

The origin of deformation bands in the Silesian Nappe (SE Poland)

Piotr Strzelecki, MSc eng.

Abstract

Deformation bands are small-scale tabular features found in sedimentary basins within granular rocks, providing valuable insights into deformation mechanics and enhancing our understanding of the complex processes shaping the Earth's upper crust. In this study conducted in the Central Carpathian Synclinorium of the Silesian Nappe in the Outer Carpathians (SE Poland), deformation bands were identified in the Oligocene strata. The research encompassed field studies, structural analyses, and microscopic investigations involving transmitted light microscopy, cathodoluminescence, and electron microscopy. Additional studies utilizing stable isotopes of calcite phases and X-ray microtomography were also performed. The collected data on deformation bands were subjected to data mining techniques for pattern recognition and statistical analyses.

Two kinematic types of deformation bands were distinguished: simple shear bands and pure compaction bands. The former is a local feature associated with folding within second-order folds, while the latter is a regional type that constitutes the majority of deformation bands in the study area. To date, only a few locations worldwide have documented naturally occurring deformation bands that primarily localize compactant failure, known as pure compaction bands (PCB). The study identified the origin and formation conditions of PCB, and a new model for PCB formation was proposed.

The pure compaction bands were found in the Oligocene flysch sequence of the (Lower) Krosno beds within the Otryt sandstone. They are perpendicular to the bedding planes and occur within the folded strata. The pure compaction bands formed in fine-grained to coarse-grained sandstones with moderate to poor sorting. The spacing of PCB is 2-20 mm and the typical thickness of a single band is below 1 mm. The microstructures of PCB originated from various mechanisms including pore collapse leading to compact grain packing, disaggregation involving grains rotation and sliding, micro-folding, and cataclasis. The resulting microstructure strongly correlates with the textural parameters of the host rock. The frequency of cataclasis increases with grain size, whereas micro-folding is related to the moderate sorting of the host rock.

Structural restoration of the beds to their primary horizontal position indicates that PCB formed prior to folding and recorded the SW-NE directed shortening which is consistent with the direction of subsequent folding. The PCB originated at the incipient stage of regional folding which possesses the nature of buckling. The initial stage of buckling is characterized by a considerable amount of shortening due to layer-parallel shortening that is responsible for the PCB origin. The shortening was caused by remote stress in front of the ongoing collision between ALCAPA and the

European Platform affecting the Silesian Basin, estimated to have occurred between 23 and 26 Ma.

The results of mechanical modelling and stratigraphic constraints suggest that PCB formed at shallow burial depths (below 1 km), corresponding to observed contemporary stratigraphic overburden. The estimated yielding strength of the Otryt sandstone during deformation ranges from 10 to 20 MPa. The formation of PCB was facilitated by favourable lithological and stress conditions, including intermediate porosity (around 20%), poor induration, water saturation, and a thrust fault stress regime. The results of studies on diagenesis support the early formation of the deformation bands as well. The pure compaction bands formation was followed by regional back-thrusting. The occurrence of hydrocarbons and calcite veins within some fractured PCB indicates that PCB might have played a significant role in fluid transport during the subsequent evolution of the fold-and-thrust belt of the Outer Carpathians. Additionally, they have relevance in present-day reservoir studies, considering the proximity of the PCB occurrence to local oil fields.

Keywords: *strain, diagenesis, microstructure, tectonics, fold-and-thrust belt, Outer Carpathians*

Geneza wstęg deformacyjnych w płaszczynie śląskiej (Polska pld.-wsch.)

mgr inż. Piotr Strzelecki

Streszczenie

Wstęgi deformacyjne to drobne struktury deformacyjne, które powstają w skałach ziarnistych. Posiadają postać wąskich, tabularnych stref oraz dostarczają istotnych informacji na temat mechanizmów i warunków deformacji kształtujących górną skorupę ziemską. Celem przeprowadzonych badań było określenie genezy wstęg deformacyjnych oraz odtworzenie warunków deformacji w południowo-wschodniej części płaszczyny śląskiej, w polskim segmencie Karpat zewnętrznych. Obszar prezentowanych badań obejmował centralne synklinorium karpackie gdzie rozpoznano wstęgi deformacyjne w piaskowcach oligoceńskich. Badania obejmowały prace terenowe, analizę strukturalną oraz badania mikroskopowe, w tym mikroskopię w świetle przechodzącym, katodoluminescencję i mikroskopię elektronową. Przeprowadzono również dodatkowe badania geochemiczne ukierunkowane na skład izotopowy cementów kalcytowych oraz mikrotomografie komputerową. Dane dotyczące wstęg deformacyjnych poddano technikom eksploracji danych w celu rozpoznania trendów oraz przeprowadzono analizy statystyczne.

