

## GLASS FRAGMENTS AS IMPORTANT CRIMINALISTIC EVIDENCE – CASE STUDIES

Aleksandra MICHALSKA, Grzegorz ZADORA, Maciej ŚWIĘTEK

*Institute of Forensic Research, Kraków, Poland*

### Abstract

Herein the authors present examples of real forensic cases in which glass fragments constituted important evidence. Both large glass objects and glass microtraces were examined. In the case of large glass objects, tool marks examinations (mostly “jigsaw fit” analyses) were performed, while in the case of glass microtraces (and large glass fragments for which tool mark examination was insufficient), elemental composition was determined using a scanning electron microscope coupled with an energy dispersive X-ray spectrometer. In most cases, data obtained from physicochemical analyses (cases II–IV) were additionally interpreted with the use of the likelihood ratio test. Glass evidences were analysed in order to establish: if car lights were switched on during a collision (case I); if a car was involved in a hit-and-run accident (case II); if a pneumatic gun was used for breaking into a car (case III); and whether an event was an accident or not (case IV). Most of the presented cases could only be solved because combined information obtained from tool marks examinations and physicochemical analyses of glass supported by the likelihood ratio approach were used.

### Key words

Glass fragments; Tool marks examination; Elemental content of glass samples; SEM-EDX; Likelihood ratio.

*Received 1 September 2015; accepted 19 October 2015*

### 1. Introduction

Glass fragments are often encountered at the scene of various criminal events and accidents such as burglaries, car accidents or street fights (Curran, Hicks, Buckleton, 2000). Their analysis, performed for criminalistic purposes, usually involves establishing which category analysed glass fragments originate from – e.g. whether they belong to the container or windows category (classification problem) – or answering the question as to whether questioned and control glass fragments have the same origin (comparison problem; Aitken, Taroni, 2004; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014). The way in which glass evidences are analysed is determined mainly by their size (Curran, Hicks, Buckleton, 2000). In the case of large glass

fragments (e.g. pieces of broken headlamps or windows), tool marks examination, i.e. “jigsaw fit” analysis, is performed first. In “jigsaw fit” analysis, the tool marks expert tries to match recovered glass fragments to control glass fragments in order to determine whether they were part of the same object before it was broken. A positive result of this examination allows for individual identification of the object and enables the forensic expert to draw categorical conclusions. In these types of cases, physicochemical analyses are not performed, because they only allow for group identification – and so conclusions are always formulated in terms of probabilities. Another aspect of tool mark examination is the determination and comparison of morphological features of glass such as colour, thickness or surface characteristics, which usually provide

useful information for solving comparison or classification problems; however, such information only allows for group identification (Baldwin et al., 2013).

In most cases, during the breaking of a glass object, a large number of very small glass microtraces with linear dimensions between 0.1 and 0.5 mm are formed (Zadora, Brożek-Mucha, 2002). Such microtraces can be transferred onto clothes, hair and/or shoes of persons present at the scene of an event. Such small glass fragments can be revealed even after many hours; however, the probability of their disclosure sharply decreases with time as a result of using the object or clothes on whose surface the microtraces were deposited. Such glass fragments secured from clothes, objects or the scene of the event are too small to be subjected to tool marks examination. Therefore, it is necessary to perform physicochemical analyses. Such analyses are also performed for large glass fragments for which results of tool marks examination are insufficient (e.g. with a negative result of “jigsaw fit” analysis; Zadora, Brożek-Mucha, 2002).

Among physicochemical methods used in the analysis of glass microtraces for criminalistic purposes are those which determine the elemental composition of glass – e.g. using a Scanning Electron Microscope coupled with an Energy Dispersive X-ray Spectrometer; SEM-EDX (Curran, Hicks, Buckleton, 2000; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014) or by the thermo-immersion method of determination of the glass refractive index, e.g. by the application of Glass Refractive Index Measurement – GRIM (Curran, Hicks, Buckleton, 2000; Zadora, Wilk, 2009; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014). The obtained results can be interpreted using statistical methods, e.g. likelihood ratio (*LR*) tests. *LR* tests allow to express the role of the forensic expert in the evaluation of data – obtained, for example in physicochemical glass analyses – in the context of two contrasting hypotheses: the so-called prosecution and defence hypotheses. Using the *LR* test, the forensic expert may include – in one calculation – all important factors from the forensic point of view, such as between-object variability, within-object variability as well as the rarity of the observed features in the general population. The obtained *LR* values allow the expert to evaluate which of the hypotheses is more strongly supported by the evidence. What is more, *LR* models can be used for solving both classification and comparison problems (Aitken, Taroni, 2004; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014).

Herein the authors present examples of real forensic cases in which large glass objects (tool marks examination) as well as glass microtraces (physicochemical analyses based on establishing the elemental

composition of glass by application of the SEM-EDX technique) were subjected to examination. The authors also present cases in which the final conclusions presented in the expert report could be drawn only by taking into account information gained from both types of examinations – namely tool marks and physicochemical analyses.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Examination of evidences

Large glass fragments were examined in white light. However, for more sophisticated analysis (e.g. in order to establish the direction of a force’s action on a glass pane), a FSC Nikon SMZ 2T stereo magnifying glass (Japan), or Leica (Germany) comparison microscope coupled with a Leica DFC 490 camera were used.

In cases where glass microtraces had to be revealed, the surface of the evidence (e.g. clothes) was brushed above a sheet of smooth grey paper. Microtraces obtained in this way were then placed in a Petri dish and observed under a Leica MZ 16 stereomicroscope. During this examination, microtraces which looked like glass objects were picked out from the debris using a preparation needle, and transferred directly onto double-sided self-adhesive carbon tape located on an aluminium microscope stub.

The surface of this stub was carbon coated using an SCD-50 sputter coater (Bal-Tech, Switzerland). The sample prepared in this way was then placed in the chamber of a JSM-6610LV Scanning Electron Microscope (Jeol, Japan) equipped with an Inca Energy Dispersive X-ray Spectrometer (Oxford Instruments Ltd., United Kingdom).

### 2.2 Analysis of the elemental composition of glass by the SEM-EDX technique

The elemental composition of glass microtraces was determined using a SEM-EDX instrument. During analysis, the following analytical conditions were applied: accelerating voltage: 20 kV; count time: 50 s; magnification: from 1000 to 5000 times; calibration element: Co; and a library of element profiles provided by the manufacturer. Each glass fragment was analysed in three different spots. In the first described example (case I), qualitative and quantitative information about all elements present in analysed samples was collected. In the rest of the examples (cases II–IV), where obtained results were interpreted using the

likelihood ratio approach, information relating to the elemental content – e.g. O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, and Fe expressed as a weight percentage – was analysed. This information was used for creating seven new variables, defined as the  $\log_{10}$  of the content of each of the elements normalized to oxygen content (Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014). Moreover, before determining the elemental composition of a particular glass fragment, its linear dimension was established using an SEM image.

### 2.3 Data interpretation

Data relating to elemental composition of glass fragments obtained with the use of SEM-EDX analysis were interpreted using the likelihood ratio approach (case II–IV; Aitken, Lucy, 2004; Aitken, Lucy, Zadora, Curran, 2006; Aitken, Zadora, Lucy, 2007; Neocleous, Aitken, Zadora 2009; Ramos, Gonzalez-Rodriguez, Zadora, Aitken, 2013; Ramos, Zadora, 2011; Zadora, 2011; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014; Zadora, Ramos, 2010; Zadora, Neocleous, 2009; Zadora, Neocleous, 2010; Zadora, Neocleous, Aitken, 2010). This methodology allowed us to evaluate whether the delivered evidence ( $E$  – in this case, the elemental composition determined for the particular glass fragment) more strongly supports the prosecutor's version ( $H_1$ ; i.e., the prosecutor's hypothesis) or the defence's version ( $H_2$ ; i.e., the defence's hypothesis). The method relies on establishing the conditional probabilities –  $Pr(E|H_1)$  and  $Pr(E|H_2)$  and evaluation of the likelihood ratio ( $LR$ ) value expressed by the equation:

$$LR = \frac{Pr(E|H_1)}{Pr(E|H_2)}. \quad (1)$$

The likelihood ratio is interpreted in the following way: when the  $LR$  value is greater than 1, the evidence ( $E$ ) supports the prosecutor's hypothesis ( $H_1$ ), while a value below 1 supports the defence's hypothesis ( $H_2$ ). In  $LR$  interpretation, the following simple principle is also applied: the greater (lower) the  $LR$  value is, the stronger (the weaker) the support for hypothesis  $H_1$  ( $H_2$ ) is. Additionally, in order to reflect the strength of support for the selected hypothesis, when formulating the final report's conclusion, the expert may use a verbal scale which is based on the obtained  $LR$  values (Evet, Jackson, Lambert, McCrossan, 2000; ENFSI 2015). For example, when the evidence supports the prosecutor's version ( $H_1$ ), the verbal scale is presented as follows:

- a)  $1 < LR \leq 10$  slight/limited support;
- b)  $10 < LR \leq 100$  moderate support;
- c)  $100 < LR \leq 1000$  moderately strong support;

- d)  $1000 < LR \leq 10\,000$  strong support;
- e)  $LR > 10,000$  very strong support.

When obtained  $LR$  values are below one, the forensic expert uses the same verbal scale; however, the strength of support relates to the defence's proposition ( $H_2$ ). For example, an  $LR$  equal to 0.001 means that the evidence 1000 times more strongly supports the defence's hypothesis, which on the verbal scale is equivalent to moderately strong support for this hypothesis.

In the presented cases, when solving a classification problem, the following hypotheses were tested:

- a)  $H_1$  – the analysed glass fragment originates from the category of car or building windows;
- b)  $H_2$  – the analysed glass fragment originates from the category of glass containers, i.e., the other most frequently encountered category in human surroundings, and, by the same token, most frequently disclosed at the scene of an event.

However, when solving a comparison problem, the following hypotheses were tested:

- a)  $H_1$  – the compared glass fragments originate from the same source;
- b)  $H_2$  – the compared glass fragments originate from different sources.

It should be pointed out that evidence interpretation during the solving of a classification or comparison problem is carried out on the so-called source level. However, fact finders, when asking about, for example, the presence of microtraces on the body, clothes or shoes of a suspected person, usually want to know not only which category they originate from or whether they come from the same object as the comparative sample, but, more importantly, they also want to establish what type of activity caused these particular microtraces to be deposited on the suspect's body, clothes and/or shoes. In such a case, data interpretation is carried out on the so-called activity level (which means that the number of glass fragments as well as primary transfer, secondary transfer and contamination problems are taken into account). For example, in the case of data interpretation carried out on the activity level, the following hypotheses can be tested:

- a)  $H_1$  – the suspect took part in the criminal event (e.g. broke a car window);
- b)  $H_2$  – the suspect did not take part in the criminal event (e.g. a few glass fragments revealed on his/her clothes resulted from contamination).

Nevertheless, even without  $LR$  calculations, it can be *a priori* stated that revealing at least 3 glass microtraces in evidence material (Curran, Hicks, Buckleton, 2000) exhibiting a common origin with the control glass sample is enough evidence that the suspect was involved in the event. However, a small number of

glass fragments (less than 3; Curran, Hicks, Buckleton, 2000) does not support either of the hypotheses, because the presence of a small amount of glass may result from contamination (i.e., glass transferred by chance).

More information about the way to prepare data for *LR* calculations as well as information about *LR* models which are applied nowadays can be found in the literature (Aitken, Taroni, 2004; ENFSI, 2015; Jackson, Aitken, Roberts, 2014; Roberts, Jackson, 2012; Puch-Solis, Roberts, Pope, Aitken, 2012; Roberts, Aitken, 2013; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014).

## 2.4 Software

Likelihood ratio calculations were performed using R software (The R Foundation for Statistical Computing, 2014), using routines written by one of the authors (Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014).

## 3. Case studies

### 3.1. Case I

In November, two cars collided after dark. The driver of car A, who drove into car B, testified that he hadn't noticed the second car, due to the fact that the lights of car B had not been switched on. However the driver of car B disputed this. In order to check whose testimony was true, the police secured a bulb from the broken headlamp of car B (evidence I.1) and delivered it to the laboratory in order to check if the bulb of this lamp had been switched on during the impact ( $H_1$ ), or not ( $H_2$ ).

How a conclusion is reached about whether a bulb was switched on or not during a collision is dependent on whether the glass envelope of the bulb was broken during the collision (Baudoin, Lavabre, 1996). If, during an accident, the envelope of the bulb was not smashed, the tool marks expert analyses any deformations of the filament, makes observations of the filament's ends and/or looks for a specific coating which may be deposited on the inside of the bulb's envelope (Baudoin, Lavabre, 1996). In the case of accidents during which the bulb was broken, the tool marks expert concentrates on searching for a specific type of colored coating fixed onto the filament surface. This type of coating may arise when oxygen present in the air reacts with the still hot filament. If the filament is made from tungsten then the presence of yellow ( $\text{WO}_3$ ), dark-blue ( $\text{WO}_{2.9}$ ), reddish-violet ( $\text{WO}_{2.72}$ ) or brown coating ( $\text{WO}_2$ ; Goebel, 1975) confirms that the

bulb was probably switched on during the impact ( $H_1$ ). It may also happen that during breaking of the envelope, small fragments of glass which have contact with the still hot filament become melted onto its surface. Revealing of such a fragment of melted glass on the filament surface (Baudoin, Lavabre, 1996) additionally confirms the fact that the bulb filament was still hot and the bulb was probably switched on during the impact ( $H_1$ ).

