

## МИКРОДЕФОРМАЦИИ КВАРЦА КАРБОНОВЫХ ПЕСЧАНИКОВ ДОНБАСА

В.А. Баранов

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины,  
Днепропетровск, Украина

Темой исследований является процесс формирования разных видов пластических микродеформаций в кварце песчаников Донбасса на разных подстадиях катагенеза. Цель исследований – установление возможности использования микронарушений для прогнозирования свойств исследованных песчаников, в частности выбросоопасности, степени преобразования, прочности, устойчивости, коллекторских свойств.

В результате выполненных работ установлено значительное количество пластических деформаций всех видов в обломочном кварце песчаников, ранее описанных в горных породах и минералах других регионов. В выбросоопасных песчаниках общее количество пластических микродеформаций существенно выше, чем в выбросоонеопасных. Кроме описанных ранее, выделено два новых вида деформаций – таблитчатый кварц и трансляционные линии скольжения. Указанные деформации могут использоваться как индикатор напряженного состояния в горных породах. Полученные результаты подтверждают мнение многих авторов о том, что структура вещества является чутким индикатором влияния внешних условий среды и отражает влияние температуры и давления в виде физико-химических изменений, происходящих при катагенетических преобразованиях.

Количественные параметры микронарушенности были запатентованы в виде двух способов определения выбросоопасности горных пород. Коэффициент нарушенности, как индикатор напряженного состояния пород, вошел составной частью в разрабатываемый метод комплексного прогноза выбросоопасности горных пород.

**Ключевые слова:** Донецкий угольный бассейн, песчаник, индикатор напряженного состояния, пластические деформации, полосы Бёма, трансляционные линии скольжения, таблитчатый кварц.

## QUARTZ MICRODEFORMATIONS IN CARBON SANDSTONES OF DONETS BASIN

V.A. Baranov

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics  
under the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Dnipropetrovsk, Ukraine

The research deals with the process of formation of various plastic microdeformations in the Donets Basin sandstone quartz at different catagenesis substages. The aim is to verify whether analysis of microdeformations may be applied to forecast the properties of the sandstone studied, in particular outburst hazard, hardness, stability, reservoir features.

The research revealed a number of plastic deformations of all types in sandstone's detrital quartz, that were previously found in rocks and minerals in other regions. In outburst-prone sandstones the total number of plastic deformations significantly surpasses that in nonhazardous sandstones. Besides those deformations described previously two new types were investigated, i.e. tabular quartz and translation glide lines. These two types may serve as an indicator of the stressed rock state. The results obtained confirm the opinion of many authors that a matter structure is a fine indicator of external conditions impact, reflect the influence of temperature and pressure in the form of physical and chemical modifications occurring during catagenetic transformations.

Quantitative values of microdeformation were patented as two techniques to determine rock outburst hazard. Deformation factor as an indicator of rock stresses state is included in the complex method of rock outburst hazard forecast.

**Keywords:** Donets Basin, sandstone, stressed state indicator, plastic deformations, Böhm lines, translation glide lines, tabular quartz.

Согласно классической теории прочности в механике существуют три главных типа деформации: упругая, пластическая и хрупкая. Поскольку физико-механические свойства являются важнейшими характеристиками минералов и пород, исследования формирования различных типов дефектов структуры в минералах и породах, условий их образования на разных стадиях катагенеза и влияния на свойства и состояние являются актуальной проблемой. В работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований разных видов пластических деформаций в породообразующем кварце осадочных пород Донбасса, что послужило основой для разработки новых показателей тектонических напряжений, выбросоопасности углей и песчанников, нарушенных зон в осадочных породах, а также других практических разработок<sup>1</sup>.

Микродеформации давно привлекали внимание ученых, приводивших подробные описания минералов и пород, полученные в результате оптических исследований. Так, немецкий петрограф А. Бём [1] в статье «О породах Векселя» при описании альбитового и хлоритового гнейса, кварцитового сланца неоднократно указывает на присутствие многочисленных цепочек газожидких включений. Эти цепочки были выявлены им в различных минералах, слагающих указанные породы: в кварце, мусковите, полевоом шпате. Позже описанные цепочки получили название «полосок Бёма», или же «бёмовской штриховки», и были от-

несены к пластическим деформациям. Причину образования цепочек ученые не объясняет, но говорит о большой тектонической дислоцированности описываемого района в Альпах. Породы, по его описанию, сильно перемяты, рассланцованы, имеют текстуры течения и кливажа, характеризуются складчатостью.

В конце XIX в. была опубликована обзорная работа В.И. Вернадского «Явления скольжения в минералах». В ней приведены описания пластических деформаций, которые проявляются в виде скольжения для нескольких десятков наиболее распространенных минералов. Ученый указывает на главную, по его мнению, причину возникновения скольжения: «...те места кварца, которые претерпели особенно сильное давление в породах, подверглись изменению и развили “двойниковые” пластинки, параллельно (1011) и (0111)». В результате анализа дается обобщенный вывод, указывающий, что при определенных термобарических процессах в минералах и породах в земной коре происходят пластические микродеформации, которые влияют на их прочность [2].

Начало XX в. ознаменовалось открытием X-лучей и радиоактивности, что позволило физикам создать новую теорию атомного строения вещества. Она объясняла много до той поры непонятных явлений, но не могла дать объективного ответа на вопрос, почему реальная прочность кристаллов на три порядка ниже расчетной. Объяснение и расчет теоретической прочности, согласно энергии сцепления атомов вещества, предложил в 20-х гг. XX в. Я.И. Френкель [3].

