



Spójność i kąt tarcia wewnętrznego przy ścinaniu próbek skalnych i materiałów kamiennych w dwuosiowym stanie naprężenia

Cohesion and angle of internal friction during shearing of rock samples and stone materials in biaxial state of stress

Dr inż. Jerzy Gawryś*

Treść: W artykule przedstawiono zaprojektowane i wykonane urządzenie do realizacji badań wyznaczania spójności i kąta tarcia wewnętrznego skał i materiałów kamiennych przy ścinaniu. Przedstawiono wyniki oznaczenia spójności i kąta tarcia wewnętrznego dla piaskowca, łowca i betonu komórkowego. Wykazano, że dla skał i materiałów kamiennych o bardzo niskiej wytrzymałości w skuteczny sposób można określić wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego metodą ścinania próbek w dwuosiowym stanie naprężenia.

Abstract: The article presents a designed and constructed device for testing cohesion and angle of internal friction of rocks and stone materials at shear. The results of determining the cohesion and angle of internal friction for sandstone, claystone and cellular concrete were presented. It has been shown that for very low strength rocks and stone materials, cohesion values and internal friction angle can be efficiently determined by shearing the samples in a biaxial state of stress. It has been shown that for rocks of very low strength, the values of consistency and angle of internal friction can be effectively determined by the method of shearing samples in a biaxial stress state

Słowa kluczowe:

skały, materiały kamienne, spójność, kąt tarcia wewnętrznego, wyniki badań

Key words:

rocks, stone materials, cohesion, angle of internal friction, results

1. Wprowadzenie

Projektowanie i realizacja wielu przedsięwzięć i zagadnień geoinżynierskich, a w szczególności projektowanie podziemnej eksploatacji górniczej, wymaga znajomości szeregu parametrów charakteryzujących fizykomechaniczne właściwości skał i górotworu.

Na istniejący pierwotny stan naprężenia w górotworze wpływa działalność górnicza, zaangażowanie tektoniczne złoża, wielkość i kształt filarów, resztki eksploatacyjne oraz szereg innych czynników, które generują w górotworze wtórny złożony stan naprężenia. Dla oceny zachowania się górotworu w złożonym stanie naprężenia, w sąsiedztwie wyrobisk górniczych, a szczególnie w stropach, ociosach czy narożach skrzyżowań wyrobisk zbudowanych ze słabych skał karbońskich – przeważnie łowców i węgla, niezbędna jest znajomość wartości parametrów fizykomechanicznych skał. Zachowanie się skał w złożonych stanach naprężenia opisują kryteria wytrzymałościowe w układzie współrzędnych t - s , określane zwykle za pomocą dwóch parametrów spójności c i kąta tarcia wewnętrznego φ . Parametry te pozwalają wyznaczyć wartość wytrzymałości skały związanej na ścinanie w złożonym stanie naprężenia dla określonej krytycznej wartości naprężenia normalnego. Poznanie wartości tych parametrów jest szczególnie istotne dla skał będących w bezpośrednim otoczeniu pokładów węgla i jest warunkiem umożliwiającym prawidłowe projektowanie bezpiecznej eksploatacji górniczej (Kidybiński 1982).

Do wyznaczania wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego skał stosuje się często zmodyfikowane empiryczne kryterium wytrzymałościowe Mohra, które w swym założeniu przyjmuje, że zniszczenie górotworu w złożonym stanie naprężenia zachodzi przez poślizg w płaszczyznach naprężeń stycznych, które zależą od naprężeń normalnych (Sanetra, Paczeńskiowski 2006). Zależność opisującą to kryterium wyznacza się doświadczalnie (Majcherczyk 1989) według (1).

$$\tau = f(\sigma) \quad (1)$$

gdzie:

τ – naprężenie styczne

σ – naprężenie normalne.

Graniczne stany naprężenia przedstawia się graficznie w układzie współrzędnych (τ - σ) za pomocą kół naprężeń (kół Mohra) na płaszczyźnie. Środki tych kół wyznaczają wartości p , a ich promienie wartości q

$$p = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3)$$

gdzie: σ_1, σ_3 – składowe naprężenia, $\sigma_1 \perp \sigma_3$.