The delivered bulb was subjected to examination in white light with the use of a stereo magnifying glass. During this examination, it was established that the glass envelope of the bulb was broken and metal elements of the bulb such as the cap (sleeve), filament and contact wires were bent and damaged. During tool mark examination performed with the use of a comparison microscope, a colored coating associated with the presence of oxides, e.g. tungsten oxides, was not revealed. However, a single object that resembled glass, with linear dimension of around 1 mm, melted onto the filament, was noticed (object labeled no. 1 in Figure 1).

The revealed fragment resembling glass as well as the bulb's filament were subjected to physicochemical analysis. As a result of elemental analysis performed on the clean filament surface, it was determined that this filament was made from tungsten. Additionally, based on filament surface observations performed with the use of SEM (Figure 2), it was noticed that in many places on the filament surface, a foreign solid substance resembling melted glass was present. Elemental analysis performed in two such places as well as examination of one of the small objects attached to the filament (microtrace 1) confirmed that this was glass (Table 1) with special physicochemical properties that are required for glass applied in, for example, bulb production. These special properties are obtained mainly due to the relatively high amount of potassium and barium in this glass (Table 1).

On the basis of the performed examinations, it was concluded that the presence of the single glass microtrace, as well as the melted glass fragments disclosed on the surface of the filament gave much stronger support to the hypothesis that the bulb from the headlamp of car B was switched on during the collision ( $H_1$ ), than the opposite hypothesis ( $H_2$ ).

It should also be said that the lack of coating on the filament surface characteristic for tungsten oxides in this particular case was not evidence that the bulb was not switched on during the accident. For such oxides are usually present in very small amounts, which can be lost when a damaged bulb is taken out of a socket or during its packing or transporting.

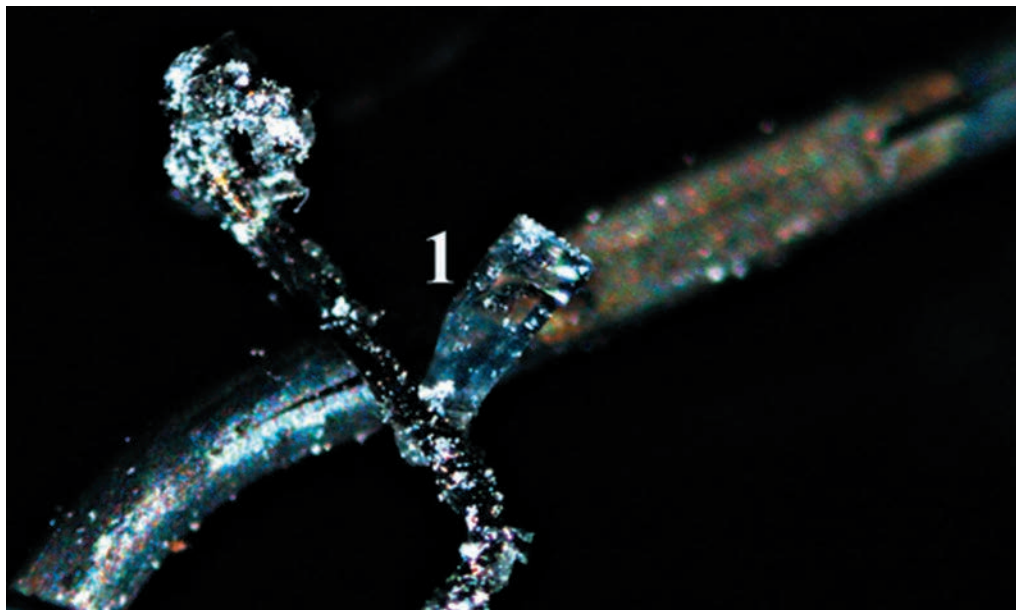


Fig. 1. Photograph of the bulb's filament taken with the use of a Leica FSC comparison microscope (1) denotes a glass fragment, with linear dimension of around 1 mm, melted onto the bulb's contact wire.



Fig. 2. The filament of the bulb with glass melted onto the filament – observed with the use of a scanning electron microscope. (1) and (2) denote sites at which the elemental composition was analysed.

Table 1

Mean elemental composition determined for glass fragments revealed during examination of the broken bulb (evidence I.1)

Analysed material	Content [wt. %]							
	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ba
Microtrace 1 in Fig. 1	48.27 <sup>a)</sup>	8.21	2.11	0.68	34.91	1.27	3.65	0.90
	2.06 <sup>b)</sup>	0.32	0.11	0.03	1.35	0.12	0.32	0.04
Melted substance observed on the filament's surface (place labelled no 1 in Fig. 2)	49.86	6.63	1.85	1.55	34.84	0.79	3.21	1.19
	0.67	0.42	0.14	0.67	0.86	0.07	0.15	0.25
Melted substance observed on filament's surface (place labelled no 2 in Fig. 2)	48.35	7.13	2.01	0.71	36.02	1.01	3.75	0.89
	4.29	0.62	0.13	0.03	3.73	0.22	0.79	0.31

<sup>a)</sup> Mean, <sup>b)</sup> standard deviation.

### 3.2 Case II

A dead cyclist was found on a poorly lit local road in July. The police suspected a hit-and-run accident. The police collected twenty six colourless glass fragments (evidence II.1) during the scene of the accident inspection. The victim's clothes, namely trousers (evidence II.2) and a sweatshirt (evidence II.3), were also secured for further analysis. A few days later, the suspected car (marque X) was stopped by the police. Inspection of the car revealed that its front right headlamp was broken. Therefore, three glass fragments (evidence II.4) were taken from it as control material. All evidences were delivered to the laboratory in order to answer the following questions:

1. Did the glass fragments secured from the scene of the accident and the control glass fragments collected from the broken front right headlamp of the suspected car (marque X) originate from the same object ( $H_1$ ), or did they originate from different objects ( $H_2$ )?
2. Were glass microtraces present on the victim's clothes, and if so did they originate from the broken front right headlamp of the marque X car ( $H_1$ ), or did they originate from different sources ( $H_2$ )?

Large glass pieces were subjected to tool mark examination, in which they were observed using a magnifying glass. It was observed that some of the glass pieces (evidence II.1) possess a specific surface pattern characteristic for headlamps, whereas on a few other pieces a headlamp serial code was noticed. In the next step, the tool mark expert performed "jigsaw fit" analysis, trying to match evidence glass fragments (evidence II.1) to control glass fragments (evidence II.2). However, as a result of this examination, only

the smallest control glass fragment (evidence II.4) was matched to one evidence glass fragment (labelled evidence II.1.1). It was found that their edges fitted each other tightly, which is illustrated in Figure 3. Additionally, the edges of fragments which matched were also the subject of analysis using a comparison microscope. It was found that the outlines of the edges of fragments of glass which were formed during the breaking of the glass exactly matched (on the fragments which had been fitted each other; Figure 4).

The tool mark expert also managed to fit 3 out of the 26 glass fragments revealed at the accident scene to each other (marked as evidence II.1.2–II.1.4). As a result of this analysis, the specific headlamp serial code was identified, and the expert established that this number was characteristic of a model of headlamp used only by marque X cars. However, an attempt to match the glass fragments bearing specific serial codes (glass pieces revealed at the scene of the accident) with control glass fragments failed. Therefore, physicochemical analysis was performed in order to check whether the fitted glass fragments which were characterised by a specific serial code could have originated from the same object as the control glass samples.

In this analysis, three glass microtraces with linear dimension between 0.1–1.0 mm were sampled from each evidence fragment (i.e., fitted glass fragments collected at the scene of the accident – described here as II.1.2–II.1.4) and from control glass fragments (II.4), and were subjected to quantitative elemental analysis. The obtained results (Table 2) were compared using the likelihood ratio approach (interpretation at the source level) – testing the following hypotheses:

- a)  $H_1$  – glass fragments with a specific serial code, which were collected at the accident scene and la-

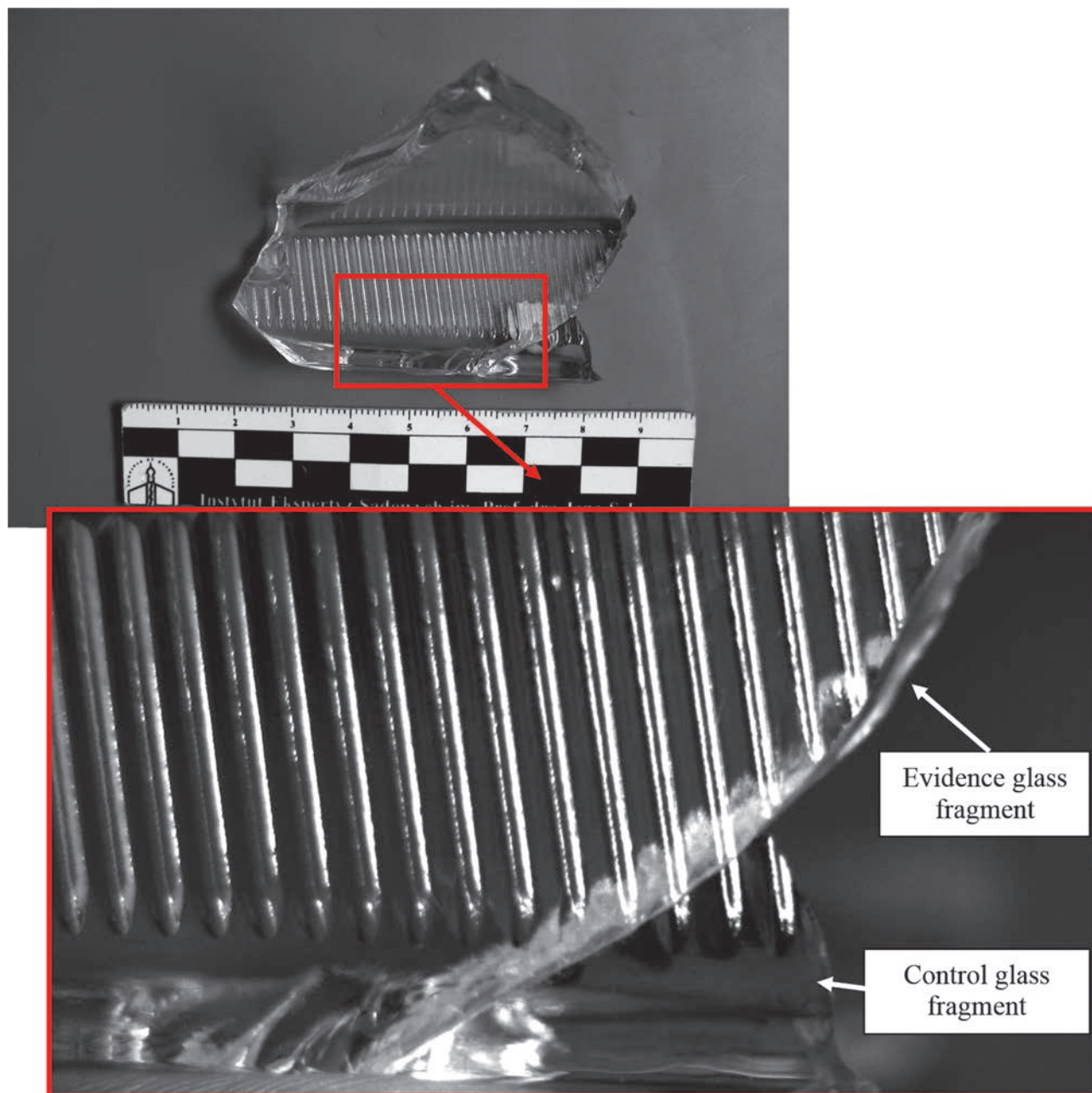


Fig. 3. Evidence glass fragment matched to control glass fragment.

beled as evidence II.1.2–II.1.4, originate from the same object as control glass fragments – evidence II.4.

- b)  $H_2$  – glass fragments with a specific serial code, which were collected at the accident scene and labeled as evidence II.1.2–II.1.4, do not originate from the same object as control glass fragments – evidence II.4.

It was ascertained, based on performed likelihood ratio calculations (Table 2), that for glass fragments

(that had been matched to each other) on whose surface a specific serial code was revealed (evidence II.1.2–II.1.4), hypothesis ( $H_1$ ) is more likely – that these fragments originate from the same object as glass fragments that were secured during the examination of car X (evidence II.4), than hypothesis ( $H_2$ ): that these fragments originate from another glass object. Moreover, it can be ascertained that the strength of support for the hypothesis about their common origin is very strong ( $LR \gg 10,000$ ).