Для ликвидации большого расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями прочности в 1934 г. независимо друг от друга М. Поляни, Е. Орован и Г. Тейлор ввели представление о дислокациях как линейных подвижных дефектах в кристаллической решетке [4]. В последующем, используя созданный В.К. Зворыкиным [5] электрон-

<sup>1</sup> А.с. 1463936 СССР, МКИ E21F5/00. Способ определения выбросоопасности горных пород / В.Е. Забигаило, В.В. Лукинов, В.А. Баранов [и др.] (СССР). № 4292384/23-03; заявл. 30.07.1987; опубл. 07.03.1989, Бюл. № 9; А.с. 1752982 СССР, МКИ E21F5/00. Способ определения выбросоопасности горных пород / В.Е. Забигаило, В.В. Лукинов, В.А. Баранов (СССР). № 4827067/03; заявл. 21.05.1990; опубл. 07.08.1992. Бюл. № 29.

ный микроскоп, А. Коттрел [6], В. Рид [7], Н. Картер и др. [8] развили теорию деформаций в кристаллах, дали определения дислокации, а также представили геометрическую, энергетическую и математическую модели образования и развития микроструктурных неоднородностей в кристаллическом веществе. Было определено, что плотность в среднем составляет  $10^4$ – $10^6$  дислокаций на квадратный сантиметр, этот показатель определяет разные физико-механические свойства кристаллов, в первую очередь прочность.

В работах [9–11] даются подробные обзоры работ, направленных на изучение пластических деформаций в различных веществах, а также описание основных разновидностей указанных дефектов структуры: иррациональное двойникование, пластинкование, полосы и пояса деформации, «смятие» и др. Сдвиг или скольжение – типичное проявление пластической деформации. В результате скольжения на поверхности кристалла (или на его срезе) появляются системы полос, которые можно наблюдать при небольших увеличениях. Эти полосы и представляют собой выходы (следы) плоскостей скольжения отдельных кристаллических пластин (ламелей) друг относительно друга.

В 1964 г. Н. Картер с соавторами [8] создали установку объемного сжатия образцов породы и экспериментально получили пластические деформации минералов песчаника. Согласно их выводам при определенных термобарических условиях в кварцевых зернах проявляются пластические деформации в виде пластинок, поясов и волнистого угасания, такие же, как в естественно деформированных образцах. Направление образования деформационного пластинкования и деформационных поясов, расположенных субпараллельно оси *C*, исследователи связывают со скольжением по (0001), а другие направления – с более сложными механизмами скольжения.

Существует несколько классификаций микроструктурных деформаций. В данной статье была взята за основу классификация авторов [11] как наиболее полная применительно к кварцу. По их мнению, в зернах обломочного кварца осадочных пород проявления пластической деформации встречаются достаточно редко. Отсюда следует, что исследованные ими шокшинские кварцитопесчаники являются метаморфическими породами, с чем трудно согласиться. Г.Н. Юрель с соавторами [12] установили наличие пластических деформаций в минералах песчаников Донбасса, не выделяя их виды.

В работах [13, 14] приводятся фактические материалы преобразования песчаников на разных подстадиях катагенеза, на разных современных глубинах. Указывается, что по мере погружения песчаников кварцевое вещество претерпевает трансформацию под действием разных агентов, в том числе пластической деформации, гравитационного и других воздействий. В результате этих преобразований меняются форма и размер обломочных зерен без разрушения кристаллической структуры.

Несмотря на некоторое внимание отдельных геологов к проявлению разного рода деформаций в кварце на подстадиях катагенеза, должного развития указанные результаты не получили. Работы разных авторов в области вторичных преобразований осадочных пород вообще и песчаников – как главных коллекторов углеводородов – в частности редко выходят за рамки минералогических, коллекторских и физико-механических результатов исследований как в России [15–20], так и за рубежом [21–23].

С начала 80-х гг. XX столетия в Институте геотехнической механики НАН Украины проводятся детальные исследования микроструктурных деформаций породообразующего кварца и других минералов песчаников нижнего и среднего карбона Донецкого бассейна в связи с необходимостью прогноза газодинамических явлений – выбросов песчаников

и газа, образования заколов, деления керн опережающих скважин на выпукло-вогнутые диски [24–26]. Поскольку среди исследователей нет единого мнения по проблеме разделения осадочных пород на стадии и подстадии литогенеза, за основу взята шкала, изложенная в «Справочнике по литологии» (1983).

Районом исследования является Донецкий угольный бассейн, расположенный на южной окраине Восточно-Европейской платформы в пределах Украины и Российской Федерации [27]. Его палеозойские образования нарушены разнородными дислокациями и перекрываются мезозойскими и кайнозойскими отложениями. Породы докембрия являются фундаментом осадочной толщи и выходят на поверхность в приазовской части Украинского щита. В центральной части бассейна они погружены на глубину до 18–23 км. К региональным геологическим закономерностям относится увеличение мощности отложений, степени катагенеза и углефикации органики от прибортовых районов к центральным и в направлении СЗ–ЮВ. Продуктивная терригенная толща карбона сложена песчаниками, алевролитами и аргиллитами, с переслаиванием маломощных, но часто встречающихся известняков, угольных пластов и пропластков. В зависимости от стратиграфического положения и степени катагенеза угольные пласты представлены всеми марками углефикации от длиннопламенных до антрацитов. Глубина горных выработок на шахтах достигла 1300–1400 м, температура пород на таких глубинах составляет 43–46 °С, а открытая пористость ( $K_{o,п}$ ) – 4–8 %. Большинство действующих шахт являются газоносными, опасными по выбросам угля и газа, пород, горным ударам, самовозгоранию, взрыву пыли и другим негативным явлениям. Основное количество добываемого угля приходится на наиболее продуктивные отложения среднего карбона ( $C_2^5$ ,  $C_2^6$ ,  $C_2^7$ ).

