

Struktura i geneza pseudotachylitów Tatr Wysokich

Aleksandra Gawęda*, Robert Piwkowski*

Pseudotachylity występujące w Tatrach Wysokich są skalami żyłowymi, o niejednorodnej budowie. Składają się na nie: materiał okruchowy (47,5 % obj.: albit, K-skaleń, kwarc, fragmenty starszych brekcji o spoiwie hematytowym) oraz spoiwo afanitowe (52,5 % obj.) o mezoskopowo ciemnofioletowej barwie. Spoiwo ma charakter ultramylonitu, zabarwionego rozartym hematytem. Podwyższone zawartości TiO_2 występują sporadycznie i nieregularnie. Całość stanowi efekt iniekcji mylonitu w rozwarłe szczeliny. Skala mylonityzowana była uboższa w krzemionkę od granodiorytów otaczających żyły pseudotachylitowe. W strefie kontaktu z granodiorytem występuje nieciągła warstewka szkliva o składzie „granitu minimalnego”, powstałego w następstwie przetopienia masy afanitowej w wyniku wydzielonego ciepła tarcia. Topienie cząstkowe miało podrzędne znaczenie, utworzone szklivo zaś szybko krzepło, nie mieszając się z ultramylonitem. Proces formowania się pseudotachylitów był z pewnością młodszy od mineralizacji hematytowej i miał związek z procesami sejsmicznymi, towarzyszącymi wypiętrzaniu trzonu krystalicznego Tatr.

Słowa kluczowe: pseudotachylit, Tatry Wysokie, ultramylonit

Aleksandra Gawęda & Robert Piwkowski — Structure and origin of pseudotachylites from the High Tatra Mts. *Prz. Geol.*, 48: 722–726.

S u m m a r y. Pseudotachylites occur in the High Tatra Mts as vein rocks with inhomogeneous structure. They are composed of clastic material (47,5 %vol.: albite, K-feldspar, quartz, fragments of older breccias with hematitic matrix) and afanitic matrix (52,5 %vol.), dark violet in colour. The matrix is ultramylonite, coloured by ground hematite. Occasionally and irregularly disposed enhanced concentrations of TiO_2 can be observed. Pseudotachylite veins are the result of mylonite injection into open fissures. Mylonitized rock was poorer in silica than the granodiorite, forming the present host rock. In the contact zone with granodiorite there is a discontinuous thin layer of glass, similar in composition to “minimum granite”, formed as the result of fusion of afanitic matrix by the frictional heat generated in the fault zones. Partial melting was a subordinate process and melt formed at the contact was solidified rather quickly, preventing the mixing with the ultramylonite. Formation of pseudotachylites was younger than hematite mineralisation and was connected with young seismic processes accompanying the uplift of the crystalline basement of the Tatra Mts.

Key words: pseudotachylite, High Tatra, ultramylonite

Termin pseudotachylit został wprowadzony do literatury geologicznej przez Shanda (1916) na określenie ciemnych afanitowych żył tnących sieciowo Old Granite w południowej Afryce. Od czasu zaistnienia terminu wśród badaczy problemu nie ma zgodności co do mechanizmu powstawania pseudotachylitów. Dostępne w literaturze opisy petrograficzne wskazują na następujące wspólne cechy tych skał:

1) pseudotachylity są skalami żyłowymi, o zróżnicowanej miąższości;

2) są to zawsze skały dwuskładnikowe, złożone z afanitowego ciemnego tła, w którym są zatopione klasty pokruszonych skał otoczenia;

3) występuje podobieństwo składu chemicznego pseudotachylitów i skał, które przecinają;

4) istnieje ścisły związek występowania pseudotachylitów ze strefami deformacji kruchych o zróżnicowanej amplitudzie.

Klasycznymi obszarami występowania pseudotachylitów są: Old Granite w południowej Afryce (Shand, 1916), Szkocja (Glen Coe, Gairloch), Hybrydy, uskok San Andreas w Ameryce Północnej (np. Crickmay, 1933), nasunięcie Himalajów (np. Scott & Drewer, 1953), Zabajkale (Salop, 1949).