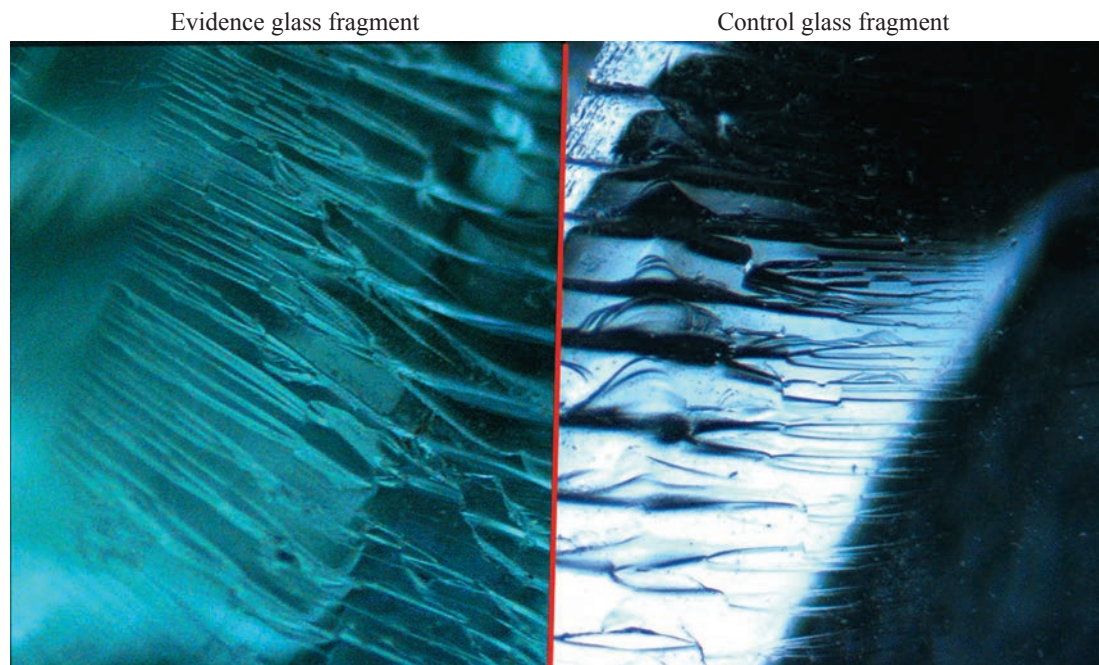


Fig. 4. Comparison of the outlines of edges (cracking) formed during glass fracture. Images of edges of evidence and control glass fragments in their matching place – view obtained with the use of a Leica FSC comparison microscope.

Table 2

Mean elemental composition determined for glass fragments fitted to each other, exhibiting a specific serial code, which were revealed on the road (evidence II.1.2–II.1.4); glass fragments found on victim's clothes (ev. II.2–II.3); as well as results of likelihood ratio calculations (LR)

Evidence	microtrace	Content [% wt.]						LR value
		O	Na	Al	Si	K	Ca	
II.1.2	1	49.08 <sup>a)</sup>	9.25	1.07	33.11	1.33	6.11	698,500 <sup>c)</sup>
		1.24 <sup>b)</sup>	0.28	0.03	0.97	0.09	0.42	
II.1.3	1	49.36	9.36	1.07	32.88	1.30	5.99	429,100
		0.84	0.20	0.03	0.65	0.06	0.27	
II.1.4	1	49.55	9.34	1.07	32.75	1.29	5.96	256,700
		1.50	0.28	0.04	1.22	0.10	0.45	
II.2	1	46.71	8.85	1.12	35.05	1.48	6.77	19,490
		0.42	0.08	0.03	0.34	0.04	0.20	
	2	54.82	2.97	1.34	40.66	0.10	0.00	LR < 1 <sup>d)</sup>
		0.16	0.05	0.07	0.03	0.04	0.00	
	3	45.52	8.45	1.14	35.94	1.55	7.31	1,601
		1.19	0.09	0.05	0.74	0.09	0.39	
	4	47.89	8.99	1.10	34.16	1.39	6.43	55,220
		0.57	0.18	0.03	0.50	0.03	0.14	
II.3	1	48.79	8.98	1.11	33.53	1.33	6.22	26,130
		0.09	0.07	0.03	0.05	0.05	0.09	
	2	48.68	8.92	1.08	33.53	1.36	6.38	19,600
		1.60	0.31	0.01	1.15	0.13	0.62	

<sup>a)</sup> mean, <sup>b)</sup> standard deviation, <sup>c)</sup> value of LR > 1, which indicates that the elemental composition of a particular glass microtrace more strongly supports the hypothesis that it originates from the same source as the control material, <sup>d)</sup> values of LR < 1 indicate that the elemental composition of a particular glass microtrace more strongly supports the hypothesis that it originates from a source other than the control material.



Glass microtraces revealed on the victim's clothes (evidences II.2 and II.3) were also subjected to physicochemical analysis. There were six such microtraces – four secured from debris from the trousers (evidence II.2) and 2 found in debris recovered from the victim's sweatshirt (evidence II.3). Their linear dimension was in the range between 0.1 and 1.2 mm. Results relating to their quantitative elemental composition (Table 2) were interpreted using the likelihood ratio approach. The *LR* values confirmed that for five out of six glass microtraces revealed on the victim's clothes (evidences II.2 and II.3), the hypothesis  $H_1$  about having the same origin as glass fragments collected from the suspected vehicle (marque X) is more likely than the hypothesis concerning their origin from another glass object ( $H_2$ ). Moreover, the support for this hypothesis ( $H_1$ ) is very strong.

Results relating to both tool mark examination and physicochemical analysis of glass fragments allowed us to conclude that on the activity level they much more strongly supported the hypothesis that the car from which the broken headlamp glass fragments were collected took part in the hit-and-run accident ( $H_1$ ) than the hypothesis ( $H_2$ ) that this car did not take part in this accident.

### 3.3 Case III

The police noted a series of car break-ins which took place in a small town near Krakow, in a period of time between January and August 2014. After one such event, a suspect was arrested. Police suspected that a pneumatic gun was used to break the car windshield. As a result of looking through the suspect's flat, such a gun was found (evidence III.1). Police also secured the suspect's clothes (evidence III.2) as well as control glass fragments originating from the car's broken windshield, which were delivered for analysis (evidence III.3). All evidences were delivered to the laboratory in order to establish if there were any glass fragments present on the suspect's clothes or inside the gun barrel. If so, then did they originate from the car's broken windshield – fragments of which were delivered to the laboratory – ( $H_1$ ), or from another glass object ( $H_2$ )?

As a result of examination of the inside of the gun's barrel (evidence III.1), which was performed with the use of a stereomicroscope, six objects resembling glass were revealed. However, in the examination of the suspect's clothes, i.e. T-shirt and shorts (evidence III.2), nine such objects were found. The linear dimension of most of these fragments was in the range of 0.1–0.3 mm or sporadically between 0.5–1.0 mm.

Additionally, in order to perform a comparison, three glass fragments with a linear dimension of around 0.1–1.0 mm were selected from evidence III.3.

Elemental analysis confirmed that all the microtraces revealed on the suspect's clothes as well as ones found inside the gun barrel were glass fragments. The elemental composition established for these objects is presented in Table 3, while the mean elemental composition (expressed in [wt. %]) calculated for the control glass sample is the following: O:  $47.50 \pm 1.45$ , Na:  $9.62 \pm 0.34$ , Mg:  $2.14 \pm 0.06$ , Al:  $0.31 \pm 0.03$ , Si:  $33.85 \pm 1.33$ , Ca:  $5.87 \pm 0.56$ , Fe:  $0.63 \pm 0.07$ .

The likelihood ratio (*LR*) approach was used for interpretation of the obtained results (source level). In the performed calculations, the quantitative elemental composition of glass fragments revealed in evidence III.1 and III.2 (Table 3) was compared with the quantitative elemental composition of control glass fragments (evidence III.3). Based on the performed calculations, it was ascertained that for five out of nine glass fragments revealed on clothes (evidence III.2), the hypothesis ( $H_1$ ) that they share a common origin with glass fragments collected during the examination of the burgled car (evidence III.3) is more likely than the hypothesis that they originate from another glass object ( $H_2$ ). Additionally, using a verbal scale which described the strength of the support, it can be stated that for 3 out of the 5 glass microtraces the strength of support was very strong, while for the remaining two glass fragments the strength of support could be described as strong. In the case of glass fragments revealed inside the gun barrel (evidence III.1), it was determined that for two out of the six glass microtraces, the hypothesis ( $H_1$ ) about them sharing a common origin with control glass fragments (evidence III.3) was also more likely. The obtained *LR* values suggested that the elemental composition of one glass microtrace strongly supports this hypothesis, and that of the second one supports it very strongly.

When interpreting the obtained results on an activity level, the event circumstances as well as the number of glass fragments revealed in this case (see point 2.3) were also taken into account. Revealing as many as 5 glass microtraces on the suspect's clothing – which were established to have probably originated from the car's broken windshield – was sufficient evidence to conclude that the version of the event in which the suspect broke the windshield ( $H_1$ ) is decidedly more supported than the alternative one ( $H_2$ ). In the case of the number of glass microtraces revealed inside the gun barrel, a determinative role was played by the circumstances of the event. Taking into account the location where the glass fragments were deposited (inside the

Table 3

Mean elemental composition determined for glass fragments found inside the gun barrel (evidence III.1) and on the suspect's clothes (evidence III.2) as well as the results of likelihood ratio calculations (LR)

Evidence	Microtrace	Content [wt. %]								LR value
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	
III.1	1	47.62 <sup>a)</sup>	9.41	2.00	0.35	33.79	0.00	6.11	0.62	19,110 <sup>e)</sup>
		0.39 <sup>b)</sup>	0.13	0.07	0.01	0.36	0.00	0.13	0.02	
	2	48.18	9.34	2.03	0.33	33.39	0.00	5.99	0.63	4,203
		1.51	0.32	0.03	0.03	1.25	0.00	0.53	0.08	
	3	48.19	8.95	2.15	0.58	33.96	0.40	5.44	0.33	LR < 1 <sup>d)</sup>
		0.35	0.02	0.05	0.01	0.33	0.03	0.02	0.05	
	4	52.95	9.33	2.19	0.4	30.00	0.00	4.38	0.80	LR < 1
		0.48	0.09	0.01	0.01	0.52	0.00	0.07	0.01	
	5	45.66	8.43	2.09	0.71	36.05	0.44	6.09	0.52	LR < 1
		0.73	0.15	0.02	0.01	0.66	0.01	0.22	0.04	
	6	51.28	9.44	2.19	0.48	31.43	0.20	4.72	0.24	LR < 1
		0.47	0.10	0.02	0.01	0.49	0.01	0.10	0.02	
III.2	1	49.46	9.61	2.05	0.33	32.31	0.00	5.56	0.57	1,806
		1.39	0.24	0.05	0.01	1.08	0.00	0.50	0.10	
	2	49.09	9.63	2.07	0.30	32.58	0.00	5.65	0.59	6,062
		2.16	0.49	0.03	0.01	1.89	0.00	0.74	0.05	
	3	48.87	8.73	0.28	0.87	33.86	0.38	6.95	0.07	LR < 1
		0.43	0.14	0.01	0.02	0.38	0.03	0.17	0.01	
	4	47.95	9.72	2.13	0.34	33.45	0.00	5.72	0.57	36,620
		0.59	0.21	0.07	0.02	0.4	0.00	0.08	0.06	
	5	49.05	9.91	2.09	0.33	32.54	0.00	5.45	0.54	20,540
		0.46	0.04	0.01	0.02	0.37	0.00	0.07	0.03	
	6	55.79	10.67	2.10	0.33	26.85	0.00	3.83	0.36	LR < 1
		0.14	0.06	0.00	0.02	0.10	0.00	0.02	0.02	
	7	46.7	9.39	2.04	0.37	34.44	0.00	6.31	0.67	20,380
		1.14	0.32	0.07	0.01	1.00	0.00	0.46	0.04	
	8	52.98	9.4	1.85	0.8	30.11	0.39	4.23	0.26	LR < 1
		0.13	0.08	0.02	0.01	0.12	0.01	0.01	0.02	
	9	42.43	8.44	1.99	0.33	39.16	0.00	6.91	0.67	LR < 1
		2.85	0.36	0.03	0.02	3.04	0.00	0.14	0.02	

<sup>a)</sup> Mean, <sup>b)</sup> standard deviation, <sup>c)</sup> values of  $LR > 1$  indicate that the elemental composition of a particular glass microtrace more strongly supports the hypothesis that it originates from the same source as the control material, <sup>d)</sup> values of  $LR < 1$  indicate that the elemental composition of a particular glass microtrace more strongly supports the hypothesis that it originates from a source other than the control material.

gun barrel), the long time which elapsed between the event and the collection of the evidence, as well as the fact that the gun was also used after this event (which was established based on case files), the revealing of just two glass microtraces which could have originated from the car's broken windshield was sufficient evidence to conclude that the hypothesis concerning

use of this particular gun for breaking the car windshield ( $H_1$ ) is decidedly more likely than hypothesis ( $H_2$ ) that these microtraces were found inside the gun barrel by chance.

However, a relatively large number of glass microtraces (eight) which were different in elemental composition from the control glass samples were found in-

side the gun barrel as well as on the suspect's clothes. Therefore, additionally, *LR* calculations were carried out for glass fragments for which it was ascertained that they probably originated from other glass objects than control glass fragments (evidence III.3). The calculations were performed in order to determine which category these fragments could have originated from (source level – classification problem). The following hypotheses were considered:

- a)  $H_1$  – the *i*-th glass fragment revealed in evidence III.1 and III.2 originates from the category “car and building windows” (cw);
- b)  $H_2$  – the *i*-th glass fragment revealed in evidence III.1 and III.2 originates from the category “glass containers” (p).