С середины 50-х гг. XX века на шахтах данного угольного бассейна стали происходить выбросы песчаника. Поскольку эти породы отличаются повышенной прочностью, в них закладывается большинство подготовительных горных выработок. Выбросы песчаника замедляют проведение выработок, увеличивают стоимость горных работ и, в конечном счете, угля. Для решения проблем прогноза выбросоопасности песчаников, определения физико-механических и коллекторских свойств в забоях горных выработок и из керн геолого-разведочных скважин на шахтах Донбасса были отобраны образцы песчаников среднего карбона в зонах распространения угля марок Г, Ж, К, ОС, Т в девяти геолого-промышленных районах (рис. 1). Условия геологического развития, тектоническая дислоцированность и степень катагенетических преобразований в них существенно отличаются между собой. Минимальная глубина отбора проб составляла около 500 м, максимальная – около 1500 м.



Рис. 1. Схема расположения Донецкого угольного бассейна

Исследовались шлифы, аншлифы, плоскопараллельные пластинки без покровного стекла, толщина которых соизмерима со средним диаметром породообразующих зерен. Образцы изучались с помощью микроскопов ПОЛАМ-Р111, МИМ-7, МБС-1 при увеличениях от  $10^{\times}$  до  $1000^{\times}$  в проходящем и отраженном све-

те, в иммерсионной жидкости и при боковом освещении. Наиболее информативные объекты фотографировались. В процессе исследований в породообразующем кварце опробованных песчаников изученных районов были установлены пластичные микродеформации всех описанных ранее в литературе видов [24].

**Полоски Бёма** (бёмовская штриховка). Этот вид деформаций выделяется не всеми исследователями, но в результате большого распространения его в кварце песчаников Донбасса (около 80 % от общего объема всех установленных видов) было решено описать его отдельно. Полоски Бёма представляют собой плоскости скольжения в минералах, возникшие в результате микродвига на атомарном уровне (6,8–10) и декорированные газождкими включениями (рис. 2). В процессе реализации литостатических и тектонических напряжений происходило нарушение структуры обломочных минералов и проникновение газов и растворов в образовавшиеся микродеформации ( $\sigma_{сж}$  песчаников Донбасса от 75 до 140 МПа [28]). В исследуемом кварце полоски Бёма представлены в основном субпараллельными системами, с разным количеством полос на единицу площади или объема, в зависимости от степени катагенеза и тектонического воздействия. В одном зерне может быть до 2–5 систем полосок, ориентированных друг относительно друга под углами от 5–10 до 80–90°. Видимая ширина полосок Бёма непостоянна, зависит от угла наклона плоскости скольжения к плоскости среза или скола препарата. Минимальная ширина, которая отображает действительный размер, типична для случаев, когда плоскость скольжения перпендикулярна плоскости среза (скола). Количество зерен с полосками Бёма закономерно увеличивается в песчаниках от раннего до среднего катагенеза. В отложениях позднего катагенеза происходит уменьшение их количества.

В среднем и начале позднего катагенеза в кварцевых зернах песчаников парал-

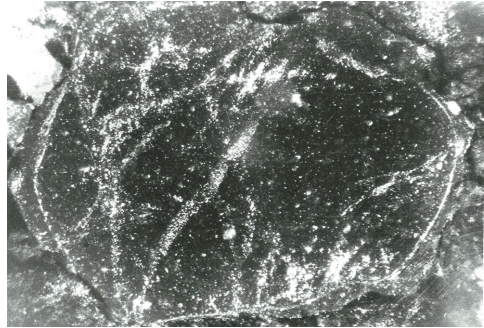


Рис. 2. Полоски Бёма в зерне кварца и регенерационная каемка. Боковое освещение, проходящий свет. Увеличение 100<sup>×</sup>

лельно происходит дифференциация газождких включений. Плоскость скольжения с увеличением степени катагенеза песчаников превращается в пластинку деформации, которая имеет более выраженное третье измерение (толщину) и морфологически характеризуется изменением рельефа (рис. 3). Цепочка газождких включений разрывается, дифференцируется, большие включения под действием повышающегося давления и температуры распадаются на более мелкие.

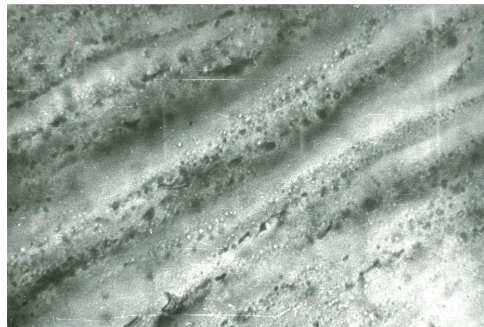


Рис. 3. Дифференциация полосок Бёма. Проходящий свет, иммерсия. Увеличение 1000<sup>×</sup>

Иными словами, в результате повышения степени катагенеза идет перестройка структуры кварцевых зерен с существенным изменением внутренней энергии в сторону стабилизации. Подобный механизм структурирования и стабилизации энергетического состояния вещества посредством его измельчения



смоделирован в лабораторных условиях и описан в работах [28, 29].

Параллельно с процессом дифференциации в кварце песчаников средней стадии катагенеза отмечается процесс группирования. Он заключается в концентрации полосок Бёма (рис. 4), приводящей к образованию зон микронарушений, расположенных преимущественно на перифериях зерен.

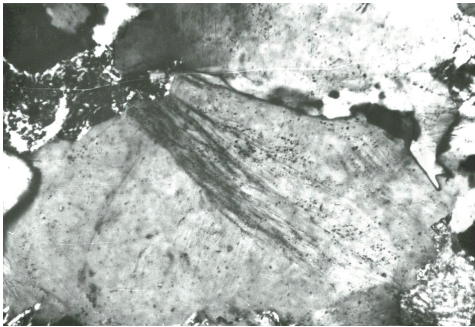


Рис. 4. Концентрация полосок Бёма на краю зерна. Боковое освещение. Увеличение 250<sup>х</sup>

Поздняя стадия катагенеза характеризуется блочностью, мозаичностью и, в итоге, процессами грануляции с превращением песчаников в кварцито-песчаники (рис. 5).