Obwiednia jest styczną do kół Mohra, a współrzędne punktów stycznych odpowiadają granicznym wartościom naprężeń stycznych i normalnych, przy których występuje zniszczenie materiału.

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

2. Metody wyznaczania spójności c i kąta tarcia wewnętrznego φ

Przedstawiając graficznie wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c oraz wytrzymałość na rozciąganie R_r w układzie współrzędnych $(\tau - \sigma)$, jako koła Mohra, wyznacza się styczne do tych kół, które charakteryzują się współczynnikiem nachylenia $\tan \varphi$ i wartością $\tau_0 = c$ dla $\sigma = 0$. Na tej podstawie zostały wyprowadzone zależności na obliczenie wartości c i φ (Majcherczyk 1989)

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{R_c R_r} \quad (4)$$

$$\tan \varphi = \frac{R_c - R_r}{2 \sqrt{R_c R_r}} \quad (5)$$

$$R_c = 2ctg(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (6)$$

a równanie obwiedni przyjmuje postać prostej:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (7)$$

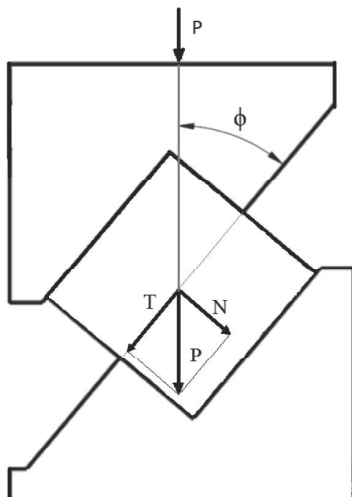
Jedną z metod wyznaczania wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego skały zwięzłej jest metoda ścinania próbek skalnych w dwuosiowym stanie naprężenia (Kidybiński 1982), którą autor przedstawia w niniejszym artykule. Realizuje się ją przez:

- ścinanie specjalnie przygotowanych próbek skalnych w aparacie skrzynkowym;
Zmiana parametrów badania realizowana jest przez zadawanie ustalonych wartości obciążenia normalnego,
- ścinanie próbek skalnych w uchwycie (uchwytach);
Zmiana parametrów badania odbywa się przez zmianę kąta ścinania φ kolejnych próbek.

Ścinanie próbek skalnych w uchwycie polega na wywieraniu na próbkę skały zwięzłej siły P powodującej jednocześnie działanie w próbce naprężeń ściskających σ i naprężeń ścinających τ odpowiednio prostopadłych i równoległych do powierzchni F ścięcia próbki. Wielkość kąta ścinania φ określa wzajemną zależność między składową poziomą T i składową pionową N siły ścinania P (8) i (9), co przedstawiono na rysunku 1 (Kidybiński 1982).

$$N = P \sin \varphi; \quad T = P \cos \varphi \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{N}{F}; \quad \tau = \frac{T}{F} \quad (9)$$



Rys. 1. Rozkład sił w ścinanej próbce
Fig. 1. Distribution of forces in a shear sample

Przedstawione w układzie współrzędnych $(\tau - \sigma)$ wyznaczone wartości naprężeń normalnych i stycznych dla kilku kątów ścinania φ , jako współrzędne punktów krytycznych, definiują obwiednię Mohra. Dopasowanie do wyznaczonych punktów obwiedni krzywej $\tau = f(\sigma)$, aproksymuje obwiednię i umożliwia obliczenie wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego (Ulusay, Hudson 2007).

