

родностей в металле и равномерности распределения его структурных характеристик.

Следовательно, применение вибрации при электродуговой сварке ведет к снижению градиентов остаточных напряжений в сварных соединениях, получению более однородной его структуры и может быть рекомендовано для повышения качества и долговечности работы горнотехнического оборудования. На основании данных выводов можно моделировать процесс управления повышения надежности сварных соединений горно-технического оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квагинидзе, В.С. Конструктивно-технологические мероприятия по повышению работоспособности сварных соединений металлоконструкций горно-транспортного оборудования / В.С. Квагинидзе, Н.Н. Чупейкина // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2011. – № 12. – С. 185-192.
2. Антонов, А.А. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов / А.А. Антонов, О.И. Стеклов, Ю.В. Сидорин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – №3. – С.13-18.
3. Штефан, В.В. Управление уровнем концентраторов механических напряжений деформированного состояния в стальных конструкциях / В.В. Штефан, А.В. Тентлер, В.Е. Подольский // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 7. – С. 61-64.
4. Tung, Ryan C. Estimating residual stress, curvature and boundary compliance of doubly clamped MEMS from their vibration response/ Tung, Ryan C.; Garg, Anurag; Kovacs, Andrew; Peroulis, Dimitrios; and Raman, Arvind // Birck and NCN Publications. – 2013. – Vol. 4. – pp. 1-14.
5. Летуновский, А.П. Снятие остаточных сварочных напряжений / А.П. Летуновский, Г.В. Новиков // Сфера Нефтегаз. – 2010. – №1. – С. 156-157.
6. Vibromechanic Way to Remove Residual Stresses / A.A. Korolev, A.V. Korolev, A.A.Fomin [and at]// Trans Tech Publications. – 2015. – Vol. 1064. – pp. 103-107.
7. К разработке концепции снижения остаточных напряжений в сварных соединениях при электронно-лучевой сварке, обусловленных термоупругими явлениями / Н.Д.Гайденок, Н.Ю.Серегин, Д.П.Савенков [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – № 3(49) – С. 169-174.
8. Труфанов, Н.А. Модели формирования полей технологических и остаточных напряжений в условиях релаксационного перехода / Н.А. Труфанов, О.Ю. Сметанников, А.Н. Труфанов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2011. – № 4(5). – С.2534-2536.
9. Антошина, Т.В. Влияние остаточных напряжений на устойчивость пластин, предварительно напряженных локальным термическим воздействием / Т.В. Антошина // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – 2009.. – №4. – С. 181-186.
10. Калмыков, М.А. Общие принципы описания процесса виброобработки с внешним источником динамического воздействия / М.А. Калмыков, В.Б. Струтинский, В.С. Щелоков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011.– №3(49). – С.45-49.

#### REFERENCES

1. Kvaginidze, V.S. and Chupeykina, N.N. (2011), “Constructive - technological measures to improve the performance of welded joints of steel structures of mining and transport equipment”, *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mine information - analytical bulletin] , no.12, pp. 185-192.
2. Antonov, A.A., Steklov, O.I. and Sidorin, Yu.V. (2012), “Research of technological residual stresses in welded joints of pipelines”, *Zagotovitelnye proizvodstva v mashynostroenii*, no. 3, pp.13-18.
3. Stefan, V.V., Tentler, A.V. and Podolsky, V.E. (2003), “Level management concentrators of mechanical stress strain state in structural steel”, *Kontrol. Diagnostika*, no.7, pp. 61-64.
4. Tung, Ryan C.; Garg, Anurag; Kovacs, Andrew; Peroulis, Dimitrios; and Raman, Arvind, (2013), "Estimating residual stress, curvature and boundary compliance of doubly clamped MEMS from their vibration response", *Birck and NCN Publications*, vol. 4, pp. 1-14.
5. Letunovskiy, A.P. and Novikov, G.V. (2010), “Removal of residual welding stresses”, *Sfera Nefte-*

gas, no. 1, pp. 156-157.

6. Korolev, A.A., Korolev, A.V., Fomin, A.A., Savran, S.A., Balaev, A.F and Yakovishin, A.S. (2015), "Vibromechanic Way to Remove Residual Stresses", *Trans Tech Publications*, vol. 1064, pp. 103-107.