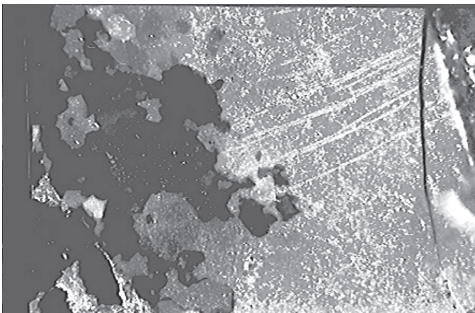


Рис. 5. Начало процесса блокивания и грануляции. Боковое освещение. Увеличение 250<sup>х</sup>

Эволюцию микродеформаций в объекте исследований можно представить в следующей последовательности согласно онтогенезу: накопление полосок Бёма в зернах кварца в результате термобарических воздействий; последующая

их дифференциация, концентрация в периферийных участках зерен; блокивание, развитие которого происходит по плоскостям скольжения; самоочищение зерен и микроблоков зерен; образование кварцитовидных участков. Преобладающее развитие полосок Бёма в кварцевых зернах песчаников Донбасса можно объяснить повышенным содержанием газов, образующихся в процессе углефикации органических отложений. Газ, находящийся в порах песчаников под большим давлением, может проникать в зоны развития пластических деформаций, а в период раскрытия системы время диффузии достигает нескольких минут [7, 30].

**Пластинки деформации.** Этот вид деформации встречается в кварце песчаников Донбасса сравнительно редко в крупно- и грубозернистых песчаниках с повышенным содержанием обломочного кварца и слабой отсортированностью. В шлифах пластинки имеют вид одиночных узких (примерно 0,001–0,01 мм) полос, реже 2–3 субпараллельные полосы примерно одинаковой ширины. Иногда наблюдаются две системы пластинок деформации, расположенные, как правило, под большим углом – 70–90° (рис. 6).

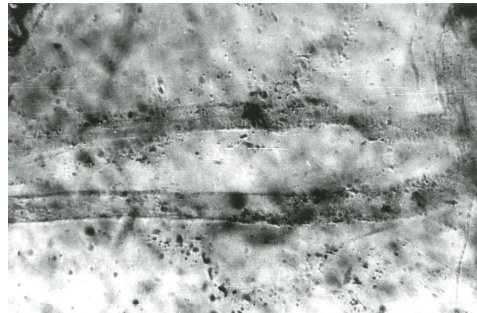


Рис. 6. Пластинки деформации с четкими границами. Проходящий свет. Увеличение 500<sup>х</sup>

По показателю преломления они отличаются от вмещающего зерна на 0,04–0,06, четкая кристаллографическая ориентация отсутствует, а угол наклона пластинок к оптической оси зерна изменяется в широких пределах – от 0 до 90°.

Пластинкование иногда происходит на участке изгиба зерна (рис. 7), часто представленном тонкой штриховкой полос скольжения, расположенных перпендикулярно пластинке и, как правило, декорированных мельчайшими газожидкими включениями. Штриховка вызывает волнистое угасание всего участка изгиба. Пластинка отличается от вмещающего зерна по углу погасания незначительно – до 10–15°, в сечении имеет обычно прямолинейную форму. Пластинки, образовавшиеся на участках изгиба зерен, не имеют четких границ, а возникшие на участках, не испытавших изгиб, имеют четкие границы, часто декорированы газожидкими включениями. Форма их обычно прямолинейная, но иногда бывает в виде искривленных, веерообразных разветвлений.

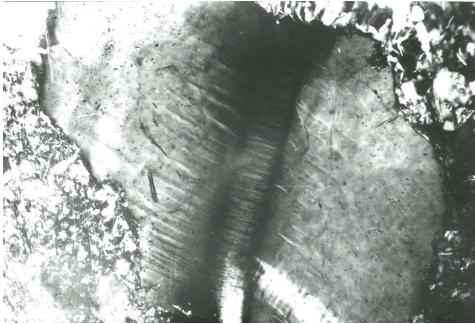


Рис. 7. Пластинки деформации в месте изгиба зерна. Боковое освещение. Увеличение 250<sup>х</sup>

**«Смятый» кварц.** «Смятый» кварц представляет собой, по мнению М.Я. Каца, И.М. Симановича [11], комбинацию деформационных поясов, блочности и волнистого угасания, в результате чего образуется сложная, смятая, часто решетчатая картина. Деформации такого вида выявлены в кварцевых зернах песчаников Донбасса из Центрального геолого-промышленного района (рис. 8), где установлены наиболее значительные горизонтальные и вертикальные тектонические напряжения [5]. Следует указать, что этот вид деформации характерен для кварцито-подобных участков песчаников, имеющих

грубо- или среднезернистую структуру с минимальным содержанием цемента. Зерна деформированного кварца часто напоминают микроклин с двойниковой решеткой неправильной формы с разницей в том, что пояса деформации, создающие решетчатый вид, имеют волнисто-зигзаговидную форму, отображающую наличие большого количества микросдвигов разной величины. Размеры, формы и оптические константы этого вида не имеют принципиального отличия от описанных раньше.

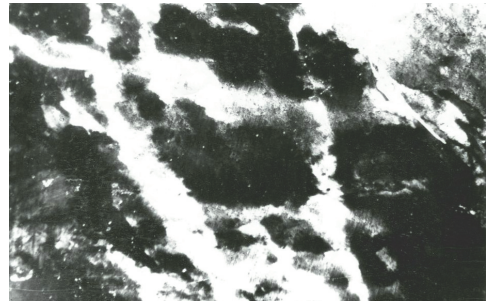


Рис. 8. «Смятый» кварц. Проходящий свет. Увеличение 250<sup>х</sup>

**Иррациональное двойникование,** описанное сначала в соли [31], а затем в кварце [11], представляет собой разновидность деформационного пластинкования. Разница заключается в том, что деформационные пластинки не отличаются между собой по оптической ориентировке и гаснут одновременно при вращении столика микроскопа, а иррациональные двойники имеют разные углы погасания, что хорошо видно на рис. 9.