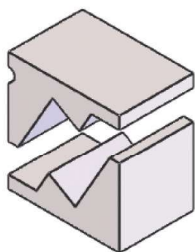
W warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania - w warunkach osiowo-symetrycznego stanu naprężeń ściskających, gdy $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, spójność i kąt tarcia wewnętrznego wyznacza się dla walcowych próbek skał umieszczonych w komorze ciśnieniowej połączonej z kompresorem hydraulicznym umożliwiającym utrzymywanie stałej wartości ciśnienia okólnego $\sigma_2 = \sigma_3$ na zadanym poziomie. Zadając obciążenie pionowe i ciśnienie okólne na próbkę skały za pomocą układu hydraulicznego wyznaczane są wartości naprężeń krytycznych. Na podstawie wartości naprężeń krytycznych i wartości ciśnień okólnych wyznacza się dla założonych wartości ciśnień okólnych koła Mohra w układzie współrzędnych $(\tau - \sigma)$. Wartość spójności określa na osi naprężeń stycznych τ punkt przecięcia osi z obwiednią kół Mohra. Wartość kąta tarcia wewnętrznego wyznacza kąt zawarty między styczną do obwiedni kół Mohra dla zadanych wartości $\sigma_2 = \sigma_3$ a osią naprężeń normalnych σ . Przyjmując paraboliczny kształt obwiedni wartość kąta tarcia wewnętrznego maleje ze wzrostem wartości $\sigma_2 = \sigma_3$.

3. Urządzenie do ścinania próbek skalnych w uchwycie – badania laboratoryjne

Dla realizacji badania spójności i kąta tarcia wewnętrznego, w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania, autor badał próbki skał w kształcie walca (Ulusay, Hudson 2007) i o smukłości 2. Wykonanie odwiertu o wymaganej smukłości w skałach o bardzo małej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (Bukowska 2012) – najczęściej iłowcach i węglach jest znacznie utrudnione lub niemożliwe. W trakcie wierzenia rdzenie często pękają wzdłuż powierzchni warstwowania, co uniemożliwia wykonanie próbek, a zatem i realizację tą metodą badań spójności i kąta tarcia wewnętrznego dla znacznej części węgla i iłowców Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW).

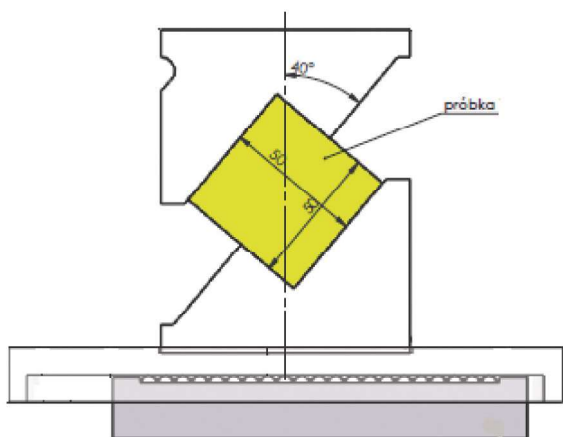
Metoda ścinania próbek skalnych w uchwycie jest pozbawiona tych niedogodności. Przygotowanie próbek prostopadłościennych ze skał o bardzo małej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie nie nastęrcza większych trudności. Zdaniem autora, metoda ścinania próbek skalnych w uchwycie (ścinanie próbek skalnych w dwuosiowym stanie naprężenia) uzupełnia metodę konwencjonalnego trójosiowego ściskania, umożliwiając badania spójności i kąta tarcia wewnętrznego skał i materiałów kamiennych o bardzo małej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

Do realizacji tego celu, autor zapoznał się z opisem wykonanego w przeszłości urządzenia do ścinania próbek skalnych (Kidybiński, i in. 1974). Aktualnie zaprojektowane i wykonane urządzenie różni się od wcześniejszej konstrukcji sposobem zadawania kąta ścinania oraz zamkniętą konstrukcją płyty ślizgowej. Urządzenie składa się z pięciu zestawów uchwytów (górných i dolnych), wykonanych dla wymuszenia mechanizmu ścinania pod kątem 20, 25, 30, 35 i 40° oraz z zamkniętej płyty ślizgowej służącej do minimalizacji siły tarcia między uchwycem dolnym a dolną płytą obciążającą maszyny wytrzymałościowej. Przykład kompletu uchwytów przedstawiono na rys. 2. Wymiary uchwytów pozwalają na ścinanie próbek o wysokości 50 mm i wymiarach poprzecznych zbliżonych do 50 x 50 mm.