Wyróżniono dwa kinematyczne typy wstęg deformacyjnych: wstęgi ze ścinania oraz wstęgi kompakcyjne. Pierwszy typ wstęg występuje lokalnie i jest związany z fałdowaniem fałdów drugiego rzędu. W przypadku wstęg kompakcyjnych stwierdzono, że ich występowanie ma zasięg regionalny oraz, że stanowią one większość wstęg deformacyjnych na obszarze badawczym. Wstęgi kompakcyjne to wstęgi deformacyjne, które przede wszystkim lokalizują nieelastyczne odkształcenia kompresyjne. Tworzą się prostopadle do głównego kierunku skracania. Naturalnie występujące wstęgi kompakcyjne do tej pory udokumentowano zaledwie w kilku lokalizacjach na świecie. Ich liczne występowanie na badanym obszarze umożliwiło zaproponowanie nowego modelu powstawania wstęg kompakcyjnych.

Wstęgi kompakcyjne zostały znalezione w oligoceńskiej sekwencji fliszowej warstw krośnieńskich dolnych, w obrębie piaskowców otryckich. Wstęgi kompakcyjne są prostopadłe do uławicenia. Występują w piaskowcach o uziarnieniu od drobno- do gruboziarnistym oraz umiarkowanym lub słabym wysortowaniu. Odległość między poszczególnymi wstęgami wynosi od 2 do 20 mm, a typowa grubość pojedynczej wstęgi wynosi poniżej 1 mm. Mikrostruktura wstęg deformacyjnych jest zróżnicowana i powstała w wyniku różnych mechanizmów, w tym kolapsu przestrzeni porowej prowadzącej do lepszego upakowania ziaren, dezagregacji, mikrofałdowanie oraz kataklazę ziaren.

Odtworzenie pierwotnej orientacji warstw wskazuje, że wstęgi kompakcyjne powstały przed fałdowaniem. Zarejestrowały one SW-NE kierunek skracania, który jest zgodny z późniejszym kierunkiem fałdowania. Wstęgi kompakcyjne powstały na początkowym etapie regionalnego fałdowania, które tu miało charakter fałdowania z wyboczenia. Początkowy etap tego typu fałdowania charakteryzuje się znacznym

horyzontalnym skróceniem warstw, które jest bezpośrednio odpowiedzialne za powstanie wstęg kompakcyjnych. Skrócenie to było spowodowane naprężeniem kompresyjnym w basenie śląskim, około 23-26 milionów lat temu. W tym czasie basen znajdował się na przedpolu postępującego frontu orogenicznego wynikającego z kolizji pomiędzy ALCAPĄ i platformą europejską.

Wyniki modelowania mechanicznego i przesłanki stratygraficzne sugerują, że wstęgi kompakcyjne powstały na niewielkich głębokościach pogrzebienia tj. poniżej 1 km nakładu, a szacowana granica plastyczności piaskowca otryckiego wynosiła od 10 do 20 MPa. W badanym fragmencie płaszczowiny śląskiej ta wielkość nakładu jest zbliżona do współcześnie obserwowanej miąższości stratygraficznej warstw występujących ponad badanymi piaskowcami otryckimi. Powstanie wstęg kompakcyjnych było możliwe dzięki sprzyjającym warunkom litologiczno-tektonicznym. Złożyły się na nie: umiarkowana porowatość (ok. 20%), słabe utwardzenie, nasyceniem wodą oraz tektoniczna kompresja. Wczesne powstanie wstęg deformacyjnych na badanym obszarze potwierdzają również badania diagenetyczne. Obecność węglowodorów i żył kalcytu w niektórych spękanych wstęgach deformacyjnych wskazuje, że mogły one odgrywać istotną rolę w transporcie płynów podczas dalszej ewolucji pasa fałdowego-nasuwczego Karpat zewnętrznych. Dodatkowo, mają one znaczenie w badaniach właściwości zbiornikowych skał, w których należy uwzględnić bliskości występowania wstęg kompakcyjnych w stosunku do lokalnych złóż ropy naftowej.

Słowa kluczowe: *odkształcenie, diagenеза, mikrostruktura, tektonika, pas fałdowo-nasuwczy, Karpaty zewnętrzne*