, Lu G. A review of blast and impact of metallic and sandwich structures. *Electronic Journal of Structural Engineering* 2007; Special Issue: Loading on Structures: 92–101.