Przyjmuje się, iż są trzy możliwe drogi generacji pseudotachylitów:

1. Iniekcja mylonitu bez utraty jego identyczności. Proces taki możliwy jest dzięki składnikom gazowym

(H_2O , CO_2 , CH_4 , itp.) obecnym w strefach zluźnień tektonicznych. W warunkach tarcia składniki te przechodzą w stan nadkrytyczny, zwiększając drastycznie ciśnienie. Otwarcie szczeliny doprowadza do eksplozji (Philpotts, 1964). Częstym powodem takiego zjawiska są trzęsienia ziemi (Wenk, 1978).

2. Mylonityzacja miejscowa. Jest to najstarsza hipoteza powstania pseudotachylitów, oparta na podobieństwie ich składu chemicznego do składu skał otoczenia oraz podobieństwie charakteru mineralnego okruchów.

3. Topienie skały macierzystej w wyniku wydzielonego ciepła tarcia w procesie uskokowania. Powstały stop iniekuje w szczeliny spajając ostrokrawędziste odłamki. Potwierdzeniem tej teorii jest obecność szkliva, mikroliitów, owalnych pęcherzy gazowych.

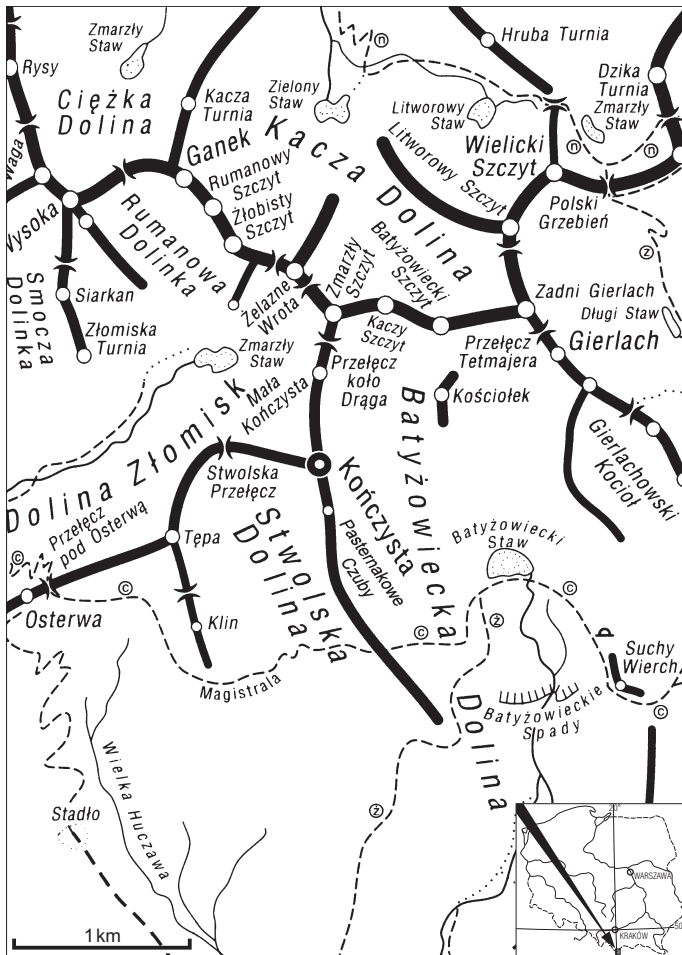
Bez względu na przyjętą genezę, zawsze wielkość okruchów pseudotachylitu limitowana jest szerokością szczeliny (Ray, 1999). Wskazuje to, iż rozwarcie musiało być wcześniejsze niż iniekcja.

Pseudotachylity w Tatrach

Skały żyłowe o charakterze pseudotachylitów występują w trzonie granitoidowym Tatr Wysokich i są przestrzennie związane z nasunięciem Kazalnicy (Piotrowska, 1997) oraz płasko zalegającymi strefami nieciągłości w rejonie Doliny Złomisk, Kończystej i Gierlachu.

W 1924 r. Kreutz opisał fioletową skałę żyłową z Kotła Miękusowieckiego. Skała składała się z ostrokrawędzistych odłamków plagioklastu $Ab_{95}An_5$ i kwarcu spojonych „detritusem”. Barwa fiołkowa pochodziła, zdaniem autora, od tlenków Ti uwolnionych w procesie rozkładu biotyту.

*Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec; gaweda@us.edu.pl



Ryc. 1. Mapa graniova obszaru badań (masyw Kończystej w Tatrach Wysokich) wg Paryskiego (Paryski & Radwańska-Paryska, 1995)

Fig. 1. Scheme map of the sampling area (Koszysta Massif in High Tatra Mts) according to Paryski (Paryski & Radwańska-Paryska, 1995)

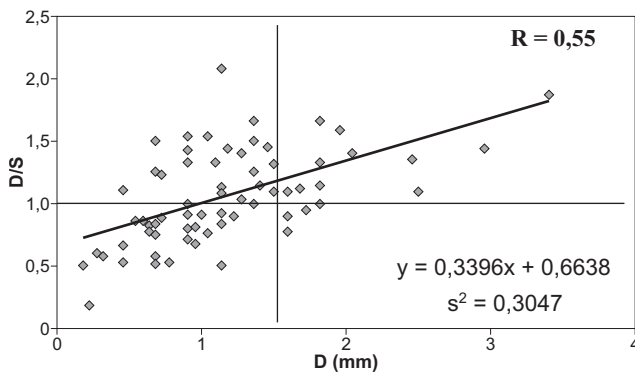
Tenże autor, badając próbki Pawlicy, potwierdził występowanie tego typu skał także z Doliny Złomisk. Fioletowe skały z Przełęczy Miękusowieckiej odnotowała także Turnau-Morawska (1948), zaś Koisar i Zawadzki (1972) zamieścili pierwsze szczegółowe analizy chemiczne tych skał. Petrik i Reichenwalder (1996) badając pseudotachylity z okolic Gierlachu stwierdzili podobieństwo ich składu do stopu „granitu minimalnego” w układzie Ab-Or przy $T = 860^{\circ}\text{C}$ i $P = 100\text{ MPa}$. Obecność automorficznego hematytu, zdaniem autorów, wskazywała na bardzo wysoką aktywność tlenu (przypuszczalnie związaną z dysocjacją wody w warunkach nadkrytycznych).

Mimo braku datowań izotopowych pseudotachylity łączone są ze zjawiskami paleosejsmicznymi związanymi z wypiętrzaniem trzonu Tatr Wysokich.

Opróbowanie i metody badań

Badane próby pseudotachylitów pochodzą z południowych stoków Kończystej (wys. ok. 2400 m n.p.m.; ryc. 1, 3) oraz zboczy Pasternakowych Czuby (ryc. 4). Tworzą one żyły o grubości 1–6 cm, tnące granodioryt słabo zmieniony hydrotermalnie (częściowa chlorytyzacja biotyту, krystalizacja sfenu i hematytu kosztem ilmenitu i plagiokładu, słaba serycycyzacja plagiokładów). Wykonano analizy planimetryczne oraz pomiary wielkości ziaren (dla średnic w zakresie 0,1–2,5 mm).

Analizy w mikroobszarze okruchów i spoiwa wykonano w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego, korzystając z mikrosondy Cambridge Microscan M9. Warunki analizy: napięcie przyspieszające: 15 kV, czas zliczania: 20 s., procedura korekcyjna ZAF. Używano zestawów wzorców naturalnych i syntetycznych międzynarodowych i polskich. Mikroanalizy skaleni wykonywano wiązką punktową, zaś mikroanalizy



D – długość klastu
length of the clast
S – szerokość klastu
width of the clast
D/S – proporcja parametrów klastów: długość do szerokości
length/width ratio
R – współczynnik korelacji prostej
correlation coefficient
 s^2 – kwadrat średniego odchylenia standardowego
squared deviation

Ryc. 2. Zależność długości klastów [w milimetrach] pseudotachylitu od proporcji D/S; R — współczynnik korelacji; s^2 — kwadrat odchylenia standardowego; D — długość klastu; S — szerokość klastu. Równanie w ramce określa wartość funkcji regresji
Fig. 2. The relation of the clasts length [in millimetres] versus D/S proportion; R — correlation coefficient; s^2 — squared deviation; D — length of the clast; S — width of the clast. Equation in the frame denominate the value of the regression function