7. Gaydenyuk, N.D., Seregin, N.Y., Savenkov, D.P. and Maytakova, A.V. (2013), "By developing the concept of reduction of residual stress in welded joints in electron beam welding caused by thermoelastic phenomena", *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerocosmicheskogo universiteta*, no.3(49), pp.169-174.

8. Trufanov, N.A., Smetannikov, O.J. and Trufanov, A.N. (2011), "Models of formation of fields of technology and in terms of residual stresses relaxation transition", *Bulletin Nijnegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, no. 4 (5), pp. 2534-2536.

9. Antoshina, T.V. (2009) "Influence of residual stresses on the stability of the plates, prestressed local thermal effect", *Zbirnik Naukovykh prats Ukrayinskogo naukovо-doslidnogo ta proektnogo instituta stalevykh konstruksiy imeni V.M. Shimanovskogo*, no.4, pp.181-186.

10. Kalmykov, M.A., Strutinskii, V.B. and Schelokov, V.S. (2011), "General principles of describing the process of vibratory processing with an external source of dynamic effects", *Vostochno – evropeysky jurnal peredovuch technology* [Eastern European Journal of advanced technologies], no.3 (49), pp. 45-49.

### Об авторах

**Макеев Сергей Юрьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С.Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, [smakeev@ukr.net](mailto:smakeev@ukr.net).

**Макеева Анна Сергеевна**, аспирант кафедры управления проектами Национальной металлургической академии Украины (НМетАУ), Днепропетровск, Украина, [sunflo@ukr.net](mailto:sunflo@ukr.net).

### About the authors

**Makeev Sergey Jurievich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [smakeev@ukr.net](mailto:smakeev@ukr.net)

**Makeieva Anna Sergeievna**, Doctoral Student, Department of Project Management National metallurgical academy of Ukraine ( NMetAU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [sunflo@ukr.net](mailto:sunflo@ukr.net).

**Анотація.** Метою статті є обґрунтування способу підвищення надійності гірничих машин шляхом зняття напружень у зварних швах, які є найбільш слабкою ланкою в зварних конструкціях гірничотехнічного обладнання. Багатьма дослідниками встановлено, що на якість зварного шва головним чином впливає його напружений стан. Завданням розробки є дослідження впливу вібраційної обробки на механічні властивості і перерозподіл залишкових напружень у зварних з'єднаннях гірничотехнічного обладнання, що виготовляються з конструкційних сталей. Для вирішення поставленого завдання виконано експериментальні роботи, в яких досліджувалися зварні з'єднання, отримані зварюванням СВЧ (струми високої частоти); електродуговою зварюванням без вібрації і з вібрацією в процесі зварювальних робіт. Методом магнітної пам'яті металу виконані заміри концентрації напружень в зварних з'єднаннях і отримані залежності зміни напружень по всій довжині досліджуваного зразка для трьох видів зварювання: струмами високої частоти (СВЧ), електродуговою і електродуговою з вібрацією. З отриманих залежностей встановлено, що напруги в зварному шві мінімальні при зварюванні з вібрацією. У двох інших випадках напруги в середньому вище в 2 рази (зварювання ТВЧ) і 4 рази (електродугова). Проведено дослідження структури поверхні шліфів для швів вищеперелічених зварних з'єднань і отримані 3D моделі їх поверхонь. Результати досліджень щодо зниження залишкових напружень у зварних з'єднаннях с застосуванням вібраційної обробки дозволяють рекомендувати її для підвищення якості та надійності гірничих машин. При застосуванні вібраційної обробки в 2-4 рази знижуються залишкові напруги в області зварного шва, в його структурі зменшується число різних неоднорідностей, що є осередками руйнування зварного з'єднання і призводять до передчасного виходу з ладу гірничого обладнання.