Based on calculated *LR* values (Table 4), it can be concluded that for all evidence glass microtraces which were not congruent with the control glass fragments, the hypothesis that they belong to the category “car and building windows” (cw) was more likely than the hypothesis that they belong to the category “glass containers” (p).

Table 4

*Results of classification of glass fragments found in evidences III.1, III.2.1 and III.2.2 whose elemental composition did not match (Table 3) the elemental composition of control glass fragments (evidence III.3)*

Evidence	Microtrace	<i>LR</i> value	Category
III.1	3	30	cw <sup>a)</sup>
	4	31	cw
	5	5138	cw
	6	5252	cw
III.2	3	491	cw
	6	637	cw
	8	138	cw
	9	1973	cw

<sup>a)</sup> cw – car and building windows.

Taking into account the relatively large number of glass microtraces from this category that were revealed inside the barrel of the gun as well as in debris recovered from the suspect's clothes, it can be concluded (activity level) that these glass fragments originate from, for example, other car windshields which were broken during other break-ins ( $H_1$ ) rather than that they were the effect of environmental contamination, i.e. glass found by chance ( $H_2$ ). However, in order to prove such a statement and link the suspect

with other break-ins, it would be necessary to perform additional analysis involving control glass fragments originating from such windshields, if they were available for analysis.

### 3.4 Case IV

The suspect claimed that he found the unconscious victim with injuries to her head, in a pool of blood and among pieces of broken glass from the window of a door which led from a corridor to a stairway. He immediately called the emergency services and tried to give the victim first aid until the time of their arrival. The police also arrived at the scene of the event. During the preliminary interrogation, the suspect testified that the victim (woman) must have stumbled and fallen from the stairs, smashing the door window. The unconscious woman was transported to the nearest hospital and when she awoke, she testified that she had been beaten by the suspect and had been pushed by him in the direction of the door. As a result of her fall onto the door, the door window broke, causing the injuries to her body. Furthermore, the victim also claimed that the location of the event was different. According to her testimony, she had been beaten by the suspect in the corridor, which was separated from the stairway by the closed door. Owing to discrepancies between the testimonies, the police collected glass pieces found at the scene of the event, i.e. ones lying on the floor (evidence IV.1) and ones still attached to the door's window frame (evidence IV.2). The clothes which the suspect was probably wearing during the event (evidence IV.3–6) were also seized by the police.

All the evidences, as well as case files, were delivered to the laboratory in order to establish – on the activity level – whether the event was an accident or not. Generally speaking, the fact finders wanted to know if the victim fell from the stairway on her own, causing the window of the door to smash ( $H_1$ ) or if somebody else took part in event (e.g. the victim was beaten by the suspect  $H_2$ ).

Analysis of information included in the case files, which related to the victim's injuries, as well as examination of the bloodstain pattern revealed at the scene of the crime, allowed the conclusion that both versions of the event ( $H_1$  and  $H_2$ ) are equally credible. Based on information found in the case files, it was ascertained that the suspect's and the victim's testimonies – concerning the fact that the door linking the corridor and the stairway was closed – were congruous with each other.

Therefore, the experts focused on glass evidence examination. Firstly, the glass fragments were subject-

ed to tool marks examination. All the glass pieces were characterised by a specific pattern (relief), which was seen on one side of the glass fragments, whereas the other side was smooth. Based on the case files, it was established that if the suspect's version recounting the victim's independent fall from the stairs was true ( $H_1$ ), then the door window would have been broken from the pattern side. If the victim's version turned out to be true ( $H_2$ ), i.e., she had fallen on the door from the corridor side, the force which caused the breaking of the glass panel would have been directed onto the smooth side of the window. As a result of "jigsaw fit" analysis, most evidence glass fragments (Figure 5), i.e. those revealed on the floor (evidence IV.1), were matched to control glass fragments (evidence IV.2), i.e. those still attached to the door frame. After "jigsaw fit analysis" it was ascertained that the window was broken as a result of a single blow in the top right part – when looking at the window from the pattern side (Figure 5 – frame) – as well as a result of a few secondary damages (Figure 5 – arrows). In order to establish which side of the window the force was directed onto, the edges of the glass fragments that constituted the original damage were examined using a stereo magnifying glass (Figure 6). Based on analysis of the primary radial damage, it was ascertained that the force was directed onto the smooth side of the window, which on the closed door was situated on the corridor side.

To sum up, as a result of tool mark examinations, it was ascertained that the window broke as a result of a single blow. The force of this blow was directed onto the smooth side of the window (in the top left part), which was situated on the corridor side when the door was closed. These conclusions more strongly supported the victim's version concerning the location in which the event took place ( $H_1$ ) than the suspect's version ( $H_2$ ).

In order to connect the suspect with the event scene, the suspect's clothes, which had been seized one day after the accident, were subjected to physicochemical examination. The aim of the physicochemical examination was to establish if and how many glass microtraces were present on shoes (evidence IV.3), sweatshirt (evidence IV.4), trousers (evidence IV.5) and T-shirt (evidence IV.6) belonging to the suspect. If they were present, then a further aim was to establish if they were similar to control glass fragments (evidence IV.2).

Fifteen objects resembling glass were found (five microtraces collected from each evidence) among debris collected from the suspect's shoes (evidence IV.3), sweatshirt (evidence IV.4), and trousers (evidence IV.5). The linear dimension of most of the re-

vealed microtraces was between 0.3–1.0 mm. Their elemental analysis confirmed that these microtraces were glass (Table 5). In order to perform a comparative analysis, three glass microtraces were collected from one piece of broken window (evidence IV.2). The linear dimension of the microtraces was between 0.1–1.0 mm, and their mean elemental composition was [wt. %] the following: O:  $47.55 \pm 0.72$ , Na:  $10.30 \pm 0.31$ , Mg:  $0.16 \pm 0.02$ , Al:  $0.20 \pm 0.03$ , Si:  $33.92 \pm 0.64$ , and Ca:  $7.83 \pm 0.35$ .

The quantitative elemental composition of glass fragments revealed on the suspect's clothes was compared with the quantitative elemental composition of the control glass originating from the door's broken window, by application of the likelihood ratio test (Table 5). In LR calculations, the following hypotheses were tested:

- a)  $H_1$  – the  $i$ -th glass fragment revealed in evidence IV.3–IV.5 originates from the same glass object as evidence IV.2;
- b)  $H_2$  – the  $i$ -th glass fragment revealed in evidence IV.3–IV.5 does not originate from the same object as evidence IV.2.

Based on the obtained LR results, it was ascertained (source level) that for all fragments revealed on the suspect's clothes and shoes, hypothesis ( $H_1$ ) – about them sharing a common origin with glass pieces originating from the door's broken window (evidence IV.2) – is more likely than the alternative hypothesis ( $H_2$ ). What is more, the obtained LR values indicated that the strength of the support for this hypothesis is very strong.

Taking into account that a relatively large number of glass fragments exhibiting similarity to control glass samples (from the broken window) were revealed on the suspect's clothes and shoes (see point 2.3), it may be suggested (activity level) that a more credible explanation for the mechanism of glass transfer onto the suspect's clothes and shoes was that he took active part in the breaking of the window or was very close during the breaking of the window ( $H_2$ ), than that glass transfer occurred by chance, e.g. during the giving of premedical help to the victim ( $H_1$ ).

Therefore, in this specific case, all collected evidences more strongly support the hypothesis that so-called a third person took part in this event, i.e. the suspect hit the victim ( $H_2$ ), than the hypothesis that the victim's fall was by chance (accident;  $H_1$ ).

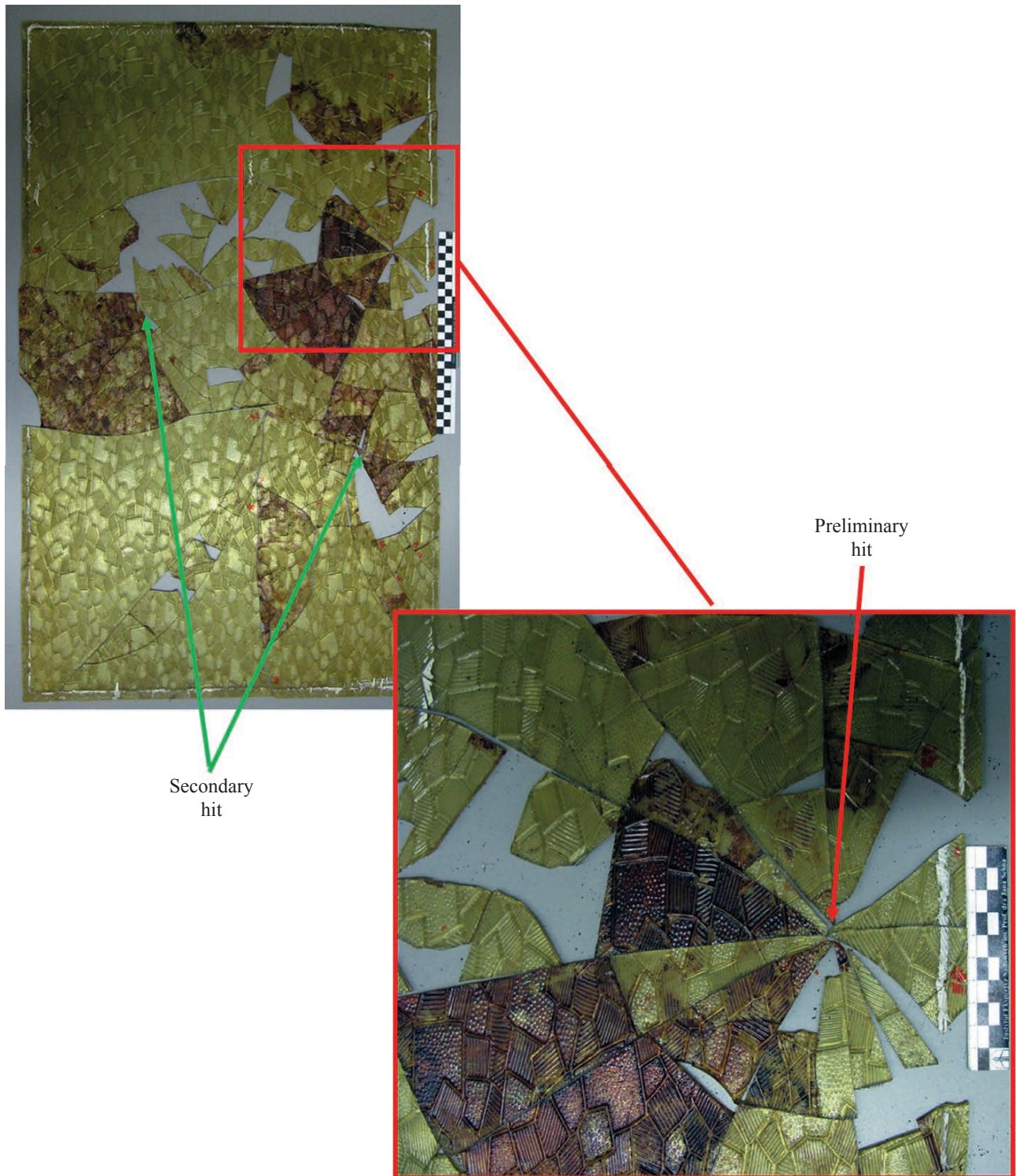


Fig. 5. The door window after reconstruction – using “jigsaw fit” analysis – from glass fragments revealed on the floor and ones visible in the door frame: view from the pattern side of the window. The victim’s blood is seen on the surface of selected glass fragments.

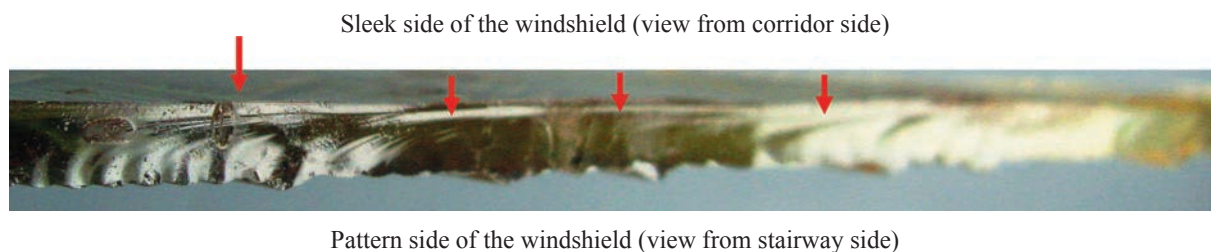


Fig. 6. An example of an edge of primary radial damage to the window. Arrows show the direction of the force's action.