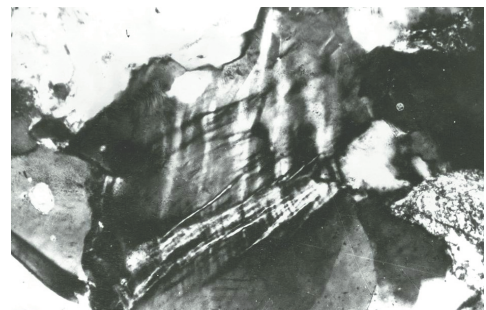


Рис. 9. Иррациональное двойникование. Проходящий свет. Увеличение 250<sup>х</sup>

К этому можно прибавить неоднородность и разницу углов погасания даже в пределах одной пластинки деформации, которая относится к системе, образующей иррациональное двойникование. Объяснить такое явление можно разной степенью поворота одной части пластинки относительно другой или значительной дифференциацией напряжений в зонах деформаций.

Для данного вида деформации характерна системность, нередко развиты две системы, расположенные обычно под углами  $50\text{--}70^\circ$ , газожидкие включения им не свойственны. Это двойникование часто встречается в сочетании с другими видами деформации – «смятым» кварцем, деформационными поясами, волнистым угасанием. Иррациональные двойники, как и пластины деформации, разделяются плоскостями, выходы которых на поверхность препарата различаются повышенным рельефом. Часто наблюдается расплывчатость их границ, в таких случаях описанный вид деформации сложно однозначно отличить от других, например «смятого» кварца. Характерной особенностью рассматриваемого вида являются веретенообразные, расщепленные, линзовидные и вогнутые формы, сочетание которых вызывает образование большого количества деформационных фигур. Углы разориентировки отдельных двойников незначительны (до  $5\text{--}6^\circ$ ), угасание плавное, идентичное волнистому.

**Полосы деформации и деформационные пояса.** Основные отличительные признаки этого вида деформаций – размеры. Это сравнительно большие структурные деформации шириной до 0,2 мм со средним расстоянием между ними более чем 0,25 мм. Данный вид характерен для жильного кварца в кварцитопесчаниках Урала. Для Донбасса он не свойственен, однако в кварцевых гравелитах Донецко-Макеевского района подобные структуры были отмечены в нескольких зернах. Деформационные пояса по форме

подобны пластинкам деформации. Отличие заключается в том, что они пересекают всё зерно, угол их оптической ориентации значительно отличается от такового для вмещающего зерна; границы их в основном зубчатые, неровные, а зерна кварца с ними часто напоминают двойники плагиоклаза (рис. 10). Такие структуры встречаются в грубозернистых песчаниках с содержанием кварца 70–80 %, в зерне, как правило, наблюдается не более одного пояса деформации, что характеризует и выдержанность параметров. Газожидкие включения на границах вмещающего зерна с поясами деформации встречаются редко, толщина их колеблется в пределах 0,01–0,1 мм.

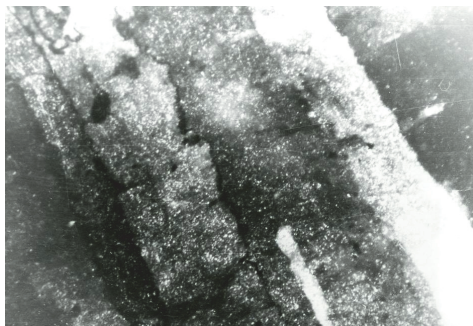


Рис. 10. Деформационные пояса. Проходящий свет. Увеличение 250 $\times$

В процессе исследований в кварце песчаников Донбасса было установлено два новых вида деформаций: **трансляционные линии скольжения** и **таблитчатый кварц**, характерные для выбросоопасных песчаников (рис. 11).

Отличительным признаком трансляционных линий скольжения является наличие системы субпараллельно ориентированных плоскостей пластических деформаций, пересекающих как кварцевые зерна, так и другие минеральные обломки и цемент, без видимого смещения на границах зерно – зерно или зерно – цемент. Расстояния между линиями скольжения сравнительно выдержанные и составляют в среднем 20–30 мкм. Трансля-



ционные линии скольжения существенно влияют на прочность породы. Так, при легком нажатии на поверхность препарата по плоскостям пластических деформаций образуются трещины характерного волнообразного вида.



Рис. 11. Трансляционные линии скольжения и начало трещинообразования по ним. Боковое освещение. Увеличение 250<sup>х</sup>

Следует отметить, что вид описываемой деформации хорошо идентифицируется при боковом освещении и только после образования трещин последние можно наблюдать в проходящем и отраженном свете. Интересен факт трансляции плоскостей скольжения через зерна кварца, полевого шпата, слюды, цемент без заметного смещения, несмотря на разницу в прочности или другие свойства минералов и цементирующей массы. Данный вид деформации возникает в песчаниках при высоких однонаправленных литостатических или тектонических напряжениях. Подобные условия известны в горной науке, это образование выпукло-вогнутых дисков из керна опережающих скважин, пробуренных в трех взаимно перпендикулярных направлениях в выбросоопасных песчаниках. Процесс был смоделирован в лабораторных условиях [28] и показал, что при внешних нагрузках более чем 130–150 МПа дискообразование может происходить не только в кварцевых песчаниках, но и в других породах. Было отмечено, что при разделении керна на диски скалывание происходит по кварцевым зернам и це-

менту без видимого смещения, несмотря на разницу в прочности. Таким образом, следствие стало известно раньше причины, которой является возникновение пластических деформаций в виде трансляционных линий скольжения. Сравнение с текстурными признаками показывает, что описанные деформации не имеют генетической связи со слоистостью песчаников. Они так же, как и диски керна скважин, «чешуя» и пластинки песчаников, после выбросов пород в шахтах образуются независимо от текстурных признаков. Трещины по плоскостям скольжения указывают на прямую причинную связь хрупкой деформации с описанным видом пластической деформации.