Tab. 1. Skład chemiczny skaleni

Składnik	K-skałen (n = 5)	Albit (n = 7)
SiO ₂	63,32	64,30
Al ₂ O ₃	20,18	21,09
FeO	0,04	0,04
MnO	0,02	0,01
CaO	0,00	0,51
Na ₂ O	0,14	13,32
K ₂ O	16,65	0,11
Total	100,35	99,37
An	0	2
Ab	1	97

Tab. 2. Skład chemiczny odmian petrograficznych spoiwa pseudotachylitu

Składnik	Spoiwo hematytowe	Spoiwo ciemne	Spoiwo mylonityczne I (n = 3)	Spoiwo mylonityczne II (n = 4)	Szklivo (n = 4)
	1	2	3	4	5
SiO ₂	0,67	34,92	65,20	69,36	66,30
TiO ₂	1,49	0,39	–	0,43	–
Al ₂ O ₃	3,23	24,33	22,81	18,19	19,93
Fe ₂ O ₃ *	93,3	27,35	–	–	0,12
MnO	0	0	–	–	–
MgO	0,11	0,02	0,02	0,02	0,02
CaO	0	0,01	0,03	0,35	–
Na ₂ O	0,28	4,71	10,21	10,57	7,67
K ₂ O	0,06	2,69	1,59	0,74	5,16
Suma	99,14	94,52	99,86	99,66	99,20

masy afanitowej oraz szkliva — na rastrze o boku 4–6 mm ze względu na jej submikroskopową niehomogeniczność. Po obserwacjach mikroskopowych i stwierdzeniu obecności hematytu jako jedynej formy tlenku Fe całe analizowane żelazo zostało przeliczone na Fe₂O₃.

Wyniki badań

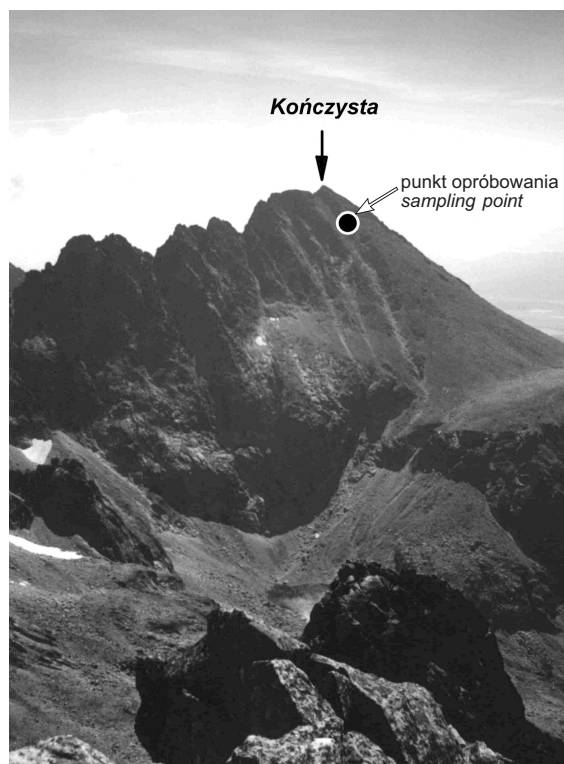
Pseudotachylity tworzą żyły o zróżnicowanej grubości od 0,5 cm do 6 cm (Fot. 3). Granodioryt w najbliższym otoczeniu nie wykazuje zmian tektonicznych w okolicach żył ani w skali odsłonięcia ani mikroskopowo. Nawet kwarc, zwykle tak podatny na naprężenia, nie wykazuje charakterystycznego w takich przypadkach smużystego wygaszania lub też prążkowania. Zawartość procentowa okruchów i szkliva nie zmienia się w sposób istotny w różnych czę-

ściach żył, a uśrednione wartości udziałów okruchów do spoiwa mają się do siebie jak 47,5 : 52,5.