Table 5

Mean elemental composition determined for glass fragments found in debris from the suspect's clothes and shoes (evidences IV.3–IV.5); and results of likelihood ratio calculations (LR)

Evidence	Microtrace	Content [wt. %]						LR value
		O	Na	Mg	Al	Si	Ca	
IV.3	1	47.46 <sup>a)</sup>	9.98	0.13	0.19	34.19	7.98	30,170 <sup>c)</sup>
		0.69 <sup>b)</sup>	0.14	0.04	0.02	0.53	0.24	
	2	44.84	9.37	0.15	0.21	36.22	9.13	1,314
		0.89	0.22	0.02	0.02	0.61	0.45	
	3	46.71	8.85	0.00	1.12	35.05	1.48	19,490
		0.42	0.08	0.00	0.03	0.34	0.04	
	4	45.52	8.45	0.00	1.14	35.94	1.55	1,601
		1.19	0.09	0.00	0.05	0.74	0.09	
	5	47.89	8.99	0.00	1.10	34.16	1.39	55,220
		0.57	0.18	0.00	0.03	0.50	0.03	
IV.4	1	44.97	9.35	0.15	0.20	36.08	9.15	1,109
		0.11	0.14	0.01	0.02	0.17	0.08	
	2	45.78	9.77	0.14	0.19	35.49	8.59	19,200
		0.18	0.04	0.02	0.01	0.08	0.08	
	3	48.79	8.98	0.00	1.11	33.53	1.33	26,130
		0.09	0.07	0.00	0.03	0.05	0.05	
	4	48.68	8.92	0.00	1.08	33.53	1.36	19,600
		1.60	0.31	0.00	0.01	1.15	0.13	
	5	48.30	8.86	0.00	1.08	33.76	1.42	38,890
		1.48	0.37	0.00	0.03	1.16	0.10	
IV.5	1	47.33	10.09	0.16	0.20	34.31	7.87	55,800
		0.21	0.04	0.01	0.01	0.19	0.10	
	2	46.97	10.04	0.16	0.19	34.34	8.15	56,190
		2.32	0.48	0.03	0.03	1.79	0.96	
	3	49.08	9.25	0.00	1.07	33.11	1.33	698,500
		1.24	0.28	0.00	0.03	0.97	0.09	
	4	49.36	9.36	0.00	1.07	32.88	1.30	429,100
		0.84	0.20	0.00	0.03	0.65	0.06	
	5	49.55	9.34	0.00	1.07	32.75	1.29	256,700
		1.50	0.28	0.00	0.04	1.22	0.10	

<sup>a)</sup> Mean, <sup>b)</sup> standard deviation, <sup>c)</sup> value of  $LR > 1$ , indicating that the elemental composition of the particular glass microtrace more strongly supports the hypothesis that it originates from the same source as the control material.

#### 4. Conclusions

In the presented article, the authors show examples of real forensic cases in which evidence in the form of glass fragments required the performance of two types of analysis – tool mark examination (i.e. “jigsaw fit” analysis) and physicochemical analysis (determination of the elemental composition of glass fragments).

In the authors’ opinion, in the presented cases, information obtained from one type of examination would have been insufficient to answer the questions posed by fact finders (whether the bulb was switched on – case I; whether the suspected car was involved in the hit-and-run accident – case II; whether the event was due to beating or an accident – case IV). Only comprehensive analysis of all results concerning both tool marks and physicochemical examination (namely “combined evidence”) interpreted with the use of likelihood ratio models allowed the problems to be solved.

In the authors’ opinion, glass traces constitute important evidence, and the results of their examination can be used in the clarification of an event’s circumstances – despite the fact that in most cases, answers to questions posed by fact finders can only be formulated in terms of probabilities (the expert indicates which of two versions of an event is more strongly supported by the evidence).

#### Acknowledgments

The authors are grateful to Prof. Andrzej Chochół for his valuable comments relating to tool marks examination.

#### References

- Aitken, C. G. G., Lucy, D. (2004). Evaluation of trace evidence in the form of multivariate data. *Applied Statistics*, 53, 109–122.
- Aitken, C. G. G., Lucy, D., Zadora, G., Curran, J. M. (2006). Evaluation of trace evidence for three-level multivariate data with the use of graphical models. *Computational Statistics and Data Analysis*, 50, 2571–2588.
- Aitken, C. G. G., Roberts, P., Jackson, G. (2012). *Fundamentals of probability and statistical evidence in criminal proceedings. guidance for judges, lawyers, forensic scientists and expert witnesses. Practitioner guide No. 1*. Royal Statistical Society.
- Aitken, C. G. G., Taroni, F. (2004). *Statistics and the evaluation of evidence for forensic scientists*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Aitken, C. G. G., Zadora, G., Lucy, D. (2007). A two-level model for evidence evaluation. *Journal of Forensic Sciences*, 52, 412–419.
- Baldwin, D., Birkett, J., Facey, O., Rabey, G. (2013). *The forensic examination and interpretation of toolmarks*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Baudoin, P., Lavabre, R. (1996). A particular case of oxidation colors on bulb filament after a car crash. *Journal of Forensic Sciences*, 41, 304–309.
- Curran, J. M., Hicks, T. N., Buckleton, J. S. (2000). *Forensic interpretation of glass evidence*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- ENFSI guideline for evaluative reporting in Forensic Science 2015 Project supported by the Prevention of and Fight against Crime Programme of the European Union European Commission – Directorate-General Justice, Freedom and Security, EU ISEC 2010, Agreement number (2010). HOME/2010/ISEC/MO/4000001759.
- Evetts, I., Jackson, G., Lambert, J., McCrossan, S. (2000). The impact of the principles of evidence interpretation on the structure and content of statements. *Science & Justice*, 40(4), 233–239.
- Goebel, R. (1975). Examination of incandescent bulbs of motor vehicles after road accidents. *Scanning Electron Microscopy, II*, 547–554.
- Jackson, G., Aitken, C. G. G., Roberts, P. (2014). *Case assessment and interpretation of expert evidence. guidance for judges, lawyers, forensic scientists and expert witnesses. Practitioner Guide No. 4*. Royal Statistical Society.
- Neocleous, T., Aitken, C. G. G., Zadora, G. (2011). Transformations for compositional data with zeros with an application to forensic evidence evaluation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 109, 77–85.
- Ramos, D., Gonzalez-Rodriguez, J., Zadora, G., Aitken, C. G. G. (2013). Information-theoretical assessment of the performance of likelihood ratio computation methods. *Journal of Forensic Sciences*, 6, 1503–1518.
- Ramos, D., Zadora, G. (2011). Information-theoretical feature selection using data obtained by Scanning Electron Microscopy coupled with and Energy Dispersive X-ray spectrometer for the classification of glass traces. *Analytica Chimica Acta*, 705, 207–217.
- The R Foundation for Statistical Computing. (2014). Version 3.0.2. (Website) [www.r-project.org](http://www.r-project.org).
- Puch-Solis, R., Roberts, P., Pope, S., Aitken, C. G. G. (2012). *Assessing the probative value of DNA evidence. Guidance for judges, lawyers, forensic scientists and expert witnesses. Practitioner guide No. 2*. Royal Statistical Society.
- Roberts, P., Aitken, C. G. G. (2013). *The logic of forensic proof: Inferential reasoning in criminal evidence and forensic science. Guidance for judges, lawyers, forensic scientists and expert witnesses. Practitioner guide No. 3*. Royal Statistical Society.

19. Zadora, G., Brożek-Mucha, Z. (2002). Badania mikrookruszków szklanych. (In) P. Kościelniak, W. Piekoszewski (eds), *Chemia sądowa* (pp. 267–280). Kraków: Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
20. Zadora, G. (2009). Classification of glass fragments based on elemental composition and refractive index. *Journal of Forensic Sciences*, 54, 49–59.
21. Zadora, G. (2007). Glass analysis for forensic purposes – a comparison of classification methods. *Journal of Chemometrics*, 21, 174–186.
22. Zadora, G., Brożek-Mucha, Z. (2003). SEM-EDX – a useful tool for forensic examinations. *Material Chemistry and Physics*, 81, 345–348.
23. Zadora, G., Martyna, A., Ramos, D., Aitken, C. (2014). *Statistical analysis in forensic science evidential values of multivariate physicochemical data*. Chichester: John Wiley & Sons.
24. Zadora, G., Ramos, D. (2010). Evaluation of glass samples for forensic purposes – an application of likelihood ratio model and information-theoretical approach. *Chemometrics and Intelligent Laboratory*, 102, 63–83.
25. Zadora, G., Neocleous, T. (2010). Evidential value of physicochemical data – comparison of methods of glass database creation. *Journal of Chemometrics*, 24, 367–378.
26. Zadora, G., Neocleous T. (2009). Likelihood ratio model for classification of forensic evidences. *Analytical Chimica Acta*, 64, 266–278.
27. Zadora, G., Neocleous, T., Aitken, C. G. G. (2010). A two-level model for evidence evaluation in the presence of zeros. *Journal of Forensic Sciences*, 55, 371–384.
28. Zadora, G., Wilk D. (2009). Evaluation of evidence value of refractive index measured before and after annealing for container and float glass fragments. *Problems of Forensic Sciences*, 78, 365–385.

---

**Corresponding author**

Aleksandra Michalska  
Instytut Ekspertyz Sądowych  
ul. Westerplatte 9  
PL 31-033 Kraków  
e-mail: amichalska@ies.gov.pl

---



## FRAGMENTY SZKŁA JAKO ISTOTNY ŚLAD KRYMINALISTYCZNY – STUDIUM PRZYPADKÓW

### 1. Wstęp

Szkło stanowi istotny ślad dowodowy w wielu przestępstwach takich, jak wypadki komunikacyjne, rozboje, bójki czy włamania (Curran, Hicks, Buckleton, 2000). Badania szkła prowadzone dla potrzeb wymiaru sprawiedliwości bądź organów ścigania polegają zwykle na ustaleniu, z jakiej kategorii użytkowej pochodzą fragmenty szkła, tj. czy jest to szkło opakowaniowe, czy szkło szyb samochodowych (problem klasyfikacyjny) lub udzieleniu odpowiedzi na pytanie, czy fragmenty szkła dowodowego i porównawczego mogą pochodzić z tego samego obiektu (problem porównawczy; Aitken, Taroni, 2004; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014). Sposób, w jaki odłamki szkła poddawane są analizie, w dużej mierze zależy od ich wielkości (Curran, Hicks, Buckleton, 2000). W przypadku, gdy przedmiot badań stanowią duże kawałki szkła (np. fragmenty rozbitych reflektorów samochodowych, kawałki szyb okiennych), to w pierwszej kolejności poddawane są one badaniom mechanoskopijnym, które obejmują między innymi tzw. „złożenie na całość”. Biegły z zakresu mechanoskopii dopasowuje fragmenty szkła dowodowego do fragmentów szkła porównawczego i ustala, czy przed rozbiciem mogły stanowić jeden przedmiot. Pozytywny wynik „złożenia na całość” prowadzi do indywidualnej identyfikacji obiektu, a biegły formułuje wnioski kategoryczne. W tego typu sprawach odstępuje się od badań fizykochemicznych, które pozwalają jedynie na identyfikację grupową, a więc formułowanie wniosków w kontekście prawdopodobieństwa. Innym aspektem badań mechanoskopijnych jest porównanie cech morfologicznych szkła (np. barwy, grubości, ukształtowania powierzchni), które niejednokrotnie dostarczają użytecznej informacji do rozwiązania problemu porównawczego bądź klasyfikacyjnego, przy czym pozwalają jedynie na identyfikację grupową (Baldwin i in., 2013).

W większości przypadków rozbicie przedmiotu lub tafli wykonanej ze szkła prowadzi do powstania wielu małych fragmentów o rozmiarze liniowym między 0,1 a 0,5 mm (Zadora, Brożek-Mucha, 2002). Tego typu mikroślady mogą zostać przeniesione na odzież, włosy lub obuwie osób znajdujących się na miejscu zdarzenia. Okruchy szklane mogą być ujawnione po wielu godzinach a nawet dniach od zdarzenia, choć prawdopodobieństwo ich ujawnienia gwałtownie maleje z czasem w skutek używania przedmiotu, odzieży, na których okruchy te uległy zatrzymaniu. Takie odłamki szkła zabezpieczone z odzieży, przedmiotów bądź z miejsca zdarzenia są zbyt małe, aby możliwa była ich indywiduali-

zacja na podstawie badań mechanoskopijnych. Stąd niezbędne jest przeprowadzenie badań fizykochemicznych. Tego typu analizy przeprowadza się również dla dużych fragmentów szkła, dla których badania mechanoskopijne są niewystarczające (np. brak możliwości dopasowania do siebie poszczególnych fragmentów szkła; Zadora, Brożek-Mucha, 2002).

Do fizykochemicznych metod badania okruchów szkła stosowanych do celów sądowych należą m.in. ustalenie składu pierwiastkowego szkła przy wykorzystaniu np. skaningowego mikroskopu elektronowego sprzężonego z detektorem promieniowania rentgenowskiego (Scanning Electron Microscope coupled with Energy Dispersive X-ray Spectrometer – SEM-EDX; Curran, Hicks, Buckleton, 2000; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014), bądź wyznaczanie współczynnika załamania światła szkła metodą termoimersyjną (np. Glass Refractive Index Measurement – GRIM; Curran, Hicks, Buckleton, 2000; Zadora, Wilk, 2009; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014). Uzyskane wyniki interpretuje się, stosując metody statystyczne, np. iloraz wiarygodności (ang. likelihood ratio; *LR*). Testy *LR* pozwalają uwzględnić rolę biegłego sądowego w ocenie danych uzyskanych np. podczas analiz fizykochemicznych próbek szkła w kontekście dwóch przeciwstawnych hipotez – hipotezy prokuratora oraz hipotezy obrony. Podczas obliczeń biegły uwzględnił wszystkie istotne informacje z punktu widzenia nauk sądowych, takie jak zmienność międzyobiekto-*wa*, zmienność wewnątrzobiekto-*wa*, a także częstość występowania danej cechy w populacji generalnej. Uzyskane wartości *LR* pozwalają ocenić, która z hipotez jest bardziej wsparta przez dowód, przy czym modele *LR* mogą być zastosowane zarówno do rozwiązania problemu klasyfikacyjnego bądź porównawczego (Aitken, Taroni, 2004; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014).