**Таблитчатый кварц**, как и трансляционные линии скольжения, был установлен в выбросоопасном песчанике некоторых шахт Донбасса. Внешне этот вид деформации подобен характерной решетке микроклина, угол между плоскостями скольжения колеблется в пределах 88–90°. Расстояния между ними выдержаны и соизмеримы с подобными в случаях трансляционного скольжения (рис. 12).

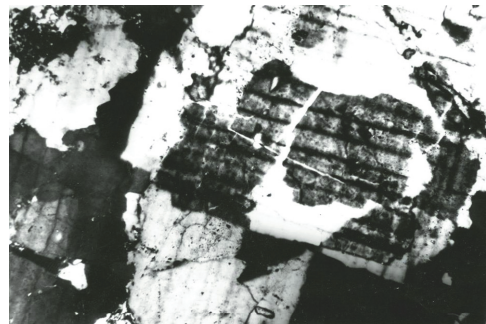


Рис. 12. Таблитчатый кварц. Боковое освещение. Увеличение 250<sup>х</sup>

Микротрещины, развивающиеся по плоскостям скольжения, часто отклоняются от взаимно перпендикулярных направлений на углы от 60 до 90°, что вызывает образование хрупкого разруше-

ния, по форме напоминающего елку. Эти микротрещины разбивают зерно на отдельные микроблоки в виде прямоугольников, ромбов, параллелограммов, имеющих размеры, соизмеримые с расстояниями между плоскостями скольжения, в среднем 20–30 мк. Главное условие формирования таблитчатого кварца заключается в наличии двух направлений сжатия, расположенных перпендикулярно друг к другу или под несколько меньшим углом. Это можно объяснить существованием двух основных направлений прилагаемых нагрузок, приблизительно одинаковых по величине. Описанные пластические деформации являются следствием повышенных тектонических напряжений и могут быть использованы в качестве своеобразного природного индикатора напряжений.

В результате проведенных исследований установлено широкое развитие всех описанных ранее видов пластических деформаций в породообразующем кварце карбоновых песчаников Донбасса. Выделено и описано два новых вида микродеформаций – трансляционные линии скольжения и таблитчатый кварц. Сопоставление данных проведенных исследований с результатами, полученными другими авторами, позволяет предложить следующую схему образования и преобразования пластических деформаций обломочного кварца в песчаниках Донбасса на подстадиях катагенеза:

1. Образование деформаций в виде одиночных плоскостей скольжения, зон или систем плоскостей скольжения, нескольких систем плоскостей скольжения (МК<sub>1</sub>–МК<sub>4</sub>).

2. Диффузия флюидов, находящихся в порах вмещающей породы, в образова-

нные микроструктурные нарушения и последующая их консервация (МК<sub>2</sub>–МК<sub>3</sub>).

3. Преобразование полосок Бёма и газожидких включений, декорирующих плоскости скольжения, происходящее параллельно с увеличением степени катагенеза и тектонических напряжений: а) дифференциация газожидких включений; б) преобразование плоскости скольжения в пластинку деформации, характеризующееся отсутствием четких ограничивающих плоскостей и наличием большого количества очень мелких газожидких включений; в) концентрация полосок Бёма в зоны, расположенные в периферийных частях зерен кварца; г) изменение формы включений от изометричной лапчатой к геометрически правильной (МК<sub>3</sub>–МК<sub>5</sub>).

4. Образование полос и поясов деформации, иррационального двойникования, «смятия», мозаичности, трансляционных линий скольжения и таблитчатого кварца параллельно с п. 3 (МК<sub>3</sub>–МК<sub>5</sub>).

5. Процессы самоочищения микроблоков кварцевых зерен, аннигиляция структурных деформаций, блокирование, «смятие», мозаичность, грануляция (МК<sub>3</sub>–АК<sub>2</sub>).

6. Преобразование песчаника в кварцитопесчаник, блокирование, самоочищение, грануляция (АК<sub>1</sub>–АК<sub>4</sub>).

Следовательно, структурные преобразования в минералах происходят постоянно, в зависимости от меняющихся термобарических условий и тектонических давлений. По этой причине структурные микродеформации используются в качестве количественных критериев степени тектонических напряжений, катагенетических преобразований, прогноза газодинамических явлений, коллекторских и физико-механических свойств.

#### Список литературы

1. Böhm A. Tschermarks mineralogische und petrographische Mitteilungen. – Wien, 1883. – Vol. 5, № 204. – P. 197–214.
2. Вернадский В.И. Явления скольжения кристаллического вещества. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1897. – 182 с.
3. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей // Собр. избр. тр. – М; Л.: Изд-во АН СССР, 1959. – 480 с.
4. Бюрен Х.Г. ван. Дефекты в кристаллах: пер. с англ. – М.: Иностр. лит-ра, 1962. – 584 с.
5. Большая советская энциклопедия. – М.: Сов. энцикл., 1972. – Т. 9. – 622 с.