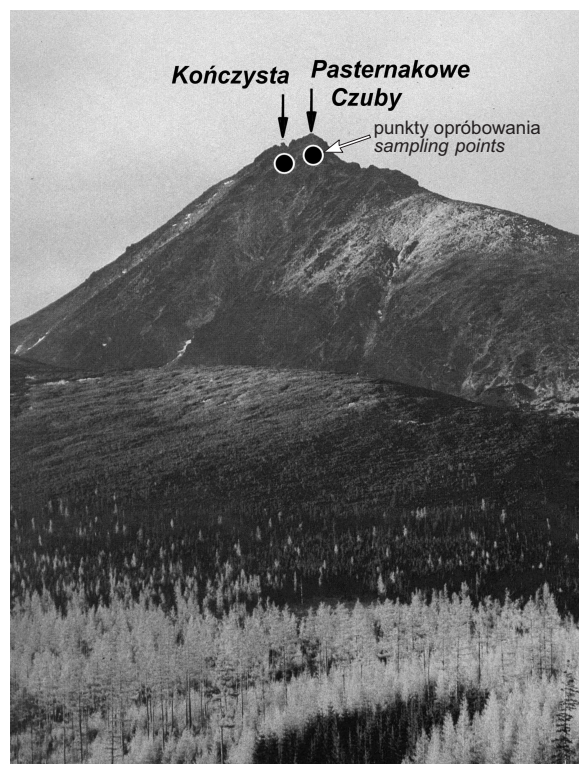
Skład mineralny klastów jest zasadniczo taki sam jak w skale otaczającej: są to skalenie potasowe Or₉₉Ab₁ — Or₉₇Ab₃, albity Ab₉₅An₂Or₃ — Ab₉₉An₁ (tab. 1; ryc. 6) i kwarc w proporcjach Kfs : Pl : Q = 13,1 : 82,7 : 4,2. Sporadycznie można napotkać zaokrąglone fragmenty jakiejś starszej brekcji, zbudowane z okruchów kwarcu i skaleni spojonych hematytem (ryc. 7).

Wymiary ziaren wykazują słabą korelację ich wydłużenia z przebiegiem żyły, wyrażona współczynnikiem korelacji $R = 0,55$ dla układu długość *versus* D/S, przy kwadracie odchylenia standardowego $s^2 = 0,304$ (ryc. 2).

Skład masy afanitowej zmienia się na małych odległościach (ok. 0,1–0,2 mm) i zawsze jest zbliżony do składu skaleni (por tab. 1 i tab.2). Wyjątkiem są obszary o



Ryc. 3. Widok na Kończystą od NW wraz z naniesionymi punktami opróbowania
Fig. 3. View to Kończysta Mt. from NW with marked sampling points

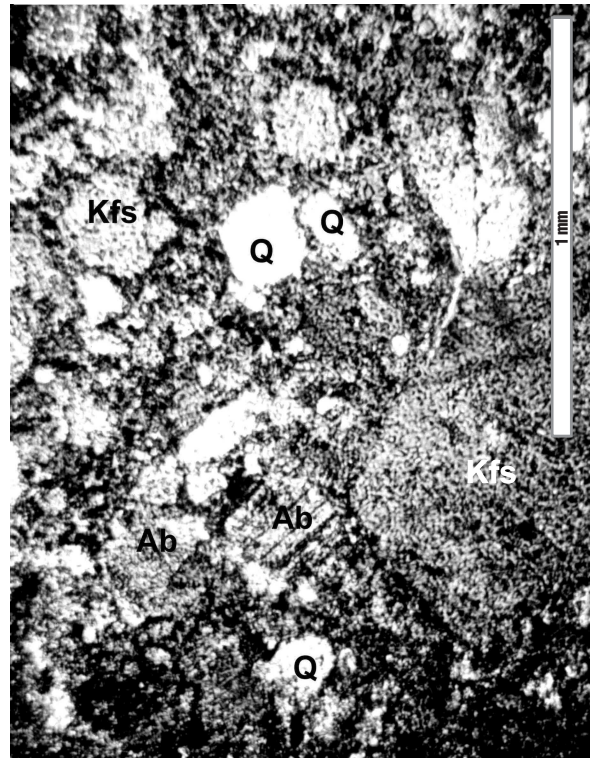


Ryc. 4. Kończysta i Pasternakowe Czuby od SW wraz z punktami opróbowania
Fig. 4. Kończysta Mt. and Pasternakowe Czuby from SW with sampling points