Rys. 2. Zestaw uchwytów do ścinania dla kąta ścinania 30°
Fig. 2. Set of shear holders for shear angle 30°

Sposób ustawienia próbki laboratoryjnej między uchwytami górnym i dolnym przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przekrój urządzenia do ścinania próbek z zestawem uchwytów (górnym i dolnym) dla kąta ścinania 40°, ustawionym na płycie ślizgowej
Fig. 3. Cross section of the sample shearing machine with a set of grips (upper and lower) for the shear angle 40°, set on the sliding plate

Oznaczenie wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego przeprowadzono dla dwóch typów skał karbońskich - ilowca i piaskowca oraz dla betonu komórkowego, dla których oznaczono również wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie i rozciąganie (tabela 1).

Tabela 1. Wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie R_c i na rozciąganie R_t badanych skał i materiału kamiennego
Table 1. Values of uniaxial compressive strength R_c and tensile strength R_t of tested rocks and stone material

Skala/materiał kamienny	R_c , MPa	R_t , MPa
piaskowiec	55,5	3,23
iłowiec	48,0	1,63
beton komórkowy	3,08	0,50

Badane próbki laboratoryjne ścinano w urządzeniu umieszczonym między płytami obciążającymi maszyny wytrzymałościowej, po 4 – 6 sztuk dla określonej wartości kąta ścinania, rejestrując wartości siły krytycznej P . Korzystając z zależności (8) i (9) wyznaczono dla określonych wartości kąta ścinania wartości naprężeń normalnych s i stycznych t (jako średnie arytmetyczne z 4 – 6 oznaczeń), będących współrzędnymi punktów krytycznych (tabela 2).

Położenie punktów krytycznych na płaszczyźnie w układzie współrzędnych ($\tau - \sigma$) dla piaskowca przedstawiono na

rys. 4, dla ilowca na rys. 5 i dla betonu komórkowego na rys. 6.

Tabela 2. Wartości naprężeń normalnych σ i stycznych τ dla zadanych kątów ścinania ϕ
Table 2. Values of normal σ and tangential stress τ for given shear angles ϕ

Skala/materiał kamienny	Naprężenie, MPa	Kąt ścinania ϕ , 1°				
		20	25	30	35	40
piaskowiec	σ	4,96	8,31	13,71	22,40	34,96
	τ	13,63	17,82	23,75	31,99	41,66
iłowiec	σ	4,92	7,74	11,46	16,18	21,52
	τ	13,52	16,60	19,85	23,11	25,64
beton komórkowy	σ	0,37	0,57	0,80	1,10	1,44
	τ	1,02	1,22	1,39	1,57	1,72

Do punktów krytycznych zostały dopasowane obwiednie w postaci linii prostej danej równaniem ogólnym

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \tag{10}$$

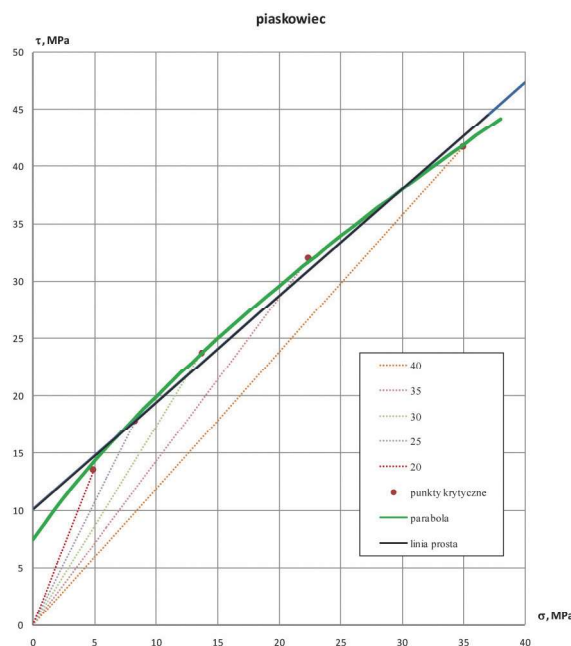
oraz obwiednie paraboliczne przedstawione równaniem ogólnym