6. Коттрел А. Теория дислокаций. – М.: Мир, 1969. – 96 с.
7. Рид В.Т. Дислокации в кристаллах. – М.: Metallurgizdat, 1957. – 280 с.
8. Carter N.L., Christie J.M., Griggs D.T. Experimental deformation and recrystallisation of quartz // *J. Geol.* – 1964. – Vol. 72, № 7. – P. 687–733.
9. Елисеев Н.А. Основы структурной петрологии. – Л.: Наука, 1967. – 258 с.
10. Классен-Неклюдова М.В. Механическое двойникование кристаллов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 261 с.
11. Кац М.Я., Симанович И.М. Кварц кристаллических горных пород. – М.: Наука, 1974. – 230 с.
12. Юрель Г.И., Старвогин А.И., Иванова Я.И. Микропреобразование песчаников различных литогенетических типов при высоких поровых давлениях // *Литология и полезные ископаемые.* – 1986. – № 6. – С. 100–112.
13. Плюснина И.И., Махус М., Химичева Н.В. Эволюция кварца песчаников сахарской плиты // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология.* – 1990. – № 1. – С. 16–25.
14. Еремеев Н.В., Еремеев В.В. Постседиментационные преобразования и изменения коллекторских свойств мезозойских отложений севера Западной Сибири // *Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол.* – 2008. – Т. 83, вып. 4. – С. 61–72.
15. Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н. Особенности накопления и преобразования глинистых минералов в осадочном чехле земной коры (в связи с проблемой литологических исследований для прогнозирования и поисков полезных ископаемых) // *Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол.* – 2008. – Т. 83, вып. 2. – С. 61–74.
16. Половникова И.А., Огнев А.О. Физические свойства и катагенез осадочных пород // *Советская геология.* – 1990. – № 10. – С. 17–20.
17. Симанович И.М. Постседиментационный литогенез терригенных комплексов в складчатых областях: структуры пород и кливаж // *Литология и полезные ископаемые.* – 2007. – № 1. – С. 84–92.
18. Холодов В.Н. О типах литогенеза и их современной интерпретации // *Литология и полезные ископаемые.* – 2010. – № 6. – С. 580–593.
19. Кузнецов В.Г. Взаимодействие биоты и осадконакопления в их эволюционном развитии – перспективное направление развития литологии // *Изв. вузов. Геология и разведка.* – 2011. – № 2. – С. 35–40.
20. Здобнова Е.Н. Особенности определения катагенетической преобразованности РОВ методом палеотемператур с использованием микроводорослей Tasmanites Newton // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений.* – 2009. – № 5. – С. 38–40.
21. Kinsley D.H., Doornkamp J. Atlas of quartz sand surface textures. – Cambridge Univ. Press, 1973. – 91 p.
22. Roedder E. Fluid inclusion evidens on the environments of sedimentary diagenesis a review // *SEPM. Special Publication*, 1979. – № 26. – P. 89–107.
23. Defects and their structure in nonmetallic solids / ed. by B. Henderson, A.E. Hughes. – New York; London: Plenum press, 1976. – 505 p.
24. Баранов В.А. Включения в кварце песчаников Донбасса, связанные со структурными микродеформациями // *Минералогический журнал.* – 1993. – № 6. – С. 33–38.
25. Баранов В.А. Некоторые актуальные проблемы угольной геологии // *Уголь.* – 2010. – № 11. – С. 62–64.
26. Баранов В.А. Прогноз выбросоопасности горных пород и нарушенных зон в углях Донбасса // *Горный журнал.* – 2009. – № 4. – С. 57–59.
27. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – Т. 1. – 1210 с.
28. Забигаило В.Е., Белый И.С. Геологические факторы разрушения зерна при бурении напряженных горных пород Донбасса. – Киев: Наук. думка, 1981. – 180 с.
29. Минералогическая энциклопедия. – Л.: Недра, 1985. – 512 с.
30. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. – М.: Мир, 1987. – Т. 1. – 560 с.
31. Степанов А.В., Донской А.В. Новый механизм пластического деформирования кристаллов // *Журнал техн. физики.* – 1954. – № 24, вып. 2. – С. 161.