W pracy przedstawiono przykłady ekspertyz, w których przedmiotem badań były duże fragmenty szkła (badania mechanoskopijne), ale też okruchy szklane (analiza fizykochemiczna oparta na ustaleniu składu pierwiastkowego uzyskanego metodą SEM-EDX), a także przykłady ekspertyz, w których do wydania opinii konieczne było jednocześnie uwzględnienie informacji uzyskanych zarówno z badań z zakresu mechanoskopii, jak i z zakresu badań fizykochemicznych.

## 2. Materiały i metody

### 2.1 Oględziny

Oględziny dużych fragmentów szkła dokonywano w świetle białym. Natomiast, gdy konieczne było wykonanie bardziej szczegółowych badań (np. ustalenie kierunku działania siły na tafłę szklaną), wykorzystywano lupę stereoskopową SMZ 2T firmy Nikon (Japonia) lub mikroskop porównawczy FSC firmy Leica (Niemcy) sprzężony z kamerą Leica DFC 490.

W sprawach wymagających ujawnienia mikrookruczków szkła, dowody rzeczowe, np. odzież, szczotkowano nad arkuszem szarego i gładkiego papieru. Uzyskany w ten sposób materiał umieszczano w plastikowych szalkach Petriego, który następnie analizowano w świetle mikroskopu stereoskopowego MZ 16 firmy Leica. Ujawnione w otrzepinach fragmenty przypominające szkło przenoszono za pomocą igły preparacyjnej na powierzchnię samoprzylepnego krążka węglowego umieszczonego na aluminiowym stoliku mikroskopowym.

Powierzchnię stolika napyłano warstwą węgla w pylarce SCD-50 firmy Bal-Tech (Szwajcaria). Tak przygotowaną próbkę umieszczano w komorze skaningowego mikroskopu elektronowego JSM-6610LV firmy Jeol (Japonia) sprzężonego ze spektrometrem promieniowania rentgenowskiego Inca Energy firmy Oxford Instruments Ltd. (Wielka Brytania).

### 2.2 Analiza składu pierwiastkowego metodą SEM-EDX

Analizę składu pierwiastkowego okruczków szkła prowadzono z wykorzystaniem aparatury SEM-EDX, stosując następujące warunki pomiarowe: napięcie przyspieszające 20 kV, czas zliczania 50 s, powiększenie między 1000 a 5000 $\times$ , pierwiastek kalibracyjny – kobalt, a biblioteka profili pierwiastków została dostarczona przez producenta. Każdy okruczek analizowano w trzech różnych miejscach. W pierwszej opisanej sprawie (przypadek I) zbierano informacje o jakościowym i ilościowym składzie dotyczącym wszystkich pierwiastków obecnych w próbce. W pozostałych przypadkach (sprawy II–IV), gdzie uzyskane wyniki interpretowano, stosując testy ilorazu wiarygodności, analizowano informacje dotyczące ilościowej zawartości pierwiastków takich, jak: O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe (wyrażonej w [%] wag.). Informacje te wykorzystano do utworzenia siedmiu nowych zmiennych zdefiniowanych jako  $\log_{10}$  ze stosunku zawartości danego pierwiastka do zawartości tlenu (Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014). Ponadto przed wykonaniem analizy pierwiastkowej określano rozmiar liniowy badanego mikrookruczku szkła, analizując jego obraz uzyskany za pomocą metody SEM.

### 2.3 Interpretacja danych fizykochemicznych

Dane dotyczące składu pierwiastkowego okruczków szkła uzyskane metodą SEM-EDX interpretowano, stosując testy ilorazu wiarygodności (przypadek II–IV; Aitken, Lucy, 2004; Aitken, Lucy, Zadora, Curran, 2006; Aitken, Zadora, Lucy, 2007; Neocleous, Aitken, Zadora 2009; Ramos, Gonzalez-Rodriguez, Zadora, Aitken, 2013; Ramos, Zadora, 2011; Zadora, 2011; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014; Zadora, Ramos, 2010; Zadora, Neocleous, 2009; Zadora, Neocleous, 2010; Zadora, Neocleous, Aitken, 2010). Testy te pozwalają ocenić, czy dostarczony do badań dowód ( $E$  – w tym wypadku skład pierwiastkowy wyznaczony dla danego okruczku szkła) bardziej wspiera wersję prokuratora ( $H_1$ ; tzw. hipoteza prokuratora) czy wersję obrony ( $H_2$ ; tzw. hipoteza obrony). Metoda polega na ustaleniu prawdopodobieństw warunkowych –  $Pr(E|H_1)$  i  $Pr(E|H_2)$  oraz oszacowaniu wartości ilorazu wiarygodności (LR) wyrażonego wzorem:

$$LR = \frac{Pr(E|H_1)}{Pr(E|H_2)}. \quad (1)$$

Iloraz wiarygodności interpretuje się następująco: gdy jego wartość jest większa od 1, to dowód  $E$  wspiera hipotezę  $H_1$ , a gdy jego wartość jest mniejsza od 1, to wspiera hipotezę  $H_2$ . W interpretacji stosuje się też prostą zależność, że im większa od 1 (mniejsza od 1) wartość  $LR$ , tym mocniejsze wsparcie dla hipotezy  $H_1$  ( $H_2$ ). Aby odzwierciedlić siłę wsparcia przy formułowaniu wniosków, biegły może posłużyć się dodatkowo skalą werbalną będącą odpowiednikiem uzyskanych wartości  $LR$  (Evet, Jackson, Lambert, McCrossan, 2000; ENFSI 2015). W przypadku, gdy dowód bardziej wpiera wersję prokuratora ( $H_1$ ), odpowiedniki werbalne przedstawiają się następująco:

- a)  $1 < LR \leq 10$  słabe wsparcie (ang. slight/limited support);
- b)  $10 < LR \leq 100$  umiarkowane wsparcie (ang. moderate support);
- c)  $100 < LR \leq 1000$  umiarkowanie silne wsparcie (ang. moderately strong support);
- d)  $1000 < LR \leq 10\,000$  mocne wsparcie (ang. strong support);
- e)  $LR > 10\,000$  bardzo mocne wsparcie (ang. very strong support).

W przypadku, gdy uzyskane wartości  $LR$  są poniżej jedności, biegły stosuje tę samą skalę werbalną, a siła wsparcia dotyczy wersji obrony ( $H_2$ ). Przykładowo, uzyskanie wartości  $LR$  równej 0,001 oznacza, iż dowód 1000 razy bardziej wspiera wersję obrony, co w skali werbalnej odpowiada umiarkowanej silne wsparcie dla tej hipotezy.

W prezentowanych sprawach podczas rozwiązywania problemu klasyfikacyjnego rozpatrywano następujące hipotezy:

- a)  $H_1$  – analizowana próbka pochodzi z kategorii szkło z szyb samochodowych lub okiennych;
- b)  $H_2$  – analizowana próbka pochodzi z kategorii szkło z opakowań szklanych, tj. innej, najczęściej spotykanej kategorii użytkowej znajdującej się w otoczeniu człowieka, a tym samym najczęściej ujawnianej na miejscu zdarzenia.

Natomiast podczas rozwiązywania problemu porównawczego testowano hipotezy:

- a)  $H_1$  – porównywane próbki pochodzą z tego samego obiektu;
- b)  $H_2$  – porównywane próbki pochodzą z różnych obiektów.

Interpretacja danych w zakresie problemu porównawczego i klasyfikacyjnego to interpretacja na tzw. poziomie źródła. Niemniej jednak zleceniodawcy, pytając np. o obecność na ciele, odzieży czy obuwiu podejrzanego konkretnych mikrośladów, chcą wiedzieć nie tylko, z jakiej kategorii użytkowej one pochodzą lub czy pochodzą one z tego samego obiektu co próbka porównawcza, ale również chcą ustalić, jakiego rodzaju aktywność doprowadziła do tego, że fragmenty te znalazły się na ciele, odzieży i obuwiu podejrzanego. W takim przypadku mamy do czynienia z interpretacją danych na tzw. poziomie aktywności (uwzględniającym liczbę okruchów, a co za tym idzie, takie zagadnienia, jak przeniesienie pierwotne, wtórne czy kontaminację środowiskową). W przypadku interpretacji danych na poziomie aktywności rozważa się np. takie dwie hipotezy:

- a)  $H_1$  – podejrzany brał udział w zdarzeniu (np. stłukł szybę w samochodzie);
- b)  $H_2$  – podejrzany nie brał udziału w tym zdarzeniu (np. niewielka ilość okruchów obecna na odzieży jest wynikiem kontaminacji).

Niemniej jednak nawet bez prowadzenia obliczeń *LR a priori* można stwierdzić, iż ujawnienie przynajmniej 3 okruchów szkła w materiale dowodowym (Curran, Hicks, Buckleton, 2000) wykazujących wspólne pochodzenie ze szkłem porównawczym jest wystarczającym dowodem, iż podejrzany brał udział w zdarzeniu. Natomiast niewielka liczba okruchów (mniej niż 3; Curran, Hicks, Buckleton, 2000) nie wspiera żadnej z hipotez, bowiem obecność mniejszej liczby fragmentów szkła może być efektem kontaminacji (przypadkowego ich przeniesienia na badany dowód).

Więcej informacji dotyczących sposobu przygotowania danych do obliczeń *LR* oraz stosowanych obecnie modeli *LR* można znaleźć w literaturze przedmiotu (Aitken, Taroni, 2004; ENFSI 2015; Jackson, Aitken, Roberts, 2014; Puch-Solis, Roberts, Pope, Aitken, 2012; Roberts, Aitken, 2013; Roberts, Jackson, 2012; Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014).

## 2.4 Oprogramowanie

Obliczenia ilorazu wiarygodności wykonano w programie R (The R Foundation for Statistical Computing, 2014), korzystając z funkcji opracowanych przez jednego z autorów (Zadora, Martyna, Ramos, Aitken, 2014).

## 3. Analiza przypadków

### 3.1 Przypadek I

W listopadzie, po zmroku, doszło do zderzenia dwóch pojazdów. Kierowca samochodu A, który uderzył w samochód B zeznał, iż nie zauważył samochodu B, gdyż ten nie miał włączonych świateł. Jednakże kierowca samochodu B temu zaprzeczył. W związku z rozbieżnością zeznań uczestników zdarzenia policja zabezpieczyła żarówkę halogenową z rozbitego reflektora samochodu B (dowód I.1) i przekazała ją do laboratorium celem ustalenia, czy podczas zderzenia samochód B miał włączone światła ( $H_1$ ) czy też nie ( $H_2$ ).

Wnioskowanie na temat świecenia, bądź też nieświecenia się żarówek w chwili kolizji pojazdów uzależnione jest od tego, czy bańka szklana żarówki uległa rozbiciu podczas zderzenia (Baudoin, Lavabre, 1996). W sytuacji, gdy podczas wypadku nie dochodzi do rozbicia bańki szklanej, biegły z zakresu mechanoskopii bada ewentualne deformacje żarnika, prowadzi obserwacje końcówek żarnika, bądź też poszukuje nalotu na wewnętrznej stronie bańki szklanej (Baudoin, Lavabre, 1996). W sytuacji, gdy podczas wypadku bańka szklana ulegnie rozbiciu, biegły koncentruje się m.in. na poszukiwaniu nalotu na powierzchni żarnika, który może powstać na skutek reakcji między rozgrzanym włóknem żarnikowym a tlenem zawartym w powietrzu. Gdy żarnik wykonany jest z wolframu, to obecność żółtego ( $WO_3$ ), ciemnoniebieskiego ( $WO_{2,9}$ ), fioletowego ( $WO_{2,72}$ ) lub brązowego nalotu ( $WO_2$ ; Goebel, 1975) świadczy o tym, że żarówka w chwili kolizji prawdopodobnie świeciła się ( $H_1$ ). Zdarza się też, że podczas rozbicia bańki szklanej niewielkie fragmenty szkła mają kontakt z jeszcze rozgrzanym włóknem żarnika i wówczas przytapiają się do jego powierzchni. Ujawnienie takiego przytopionego okruchu bądź stopionego szkła (Baudoin, Lavabre, 1996) potwierdza fakt, że żarnik był rozgrzany i żarówka najprawdopodobniej świeciła się ( $H_1$ ).

Dostarczoną do badań żarówkę halogenową poddano oględzinom w świetle białym z wykorzystaniem lupy stereoskopowej i ustalono, że szklana bańka żarówki jest rozbita, a jej metalowe elementy, m.in. oprawka, żarnik i drut kontaktowy, są powyginane i uszkodzone. Podczas badań mechanoskopijnych prowadzonych z wykorzystaniem mikroskopu porównawczego nie ujawniono na powierzchni żarnika barwnego nalotu mogącego świad-

czyć o obecności tlenków, np. wolframu. Ujawniono natomiast pojedynczy obiekt o rozmiarze około 1 mm, wyglądem przypominającym szkło, przytopiony do drutu kontaktowego żarówki (okruch oznaczony numerem 1 na rysunku 1).