$$\tau = a_1(a_2 \sigma + a_3)^n \tag{11}$$

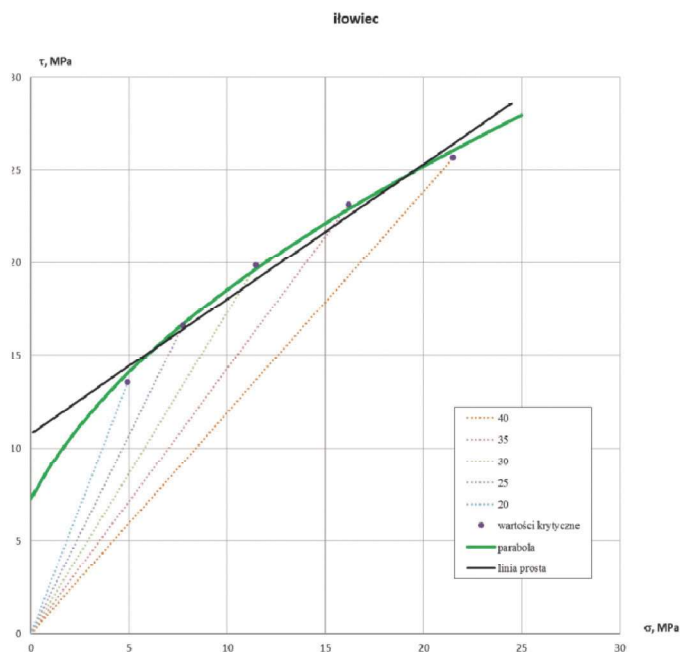
gdzie:

- a_1, a_2, a_3 – stałe
- n – wykładnik potęgi.

Wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego wyznaczone metodą ścinania próbek skalnych w dwuosowym stanie naprężenia zestawiono z wartościami spójności i kąta tarcia wewnętrznego, obliczonymi na podstawie wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie R_c oraz wytrzymałości na rozciąganie R_t (tabela 3). Dla piaskowca i ilowca wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego wyznaczone zostały również metodą konwencjonalnego trójosiowego ściskania.

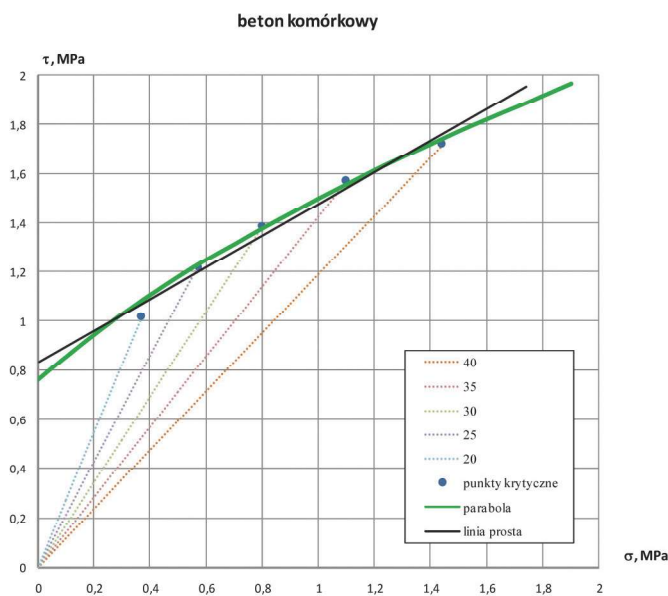


Rys. 4. Wyznaczenie wartości c i ϕ dla piaskowca z przebiegu aproksymowanych obwiedni
Fig. 4. Determination of c and ϕ values for the sandstone from the course of approximated envelopes



Rys. 5. Wyznaczenie wartości c i φ dla iłowca z przebiegu aproksymowanych obwiedni