#### References

1. Böhm A. Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen. Wien, 1883, vol. 5, no. 204, pp. 197–214.
2. Vernadskii V.I. Iavlennia skol'zheniia kristallicheskogo veshchestva [Phenomena of crystal substance gliding]. Moskovskii universitet, 1897. 182 p.
3. Frenkel' Ia.I. Kineticheskaia teoriia zhidkosteï [Kinetic theory of fluids]. *Sobranie izbrannykh trudov*. Moscow, Leningrad: Akademiia nauk SSSR, 1959. 480 p.
4. Biuren Kh.G. van. Defekty v kristallakh [Defects in crystals]. Moscow: Inostrannaia literatura, 1962. 584 p.
5. Bol'shaia sovetskaia entsiklopediia [Great Soviet Encyclopedia]. Moscow: Sovetskaia entsiklopediia, 1972, vol. 9. 622 p.
6. Kottrel A. Teoriia dislokatsii [Theory of dislocations]. Moscow: Mir, 1969. 96 p.
7. Rid V.T. Dislokatsii v kristallakh [Dislocations in crystals]. Moscow: Metallurgizdat, 1957. 280 p.
8. Carter N.L., Christie J.M., Griggs D.T. Experimental deformation and recrystallisation of quartz. *J. Geol.* 1964, vol. 72, no. 7, pp. 687–733.
9. Eliseev N.A. Osnovy strukturoi petrologii [Basics of structural petrology]. Leningrad: Nauka, 1967. 258 p.
10. Klassen-Nekliudova M.V. Mekhanicheskoe dvoimkovanie kristallov [Mechanical twinning of crystals]. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1960. 261 p.
11. Kats M.Ia., Simanovich I.M. Kvarts kristallicheskikh gornykh porod [Crystalline rock quartz]. Moscow: Nauka, 1974. 230 p.
12. Iurel' G.I., Stavrogina A.I., Ivanova Ia.I. Mikropreobrazovaniia peschanikov razlichnykh litogeneticheskikh tipov pri vysokikh porovykh davleniiah [Microtransformations of sandstones of different litogenetic types under high pore pressure]. *Litologia i poleznye iskopaemye*, 1986, no. 6, pp. 100–112.
13. Plusnina I.I., Makhus M., Khimicheva N.V. Evoliutsiia kvartsa peschanikov sakharskoi plity [Evolution of sandstone quartz on the Saharian Platform]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya*, 1990, no. 1, pp. 16–25.
14. Eremeev N.V., Eremeev V.V. Postsedimentatsionnye preobrazovaniia i izmeneniia kolektorskikh svoystv mezozoiskikh otlozhenii severa zapadnoi Sibiri [Postdepositional alterations and changes in reservoir properties of Mesozoic deposits of the northern part of West Siberia]. *Bulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologicheskii*, 2008, vol. 83, no. 4, pp. 61–72.
15. Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. Osobennosti nakopleniia i preobrazovaniia glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoi kory (v sviazi s problemoi litologicheskikh issledovaniï dlia prognozirovaniia i poiskov poleznykh iskopaemykh) [Specificity of accumulation and transformation of clay minerals in sedimentary cover of the Earth's crust (in relation with litologic research to forecast and explore mineral resources)]. *Bulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologicheskii*, 2008, vol. 83, no. 2, pp. 61–74.
16. Polovnikova I.A., Ognev A.O. Fizicheskie svoïstva i katagenoz osadochnykh porod [Physical properties and catagenesis of sedimentary rocks]. *Sovetskaia geologiya*, 1990, no. 10, pp. 17–20.
17. Simanovich I.M. Postsedimentatsionnyi litogenez terrigenykh kompleksov v skladchatykh oblastiakh: struktury porod i klivazh [Postdepositional lithogenesis of terrigenous complexes in folded area: rock structure and cleavage]. *Litologia i poleznye iskopaemye*, 2007, no. 1, pp. 84–92.
18. Kholodov V.N. O tipakh litogeneza i ikh sovremennoi interpretatsii [On types of lithogenesis and their modern interpretation]. *Litologia i poleznye iskopaemye*, 2010, no. 6, pp. 580–593.
19. Kuznetsov V.G. Vzaimodeistvie bioty i osadkonakopleniia v ikh evoliutsionnom razvitiï – perspektivnoe napravlenie razvitiia litologii [Interaction between biota and sedimentation in the evolutionary development as a promising direction of litology progress]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka*, 2011, no. 2, pp. 35–40.
20. Zdobnova E.N. Osobennosti opredeleniia katageneticheskoi preobrazovannosti ROV metodom paleotemperatur s ispol'zovaniem mikrovdoroslei Tasmanites Newton [Specificity of determining catagenetic maturation of DOM by paleotemperature method with help of microalgae Tasmanites Newton]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefiannykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2009, no. 5, pp. 38–40.

21. Krinsley D.H., Doornkamp J. Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge Univ. Press, 1973. 91 p.
22. Roedder E. Fluid inclusion evidens on the environments of sedimentary diagenesis a review. *SEPM. Special Publication*, 1979, no. 26, pp. 89–107.
23. Defects and their structure in nonmetallic solids. Ed. by B. Henderson, A.E. Hughes. New York, London: Plenum press, 1976. 505 p.
24. Baranov V.A. Vklucheniia v kvarce peschanikov Donbassa, svyazannye so strukturnymi mikrodeformatsiiami [Inclusions in sandstone quartz of the Donets Basin, related to structural microdeformations]. *Mineralogicheskii zhurnal*, 1993, no. 6, pp. 33–38.
25. Baranov V.A. Nekotorye aktual'nye problemy ugol'noi geologii [Certain topical issues in coal geology]. *Ugol'*, 2010, no. 11, pp. 62–64.
26. Baranov V.A. Prognoz vybrosoopasnosti gornyh porod i narushennyh zon v ugliakh Donbassa [Forecast of rock outburst hazard and fractured zones in the Donets Basin coals]. *Gornyi zhurnal*, 2009, no. 4, pp. 57–59.
27. Geologiya mestorozhdenii ugليا i goriuchikh slantsev SSSR [Geology of coal and oil shale fields in USSR]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1963, vol. 1. 1210 p.
28. Zabigajlo V.E., Belyj I.S. Geologicheskie faktory razrusheniia kerna pri burenii napriazhennykh gornyh porod Donbassa [Geological factors of core destruction in drilling stressed rocks of the Donets Basin]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 180 p.
29. Mineralogicheskaiia entsiklopediia [Mineralogical encyclopedia]. Leningrad: Nedra, 1985. 512 p.
30. Redder Je. Fluidnye vklucheniia v mineralakh [Fluid inclusions in minerals]. Moscow: Mir, 1987, vol. 1. 560 p.
31. Stepanov A.V., Donskoi A.V. Novyi mekhanizm plasticheskogo deformirovaniia kristallov [A new mechanism of plastic crystal deformation]. *Zhurnal tehnikeskoi fiziki*, 1954, vol. 24, no. 2, p. 161.

#### Об авторе

**Баранов Владимир Андреевич** (Днепропетровск, Украина) – доктор геологических наук, старший научный сотрудник Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, заведующий лабораторией (49005, г. Днепропетровск, ул. Симферопольская, 2а; e-mail: igtmnanu@yandex.ru, baranov-va@rambler.ru).

#### About the author

**Vladimir A. Baranov** (Dnepropetrovsk, Ukraine) – Doctor of Geological Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine (49005, Dnepropetrovsk, Simferopolskaya st., 2a; e-mail: igtmnanu@yandex.ru, baranov-va@rambler.ru).

Получено 01.08.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Баранов В.А. Микродеформации кварца карбоновых песчаников Донбасса // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело.* – 2014. – № 12. – С. 75–86. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.9.

Please cite this article in English as:

Baranov V.A. Quartz microdeformations in carbon sandstones of donets basin. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no. 12, pp. 75–86. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.9.