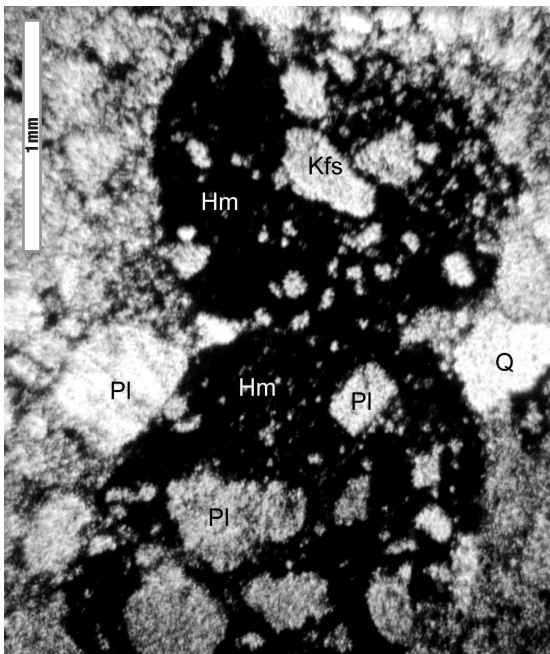
Ryc. 5. Fragment pseudotachylitu: jasne okruchy zatonione w ciemnym spoiwie

Ryc. 5. Fragment of pseudotachylite: pale clasts in the dark matrix



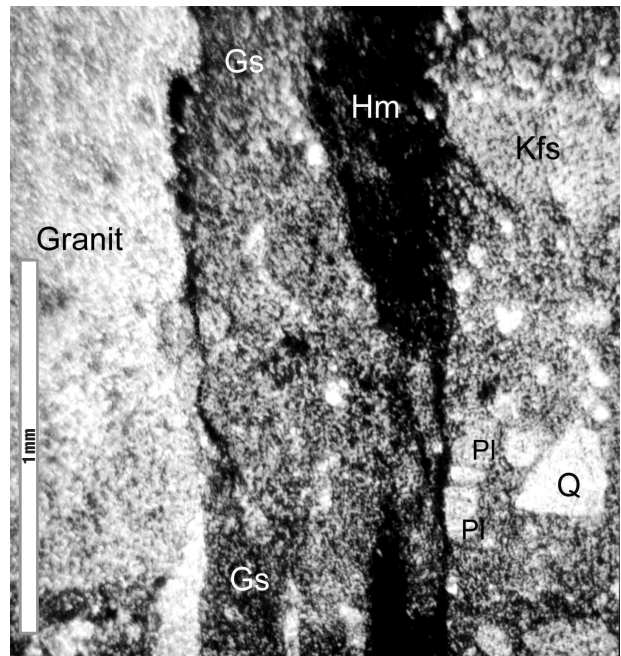
Ryc. 6. Mikrofotografia pseudotachylitu; Kfs — skaień potasowy; Ab — albit; Q — kwarc, Nikole skrzyżowane

Ryc. 6. Microphotograph of the pseudotachylite; Kfs — K-feldspar; Ab — albite; Q — quartz. Crossed nicols



Ryc. 7. Mikrofotografia okruchów hematytowych w pseudotachylicie; Pl — plagioklaz; Kfs — skaień potasowy; Q — kwarc; Hm — hematyt. Nikole skrzyżowane

Fig. 7. Microphotograph of hematite clasts in the pseudotachylite; Pl — plagioclase; Kfs — K-feldspar; Q — quartz; Hm — hematite; Crossed nicols



Ryc. 8. Mikrofotografia strefy kontaktowej pseudotachylitu z granitem wraz z warstewką szkliwa; GS — szkliwo; Pl — plagioklaz; Kfs — skaień potasowy; Q — kwarc. Nikole skrzyżowane

Ryc. 8. Microphotograph of the pseudotachylite — granite contact zone with glassy veinlet; GS — glass; Pl — plagioclase; Kfs — K-feldspar; Q — quartz. Crossed nicols

ciemniejszym zabarwieniu, rozłożone nieregularnie w obrębie żył, które są wzbogacone w Fe_2O_3 (rozproszony pył hematytowy) oraz TiO_2 (tab. 2).