Ujawniony fragment o wyglądzie szkła, jak również cały żarnik, przekazano do badań fizykochemicznych w celu ich identyfikacji. W wyniku analizy pierwiastkowej czystej powierzchni żarnika ustalono, iż jest on wykonany z wolframu. Dodatkowo na podstawie obserwacji żarnika (rysunek 2) w licznych jego miejscach ujawniono obecność ciała stałego wyglądem przypominającego stopione szkło. Analiza składu pierwiastkowego dwóch z tych miejsc, jak i niewielkiego fragmentu przytopionego do drutu kontaktowego żarówki (okruch 1) potwierdziła, iż jest to szkło (tabela 1) o właściwościach fizykochemicznych wymaganych dla szkła stosowanego m.in. w produkcji żarówek, o czym świadczy stosunkowo duża zawartość potasu i baru.

Tym samym na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że obecność pojedynczego okruchu, jak również stopionych fragmentów szkła ujawnionych na powierzchni żarnika, bardzo mocno wspiera hipotezę, że samochód miał włączone światła w chwili kolizji ( $H_1$ ).

Należy nadmienić, że brak widocznego gołym okiem nalotu charakterystycznego dla tlenków wolframu na powierzchni żarnika w tym konkretnym przypadku nie jest dowodem na to, że żarówka nie świeciła się w czasie zdarzenia, bowiem tlenki występujące zazwyczaj w niewielkiej ilości mogły zostać utracone na skutek wyjmowania uszkodzonych żarówek z gniazd czy też w trakcie ich pakowania i transportu.

### 3.2 Przypadek II

W lipcu na lokalnej, słabo oświetlonej drodze doszło do śmiertelnego potrącenia rowerzysty, a sprawca wypadku uciekł z miejsca zdarzenia. Na miejscu wypadku policja zabezpieczyła dwadzieścia sześć fragmentów bezbarwnego szkła (dowód II.1). Do badań zabezpieczono również odzież ofiary, tj. spodnie (dowód II.2) i bluzę (dowód II.3). W toku śledztwa policja zatrzymała samochód marki X, którym, według ustaleń prowadzących postępowanie, prawdopodobnie potrącono ofiarę. Podczas jego oględzin ustalono, że ma on uszkodzony prawy, przedni reflektor, z którego, jako materiał porównawczy, zabezpieczono trzy fragmenty szkła (dowód II.4). Wszystkie dowody przekazano do laboratorium celem ustalenia, czy:

1. Zabezpieczone na miejscu zdarzenia odłamki szkła stanowiły przed oddzieleniem jedną całość z odławkami szkła zabezpieczonymi podczas oględzin z prawego przedniego reflektora samochodu marki X ( $H_1$ ), czy też pochodzą one z innego obiektu ( $H_2$ )?

2. Czy na odzieży ofiary znajdują się mikroślady w postaci okruchów szkła, a jeśli tak, to czy mogą one pochodzić z reflektora samochodu marki X ( $H_1$ ), czy też pochodzą z innego obiektu ( $H_2$ )?

Duże fragmenty szkła przeznaczone do badań mechanoskopijnych poddano oględzinom przy wykorzystaniu lupy stereoskopowej i stwierdzono, że część odłamków (dowód II.1) posiada relief, tj. charakterystyczne ukształtowanie powierzchni dla reflektora, a na części z nich ujawniono oznaczenie literowo-cyfrowe. Następnie podjęto próbę złożenia fragmentów szkła dowodowego (dowód II.1) z fragmentami szkła porównawczego (dowód II.4) w jedną całość. Dopasowano jeden, najmniejszy fragment szkła porównawczego (dowód II.4) do jednego z kawałków szkła dowodowego (oznaczony jako dowód II.1.1) i stwierdzono, że ich brzegi ściśle przylegają i wzajemnie się uzupełniają, co zilustrowano na rysunku 3. Dodatkowo dla dopasowanych fragmentów szkieł przeprowadzono oględziny ich krawędzi w miejscu przylegania, wykorzystując mikroskop porównawczy. Stwierdzono, że przebieg rys powstałych podczas łamania się szkła jest zgodny (rysunek 4).

Biegłemu z zakresu mechanoskopii udało się również dopasować do siebie 3 z 26 fragmentów szkła ujawnionych na miejscu zdarzenia (oznaczone jako dowód II.1.2–II.1.4). W wyniku tej operacji na złożonym fragmencie odczytano oznaczenie literowo-cyfrowe, na podstawie którego stwierdzono, że tego typu reflektory są sprzedawane jedynie dla samochodów marki X. Próba dopasowania złożonego fragmentu reflektora z naniesionymi oznaczeniami (kawałki szkła ujawnione na miejscu zdarzenia) do fragmentów szkła porównawczego nie była jednak możliwa. W związku z tym przeprowadzono badania fizykochemiczne, aby ustalić, czy złożone fragmenty szkła reflektora z oznaczeniem literowo-cyfrowym mogą pochodzić z tego samego obiektu, co materiał porównawczy.

W tym celu z dopasowanych fragmentów szkła dowodowego ujawnionego na miejscu zdarzenia (dowód II.1.2–II.1.4) oraz z fragmentów szkła porównawczego (dowód II.4) pobrano po trzy okruchy o rozmiarze liniowym w zakresie 0,1–1,0 mm i wyznaczono dla nich ilościowy skład pierwiastkowy. Uzyskane wyniki (tabela 2) porównano, stosując model ilorazu wiarygodności (interpretacja na poziomie źródła), którym testowano następujące hipotezy:

- a)  $H_1$  – fragmenty szkła z oznaczeniem literowo-cyfrowym ujawnione na miejscu zdarzenia oznaczone jako dowód II.1.2–II.1.4 pochodzą z tego samego obiektu co fragmenty szkła porównawczego – dowód II.4;
- b)  $H_2$  – fragmenty szkła z oznaczeniem literowo-cyfrowym ujawnione na miejscu zdarzenia oznaczone jako dowód II.1.2–II.1.4 nie pochodzą z tego samego obiektu co fragmenty szkła porównawczego – dowód II.4.

Na podstawie wykonanych obliczeń ilorazu wiarygodności (tabela 2) ustalono, że dla dopasowanych do siebie fragmentów szkła, na których widoczne było oznaczenie literowo-cyfrowe (dowody II.1.2–II.1.4) bardziej prawdopodobna jest hipoteza  $H_1$ , że pochodzą one z tego samego obiektu, co fragmenty szkła zabezpieczone w trakcie oględzin samochodu marki X (dowód II.4) niż hipoteza, że pochodzą one z innego obiektu szklanego ( $H_2$ ). Dodatkowo można stwierdzić, iż siła wsparcia dla hipotezy o wspólnym pochodzeniu tych fragmentów szkła jest bardzo mocna ( $LR \gg 10\,000$ ).

Przedmiotem badań fizykochemicznych były również fragmenty szkła ujawnione w otrzepinach z odzieży ofiary (dowody II.2 i II.3) – łącznie 6 okruchów, w tym cztery ujawnione w otrzepinach ze spodni (dowodu II.2) oraz dwa w otrzepinach z bluzy ofiary (dowodu II.3). Ich rozmiar liniowy mieścił się w zakresie między 0,1 a 1,2 mm. Wyniki dotyczące ilościowego składu pierwiastkowego uzyskane dla tych okruchów (tabela 2) a zinterpretowane w oparciu o test ilorazu wiarygodności dowodzą, że dla pięciu z sześciu fragmentów szkła ujawnionych na odzieży ofiary (dowód II.2 i II.3) bardziej prawdopodobna jest hipoteza, że pochodzą one z tego samego obiektu, co fragmenty szkła zabezpieczone z samochodu marki X ( $H_1$ ) niż hipoteza ( $H_2$ ), że pochodzą one z innego obiektu szklanego, przy czym siła wsparcia dla hipotezy  $H_1$  jest bardzo mocna.

Wyniki badań mechanoskopijnych oraz fizykochemicznych dotyczące badanych próbek szkła a interpretowane na poziomie aktywności pozwalają stwierdzić, iż zdecydowanie bardziej prawdopodobna jest hipoteza, że samochód, z którego zabezpieczono fragmenty rozbitego reflektora brał udział w zdarzeniu ( $H_1$ ), niż że nie brał on udziału tym w zdarzeniu ( $H_2$ ), a wsparcie dla hipotezy  $H_1$  można określić jako bardzo mocne.

### 3.3 Przypadek III

W okresie od stycznia do sierpnia 2014 roku w malej miejscowości w pobliżu Krakowa policja zanotowała serie włamań do samochodów. Po jednym z tego typu zdarzeń udało się zatrzymać podejrzanego. W toku śledztwa ustalono, iż do rozbicia szyby samochodowej sprawcy mógł posłużyć pistolet pneumatyczny. W wyniku przeszukania mieszkania podejrzanego zabezpieczono pistolet i przesłano go do badań (dowód III.1). Policja zabezpieczyła również odzież podejrzanego (dowód III.2) oraz fragmenty szkła z rozbitej szyby samochodu (dowód III.3). Materiały te przesłano do laboratorium w celu ustalenia, czy na odzieży zabezpieczonej od podejrzanego oraz na pistolecie pneumatycznym znajdują się fragmenty szkła, a jeżeli tak, to czy pochodzą one z szyby samochodowej, której fragmenty przesłano do badań jako materiał porównawczy ( $H_1$ ), czy też fragmenty te pochodzą z innego obiektu szklanego ( $H_2$ ).

W wyniku oględzin wylotu lufy pistoletu pneumatycznego (dowód III.1) prowadzonych w świetle mikroskopu stereoskopowego ujawniono sześć fragmentów przypominających szkło. Natomiast w wyniku oględzin odzieży podejrzanego (dowód III.2), w skład której wchodziła koszula i krótkie spodenki, ujawniono dziewięć okruchów wyglądem przypominających szkło. Liniowy rozmiar większości ujawnionych okruchów mieścił się w przedziale 0,1–0,3 mm lub sporadycznie w przedziale 0,5–1,0 mm. W celu wykonania badań porównawczych z dowodu III.3 pobrano trzy okruchy szkła o rozmiarze liniowym około 0,1–1,0 mm.

W wyniku analizy pierwiastkowej stwierdzono, że wszystkie okruchy ujawnione na odzieży i we wnętrzu lufy były szkłem. Skład pierwiastkowy wyznaczony dla tych okruchów zamieszczono w tabeli 3, a uśredniony skład pierwiastkowy dla szkła porównawczego wyrażony w [% wag.] przedstawiał się następująco: O:  $47,50 \pm 1,45$ , Na:  $9,62 \pm 0,34$ , Mg:  $2,14 \pm 0,06$ , Al:  $0,31 \pm 0,03$ , Si:  $33,85 \pm 1,33$ , Ca:  $5,87 \pm 0,56$ , Fe:  $0,63 \pm 0,07$ .

Do interpretacji uzyskanych wyników (poziom źródła) zastosowano obliczenia ilorazu wiarygodności ( $LR$ ), w trakcie których porównano ilościowy skład pierwiastkowy fragmentów szkła ujawnionych w dowodach III.1 i III.2 (tabela 3) z fragmentami szkła porównawczego (dowód III.3). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że dla pięciu z dziewięciu okruchów szkła ujawnionych na odzieży (dowód III.2) bardziej prawdopodobna jest hipoteza, że pochodzą one z tego samego obiektu, co fragmenty szkła zabezpieczone podczas oględzin pojazdu (dowód III.3), do którego się włamało ( $H_1$ ), niż hipoteza, że pochodzą one z innych obiektów szklanych ( $H_2$ ). Dodatkowo, posługując się skalą werbalną określającą siłę wsparcia danej hipotezy, można stwierdzić, iż 3 z 5 okruchów bardzo mocno wspierają hipotezę  $H_1$ , natomiast pozostałe 2 wspierają tę hipotezę w stopniu, który określić można jako mocny. W przypadku analizy okruchów szkła ujawnionych w lufie pistoletu (dowód III.1) ustalono, iż dla dwóch z sześciu fragmentów również bardziej prawdopodobna jest hipoteza ( $H_1$ ), że pochodzą one z tego samego obiektu, co fragmenty szkła zabezpieczone podczas oględzin tego pojazdu (dowód III.3), przy czym otrzymane wartości  $LR$  sugerują, iż jeden z okruchów wspiera tę hipotezę mocno, a drugi bardzo mocno.