Fig. 5. Determination of the values of c and φ for a claystone from the course of approximated envelopes



Rys. 6. Wyznaczenie wartości c i φ dla betonu komórkowego z przebiegu aproksymowanych obwiedni

Fig. 6. Determination of c and φ values for cellular concrete from the course of approximated envelopes

Tabela 3. Zestawienie wyników oznaczeń spójności c i kąta tarcia wewnętrznego φ

Table 3. List of results of cohesion c and internal friction determination φ

Skala / materiał kamienny	Parametry	Sposób obciążenia / rodzaj obwiedni			
		1-osiowe linia prosta	2-osiowe linia prosta	2-osiowe parabola	3-osiowe parabola
piaskowiec	c , MPa	6,7	10,8	7,4	7,2
	φ , 1o	63	36	50	54
iłowiec	c , MPa	4,7	10,8	7,3	7,8
	φ , 1o	68	36	42	46
beton komórkowy	c , MPa	0,58	0,83	0,76	-
	φ , 1o	51	33	32	-

4. Podsumowanie

Wartości spójności jak i kąta tarcia wewnętrznego wyznaczone metodą ścinania próbek skalnych w dwuosowym stanie naprężenia (ścinięcia próbek skalnych w uchwycie) są zbliżone do wartości uzyskanych metodą konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy aproksymacji obwiedni parabolą.

W metodzie ścinania próbek skalnych w dwuosowym stanie naprężenia obwiednia paraboliczna wykazuje lepsze dopasowanie do punktów krytycznych w odniesieniu do obwiedni w postaci linii prostej. Stosowanie obwiedni liniowej o około 30% zawyża wartości kohezji oraz o około 30% zaniża wartości kąta tarcia wewnętrznego w odniesieniu do obwiedni parabolicznej. Dlatego stosowanie w metodzie ścinania próbek skalnych w dwuosowym stanie naprężenia obwiedni liniowej jest, zdaniem autora, nieuzasadnione.

Obliczenie wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego wprost z wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie znacznie zaniża wartości spójności oraz zawyża wartości kąta tarcia wewnętrznego w odniesieniu do metod aproksymujących obwiednię parabolą.


Biorąc pod uwagę możliwości przygotowania próbek do badań spójności i kąta tarcia wewnętrznego, metoda ścinania próbek skalnych w dwuosowym stanie naprężenia w skuteczny sposób pozwala określać wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego ze skał i materiałów kamiennych o bardzo małej wytrzymałości na ściskanie.


Artykuł powstał w ramach realizacji pracy statutowej o numerze 10132028-142, finansowanej z dotacji podmiotowej MNiSW, realizowanej w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach w 2018 r.

Literatura

- BUKOWSKA M. 2012 - Skłonność górotworu do tąpnięć – geologiczne i geomechaniczne metody badań. Wydawnictwo GIG. Katowice.
- KIDYBIŃSKI A. 1982 - Podstawy geotechniki kopalnianej, Wydaw. „Śląsk”, Katowice.
- KIDYBIŃSKI A., SMOLKA J., BAŁAZYI I. 1974 - Oznaczanie podstawowych własności mechanicznych skał zwięzłych. Komunikat nr 608, Wydawnictwo GIG. Katowice.
- MAJCHERCZYK T. 1989 - Badania fizycznych własności skał. Skrypty uczelniane 1175. Wydawnictwo AGH. Kraków.
- SANETRA U., PACZEŚNIEWSKI K. 2006 - Obliczanie kąta tarcia wewnętrznego i spójności skał metodą stycznej do obwiedni kół Mohra w postaci paraboli. „Górnictwo i Środowisko”. Prace naukowe GIG. Katowice.
- ULUSAY R., HUDSON J. A. (eds.) 2007 - The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Commission on testing methods ISRM. Ankara, Turkey.

Artykuł wpłynął do redakcji – listopad 2019
Artykuł akceptowano do druku – 25.01.2020




FTT WOLBROM®

Twój wypróbowany partner!

**Innowacyjna
droga
rozwoju**

www.fttwolbrom.com.pl