Tuż przy ostrym kontakcie żyły i granodiorytu lokalnie występuje nieciągła warstewka o grubości do 1 mm, mająca cechy częściowo zrekrytalizowanego szkliwa (ryc. 8). Szkliwo zachowało się tylko w załomach kontaktu. Skład chemiczny warstewki odpowiada tzw. minimum granitowemu (Tuttle & Bowen, 1958; tab. 2).

Dyskusja

Dla określenia mechanizmu powstania pseudotachylitów kluczowe jest stwierdzenie jaki charakter ma spoiwo afanitowe: ultramylonitu czy też szkliwa. W przypadku pseudotachylitów tatrzańskich spoiwo tworzą silnie rozdrobnione skalenie. Biorąc pod uwagę brak oznak deformacji skał ościennych, musiało dojść do iniekcji ultramylonitu wraz z nieco grubszym materiałem detrytycznym w rozwierające się szczeliny (teoria 1), przy braku rozciągania materiału miejscowego. Wydłużenie zgodne ze ścianami żył wykazują tylko ziarna większe od 1,59 mm natomiast ziarna mniejsze są niemal izometryczne ($D/S \# 1$) lub ustawione chaotycznie (ryc. 2). Niski udział kwarcu w stosunku do skaleni w materiale detrytycznym sugeruje, że kruszona skała musiała być uboższa w krzemionkę niż typowy granodioryt.

Obecność warstewki szklistej o składzie „granitu minimalnego” przy kontakcie z nienaruszonym granodioritem sugeruje natomiast miejscową mikrointruzyję wyciśniętego stopu granitowego (teoria 3). Stop taki mógł utworzyć się w wyniku przegrzania afanitowego spoiwa na skutek tarcia materiału detrytycznego o brzegi szczeliny. Hipotezę taką potwierdza fakt występowania szkliwa tylko przy lokalnych załomach i nierównościach kontaktów z granodioritem, gdzie tarcie było większe. Schładzanie tak małych porcji stopu musiało następować bardzo szybko, uniemożliwiając wymieszanie szkliwa magmowego i detrytusy ultramylonitu, czego wynikiem są ostre granice między warstewką szkliwa i zasadniczą masą pseudotachylitu oraz brak jakichkolwiek elementów detrytycznych w warstewce szkliwa. Szybkie schładzania stopu i jego praktyczna niemieszalność z miazgą mylonityczną stawiają pod znakiem zapytania dyplomatyczną sugestią Spraya (1995) sugerującą możliwość dwoistej genezy spoiwa pseudotachylitu (wymieszany stop i miazga). Na odrębny charakter genetyczny obu faz (stopu i mylonitu) wskazują też badania eksperymentalne: powstanie mylonitu wymaga powolnej relaksacji stresu, zaś wytworzenie szkliwa — szybkiej relaksacji (Macaudiere i in., 1985). Przeciw hipotezie Spraya przemawia również fakt, iż impregnacje hematytowe oraz podwyższone stężenia TiO_2 obserwowane są jedynie w obrębie miazgi mylonitycznej, przy zupełnym ich braku w szkliwie (por. analiza 1 *versus* 5, tab.2).

Hematytu jako główny składnik barwiący spoiwa pseudotachylitu wydaje się mieć także detrytyczne pochodzenie. Jego rozkład w obrębie afanitowej masy spoiwa jest bardzo nieregularny, z plamistymi koncentracjami w obrębie skupień najdrobniejszego materiału. Nigdzie nie stwierdzono automorficznych kryształów hematytu. W obrębie materiału klastycznego występują okruchy starszej brekcji o spoiwie hematytowym, których granice

bywają lokalnie rozmyte, a otaczające spoiwo jest wyraźnie ciemniejsze dzięki zawartości rozartego hematytu. Biorąc pod uwagę powyższe fakty, wydaje się, iż pseudotachylity tatrzańskie nie mają związku ani z waryscyjskimi ani z alpejskimi ruchami tektonicznymi, a raczej ze stosunkowo młodym wypiętrzaniem trzonu krystalicznego Tatr i związaną z tym faktem wzmoczoną sejsmicznością obszaru.