Interpretując uzyskane wyniki na poziomie aktywności, wzięto pod uwagę dodatkowo okoliczności zdarzenia, a także liczbę okruchów ujawnionych w sprawie (patrz punkt. 2.3). Ujawnienie na odzieży podejrzanego aż 5 okruchów mogących pochodzić z rozbitej szyby samochodu było wystarczającym dowodem, aby stwierdzić, iż wersja zdarzenia dotycząca rozbicia szyby przez podejrzanego ( $H_1$ ) jest zdecydowanie bardziej wsparta niż hipoteza przeciwna ( $H_2$ ). W przypadku liczby okruchów ujawnionych we wnętrzu pistoletu pneumatyczne-

go decydujące okazały się okoliczności zdarzenia. Biorąc pod uwagę umiejscowienie okruchów szkła (wnętrze lufy), długi czas, jaki upłynął od zdarzenia do zabezpieczenia dowodu, a także fakt, iż z pistoletu strzelano po zdarzeniu (co ustalono na podstawie akt sprawy), to ujawnienie nawet dwóch okruchów mogących pochodzić z rozbitej szyby samochodu było wystarczającym dowodem, aby stwierdzić, iż hipoteza dotycząca wykorzystania pistoletu do rozbicia szyby ( $H_1$ ) jest zdecydowanie bardziej prawdopodobna niż hipoteza ( $H_2$ ) sugerująca, że okruchy te znalazły się w nim przez przypadek.

Niemniej jednak w otrzepinach pochodzących z lufy pistoletu, jak też na odzieży podejrzanego, ujawniono względnie dużą liczbę (osiem) fragmentów szkła, które nie wykazują podobieństwa do składu pierwiastkowego próbki porównawczej. Dlatego też dla tych fragmentów, dla których stwierdzono, że bardziej prawdopodobna jest hipoteza, że pochodzą one z innych obiektów szklanych niż zabezpieczone próbki materiału porównawczego (dowód III.3), wykonano obliczenia ilorazu wiarygodności, których celem było ustalenie, z jakiej kategorii użytkowej mogą one pochodzić (problem klasyfikacyjny; poziom źródła). W tym celu rozważano następujące hipotezy:

- a)  $H_1$  – i-ty okruch szkła ujawniony w dowodach III.1 i III.2 pochodzi z kategorii szkło szyb samochodowych lub okiennych (cw);
- b)  $H_2$  – i-ty okruch szkła ujawniony w dowodach III.1 i III.2 pochodzi z kategorii szkło z opakowań szklanych (p).

Na podstawie obliczonych wartości ilorazu wiarygodności (tabela 4) można stwierdzić, że dla wszystkich dowodowych okruchów szkła, które nie były zgodne ze szkłem porównawczym, bardziej prawdopodobna jest hipoteza, że pochodzą one z kategorii „szkło szyb samochodowych lub okiennych” niż że pochodzą one z kategorii „szkło z opakowań szklanych”.

Biorąc pod uwagę dużą liczbę okruchów szkła z tej kategorii ujawnionych we wnętrzu pistoletu pneumatycznego, jak i w otrzepinach z odzieży, można stwierdzić (poziom aktywności), że pochodzą one np. z szyb samochodowych rozbitych podczas innych włamań ( $H_1$ ), niż że pochodzą one z kontaminacji środowiskowej ( $H_2$ ). Jednakże, aby móc powiązać podejrzanego z innymi włamaniami, konieczne byłoby dostarczenie do analizy dodatkowych próbek kontrolnych szkła z szyb, które rozbite podczas innych włamań, do których dochodziło w okolicy.

### 3.4 Przypadek IV

W kałuży krwi, wśród fragmentów rozbitej tafli szyby drzwi prowadzących z korytarza na klatkę schodową, podejrzanego znalazł, jak twierdzi, nieprzytomną ofiarę z urazami w okolicy głowy. Niezwłocznie powiadomił pogotowie, a do czasu przyjazdu służb ratunkowych starał się

jej udzielić pomocy przedmedycznej. Na miejsce zdarzenia przyjechała również policja. Podczas wstępnego przesłuchania mężczyzna zeznał, iż kobieta musiała się potknąć i upaść ze schodów, rozbijając szybę w drzwiach. Nieprzytomną kobietę przewieziono do szpitala, a kiedy odzyskała świadomość, zeznała, że to podejrzany pobił ją, a następnie pchnął w kierunku drzwi. W wyniku upadku ofiary na drzwi ich tafla szklana pękła, a powstałe fragmenty szkła spowodowały liczne obrażenia jej ciała. Ofiara podawała również odmienną lokalizację zdarzenia. Według niej oskarżony pobił ją w korytarzu, który oddzielony był od klatki schodowej zamkniętymi drzwiami. W związku z rozbieżnością zeznań policja zabezpieczyła fragmenty szyby znalezione na miejscu zdarzenia, tj. na podłodze (dowód IV.1), widoczne w ramie drzwi (dowód IV.2) oraz odzież (dowód IV.3–6), którą podejrzany prawdopodobnie miał na sobie w dniu zdarzenia. Dowody te, wraz z aktami sprawy, przekazano laboratorium celem ustalenia na poziomie aktywności, czy do zdarzenia doszło na skutek nieszczęśliwego wypadku (tj. upadku pokrzywdzonej ze schodów, podczas którego uderzyła ona w oszkloną część skrzydła drzwi;  $H_1$ ), czy też do zdarzenia doszło z udziałem osoby trzeciej (np. pobicia ofiary przez oskarżonego;  $H_2$ ).

Analiza informacji zawartych w aktach sprawy dotyczących obrażeń ofiary, a także badanie mechanizmu powstania śladów krwawych ujawnionych na miejscu zdarzenia, pozwoliły stwierdzić, że obie wersje zdarzenia ( $H_1$  i  $H_2$ ) są równie wiarygodne. W wyniku informacji zawartych w aktach udało się jedynie ustalić, iż zarówno podejrzany, jak i ofiara, byli zgodni co do faktu, iż podczas zdarzenia drzwi oddzielające klatkę schodową od korytarza były zamknięte.

Nadesłane do badań fragmenty szyby przekazano do badań mechanoskopijnych. Wszystkie fragmenty tafli szklanej z jednej strony posiadały charakterystyczny wzór (relief), a z drugiej ich powierzchnia była gładka. Analizując akta sprawy ustalono, iż gdyby wersja podejrzanego dotycząca samoistnego upadku ofiary ze schodów byłaby prawdziwa ( $H_1$ ), to szyba drzwi zostałaby rozbita od strony z reliefem. Natomiast przy założeniu wersji zdarzenia podawanej przez ofiarę ( $H_2$ ), tj. jej upadku na drzwi od strony korytarza, kierunek działania siły, który spowodował rozbicie tafli szklanej, nastąpiłby na gładką powierzchnię szyby. W wyniku „złożenia na całość” bieglemu z zakresu mechanoskopii udało się dopasować do siebie większość fragmentów szkła dowodowego (rysunek 5), tj. te ujawnione na podłodze (dowód IV.1) do fragmentów szkła porównawczego, tj. tych widocznych w ramie drzwi (dowód IV.2). Po złożeniu stwierdzono, że szyba została rozbita prawdopodobnie w wyniku jednokrotnego uderzenia w jej górną prawą część, patrząc na szybę od strony z reliefem (rysunek 5 – ramka) oraz w wyniku kilku uszkodzeń wtórnych (rysunek 5 – strzałki). W celu ustalenia kierunku dzia-

łania siły na tafłę szklaną krawędzie szkielek, stanowiące uszkodzenie pierwotne, poddano oględzinom przy użyciu lupy stereoskopowej (rysunek 6). Na podstawie analizy uszkodzeń promienistych stwierdzono, że kierunek działania siły nastąpił na gładką powierzchnię szyby, która przy zamkniętych drzwiach znajdowała się od strony korytarza.

Podsumowując, w wyniku badań mechanoskopijnych stwierdzono, że rozbicia szyby dokonano jednokrotnym uderzeniem, a siła skierowana była na gładką powierzchnię szyby (w lewą, górną część), która przy zamkniętych drzwiach znajdowała się od strony korytarza, co bardziej wspiera wersję zdarzenia podawaną przez ofiarę związaną z lokalizacją zdarzenia ( $H_2$ ) niż odwrotnie ( $H_1$ ).

W celu powiązania podejrzanego z miejscem zdarzenia jego odzież, zabezpieczoną jeden dzień po zdarzeniu, przekazano do badań fizykochemicznych. Ich celem było ustalenie, czy i ile okruszków szkła znajduje się na butach (dowód IV.3), bluzie (dowód IV.4), spodniach (dowód IV.5) oraz podkoszulku (dowód IV.6), a w przypadku ujawnienia jakichkolwiek okruszków szkła sprawdzenie, czy wykazują one podobieństwo do szkła porównawczego (dowód IV.2).

W otrzeplinach z butów (dowód IV.3), bluzy (dowód IV.4) oraz spodni (dowód IV.5) podejrzanego ujawniono łącznie piętnaście okruszków wyglądem przypominających szkło; po pięć okruszków w każdym z ww. dowodów. Liniowy rozmiar większości ujawnionych okruszków mieścił się w przedziale 0,3–1,0 mm. Analiza składu pierwiastkowego okruszków wykazała, iż są one szkłem (tabela 5). W celu wykonania badań porównawczych z jednego z fragmentów rozbitej szyby (dowód IV.2) pobrano trzy okruszki szkła o rozmiarze liniowym około 0,1–1,0 mm, a ich uśredniony skład pierwiastkowy wyrażony w [% wag.] przedstawiał się następująco: O:  $47,55 \pm 0,72$ , Na:  $10,30 \pm 0,31$ , Mg:  $0,16 \pm 0,02$ , Al:  $0,20 \pm 0,03$ , Si:  $33,92 \pm 0,64$ , Ca:  $7,83 \pm 0,35$ .

Ilościowy skład pierwiastkowy okruszków szkła ujawnionych na odzieży podejrzanego porównano z ilościowym składem pierwiastkowym szkła znajdującego się w ramie drzwi, wykonując obliczenia ilorazu wiarygodności  $LR$  (tabela 5). W obliczeniach  $LR$  rozważano następujące hipotezy:

- a)  $H_1$  – i-ty okruszek szkła ujawniony w dowodzie IV.3–IV.5 pochodzi z tego samego obiektu szklanego, co dowód IV.2;
- b)  $H_2$  – i-ty okruszek szkła ujawniony w dowodzie IV.3–IV.5 nie pochodzi z tego samego obiektu szklanego, co dowód IV.2.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono (poziom źródła), że dla wszystkich fragmentów szkła ujawnionych na odzieży i obuwiu podejrzanego bardziej prawdopodobna jest hipoteza ( $H_1$ ), że pochodzą one z tego samego obiektu co fragmenty szkła pobrane z tafli szklanej drzwi (dowód IV.2), niż hipoteza prze-

ciwna ( $H_2$ ). Przy czym otrzymane wartości  $LR$  wskazują, iż wsparcie dla tej hipotezy jest bardzo mocne.

Biorąc pod uwagę, że na odzieży i obuwiu podejrzanego ujawniono stosunkowo dużą liczbę okruszków szkła (patrz punkt 2.3) wykazujących podobieństwo do próbki pobranej z rozbitej szyby drzwi, można zasugerować (poziom aktywności), że bardziej wiarygodnym wytłumaczeniem mechanizmu ich przeniesienia się na odzież i obuwiu podejrzanego jest jego czynny udział w tłuczeniu tafli szklanej bądź też przebywanie w bliskiej odległości od rozbijanej tafli szklanej ( $H_2$ ), niż mechanizm ich przeniesienia np. w trakcie udzielania przez niego pomocy przedmedycznej ( $H_1$ ).

Tym samym zebrane w sprawie dowody zdecydowanie bardziej wspierają hipotezę, że doszło do zdarzenia z udziałem osoby trzeciej (np. pobicia;  $H_2$ ), niż że doszło do nieszczęśliwego wypadku (tj. upadku pokrzywdzonej ze schodów w następstwie którym uderzyła ona w oszkloną część skrzydła drzwi;  $H_1$ ).

#### 4. Podsumowanie

W pracy pokazano przykłady ekspertyz, w których w większości dowód w postaci odłamków szkła wymagał przeprowadzenia badań zarówno z zakresu mechanoskopii (np. „złożenie na całość”), jak i badań fizykochemicznych (analiza składu pierwiastkowego fragmentów szkła).

Zdaniem autorów, w omawianych przypadkach informacja uzyskana jedynie z jednego zakresu badań nie byłaby wystarczająca do udzielenia odpowiedzi na pytania postawione przez organ zlecający (czy żarówka świeciła się – przypadek I, czy samochód był na miejscu zdarzenia – przypadek II, czy do zdarzenia doszło w wyniku pobicia czy nieszczęśliwego wypadku – przypadek IV). Dopiero jednoczesna analiza wszystkich wyników uzyskanych w badaniach mechanoskopijnych jak i fizykochemicznych (tzw. dowód łączony), przeprowadzona z wykorzystaniem interpretacji opartej o modele ilorazu wiarygodności, pozwoliła na rozwiązanie rozpatrywanych problemów.

Według autorów, szkło stanowi istotny ślad kryminalistyczny, a wyniki jego analizy mogą przyczynić się do wyjaśnienia okoliczności zdarzenia, pomimo iż w większości przypadków odpowiedź na pytania organów zlecających może być udzielona wyłącznie w kategoriach prawdopodobieństwa, tj. pozwala na stwierdzenie, która z dwóch rozważanych wersji zdarzenia jest bardziej wiarygodna.

#### Podziękowania

Autorzy dziękują Panu dr hab. inż. Andrzejowi Chochólowi, prof. Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, za cenne uwagi wniesione podczas przygotowywania opinii z zakresu badań mechanoskopijnych.