Wnioski

— Zasadnicza masa pseudotachylitów tatrzańskich tworzyła się w wyniku intruzji ultramylonitu w otwarte / otwierające się szczeliny.

— Sporadycznie dochodziło do stopienia ultramylonitu w wyniku tarcia o ściany szczeliny, czego wynikiem są nieciągłe warstewki szkliwa. Nie doszło do homogenizacji szkliwa i ultramylonitu.

— Ciemnofioletowa barwa żył pseudotachylitów pochodzi od rozproszonego hematytu (Fe_2O_3), podwyższenie zawartości TiO_2 ma lokalne znaczenie i nie odgrywa istotnej roli jako składnik barwiący.

— Epizod tektoniczny związany z tworzeniem się pseudotachylitów, musiał być stosunkowo młody, na pewno młodszy od mineralizacji hematytowej, tak pospolitej na całym obszarze Tatr.

Autorzy dziękują Prof.dr hab. R. Kryzie za pomoc przy analizach mikrosondowych oraz Prof. dr hab. K. Piotrowskiej za stylizację dyskusje.

Literatura

- CRICKMAY G.W. 1933 — The occurrence of mylonites in the crystalline rocks of Georgia. *Am. J. Sci.* 5th ser., 26: 161–177.
- KOISAR B., ZAWIDZKI P. 1972 — the occurrence of mylonites in the crystalline rocks of Georgia. *Amer. J. Sci.* 5th ser., 26: 161–177.
- KREUTZ S. 1924 — Sur un filon de couleur violette dans le cirque de Mięszowiecki (Hautes Tatry) Extr. *Bull. De L'Acad. Polonaise des Sciences et des Lettres.* ser. A. *Sci. Math.* 153–157.
- KREUTZ S. 1930 — O tatrzańskim trzonie krystalicznym. *Wierchy* 8: 60–82.
- MACAUDIORE J., BROWN W.L. & OHNSTETTER D. 1985 — Microcrystalline textures resulting from rapid crystallization in pseudotachylite melt in meta-anorthosite. *Contrib. Mineral. Petrol.* 89: 39–51.
- PARYSKI W.H. & RADWAŃSKA-PARYSKA Z. 1995 — Wielka Encyklopedia Tatrzańska. Wydawnictwo Górskie — Poronin: 57.
- PETRIK I. & REICHENWALDER P. 1996 — Pseudotachylite from the High Tatry Mts. *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne. Pr. Spec.*, 7: 61–64.
- PHILPOTTS A. R. 1964 — Origin of pseudotachylites. *Amer. J. Sci.*, 262: 1008–1035.
- PIOTROWSKA K. 1997 — Cios, spękania ścięciowe i uskoki w trzonie granitoidowym polskich Tatr Wysokich. *Prz. Geol.*, 45: 904–907.
- RAY S.K. 1999 — Transformation of cataclastically deformed rocks to pseudotachylite by pervasion of frictional melt: interference from clast-size analysis. *Tectonophysics*, 301: 283–304.
- SALOP L.L. 1949 — Pseudotachylites from the cis-Baikal and western trans-baikal regions and the problem of their genesis. *Akad. Nauk SSSR. Izv. Ser. Geol.*, 5: 40–56.
- SCOTT J.S. & DREWER H. I. 1953 — Frictional fusion along a Himalayan thrust. *Royal Soc. Of Edinburgh Proc. sec. B.*, 65: 121–140.
- SHAND S.J. 1916 — The pseudotachylite of Perijs (Orange Free State). *Geol. Soc. London Quart. J.*, 72: 198–221.
- SPRAY J.G. 1995 — Pseudotachylite controversy: fact or friction. *Geology*, 23: 1119–1122.
- TURNAU-MORAWSKA M. 1948 — Z mikrogeologii trzonu krystalicznego Tatr. *Kosmos* 65. Wrocław: 59–100.
- TUTTLE O.F. & BOWEN N.L. 1958 — Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — KAlSi_3O_8 — SiO_2 — H_2O . *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 74: 1–153.
- WENK H.R. 1978 — Are pseudotachylites products of fracture or fusion? *Geology*, 6: 507–511.