**Ключові слова:** залишкові напруги, вібраційна обробка, зварне з'єднання

**Abstract.** The key issue of the article is a study of ways for improving reliability of the mining equipment by removing the stresses from the welded joints, which are the weakest areas in the welded structures of the mining equipment. Many researchers have found that quality of a welded joint is mainly affected by its stressed state. The objective of the work was to study an impact of vibromechanical treatment on mechanical properties of and redistribution of residual stresses in the welded joints of the mining technical equipment made of structural steel. To solve the assigned task the experiments were performed in order to investigate the welded joints made by: HFC welding (high-frequency currents); and electric-arc welding with and without vibration during the welding operations. Stress concentration in the welded joints were measured by method of metal magnetic memory which showed dependences between the stress changes along the entire length of the test sample and the three types of welding: HFC welding, electric arc welding and electric arc welding with vibration. The obtained dependencies showed that stress in the welded joint was the lowest at welding with vibration. In two other cases, stress was, on average, twice higher at high frequency welding and 4 times higher at electric arc welding. Thin sections of the seam surfaces of the above mentioned types of welding joints were investigated, and 3D models of the joint surfaces were created. Results of the research of reducing the residual stresses in the welded joints have given the grounds to recommend the vibromechanical treatment for improving quality and reliability of the mining machines. Thanks to the vibromechanical treatment, residual stresses in the area of the welded seam reduces by 2-4 times, and number of different irregularities in the seam structure, which are the sites of the weld failure leading to premature failure of the mining equipment, essentially reduces.

**Keywords:** residual stress, vibromechanical treatment, welded joint.

*Статья поступила в редакцию 09.09.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым*

УДК 553.981.2: 550.4

**Антипович Я.В.**, аспирант  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ВЛИЯНИЕ ПАЛЕОГЛУБИНЫ НА ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КВАРЦЕ КАРБОНОВЫХ ПЕСЧАНИКОВ ДОНБАССА**

**Антипович Я.В.**, магістр, аспірант  
(ІГТМ НАН України)

## **ВПЛИВ ПАЛЕОГЛИБИНИ НА ПЕРЕТВОРЕННЯ ГАЗОВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У КВАРЦІ КАРБОНОВИХ ПІСКОВИКІВ ДОНБАСУ**

**Antipovich Y.V.**, Doctoral student  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **IMPACT OF PALEODEPTH ON TRANSFORMATION OF GAS INCLUSIONS IN QUARTZ OF DONBASS CARBONATE SANDSTONES**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования газовых включений в кварцевых зернах песчаников. С целью изучения влияния палеоглубины на преобразование данных включений использовались шлифы представленные песчаниками карбонового возраста, отобранными в районах распространения углей марок Д, Г, Ж и А. Шлифы исследовались под оптическим микроскопом при увеличении от 100 до 1200 крат.

В ходе исследования газовых включений кварцевых зерен песчаников особое внимание уделялось ранней и поздней стадии их преобразования (песчаники, вмещающие угли марок Д и А), что позволяет дополнить существующие данные и дать полную характеристику влияния палеоглубины на преобразование данных включений.

В результате сделаны выводы, что с палеоглубиной песчаников трансформируется форма включений, уменьшается их размер, стабилизируется давление во включениях, отвечающее тем условиям, в которых находится исследуемая порода в данный момент преобразований.

Данные исследования имеют определенный практический интерес, поскольку газовые включения могут служить индикатором степени преобразования пород и частично ответить на вопрос об изменении газовой составляющей закрытой пористости песчаников с увеличением температуры и давления в углепородном массиве.

**Ключевые слова:** палеоглубина, газовые включения, микротрещины, полосы Бёма.

Перспективным районом добычи угольного газа как попутного энергетического сырья является Донецкий бассейн. По разным оценкам общие ресурсы метана в угленосной толще Донбасса (на глубинах от 500 до 1800 м) составляют от 12 до 25 трлн. м<sup>3</sup>. По мнению ученых, объем и качество углеводородных газов в угленосной толще Донбасса позволяют рассматривать его в качестве газугольного месторождения, эксплуатация которого должна быть комплексной с целью снижения газовыделений в горные выработки шахт, а так же получения в промышленных масштабах нетрадиционного вида газового сырья [1, 2].

Для решения проблемы поисков и добычи угольного метана необходимы многогранные исследования условий образования и преобразования метановых

скоплений, формы нахождения метана в породах, качественный и количественный анализ пористости и проницаемости газосодержащих пород и ряд других задач.

В Донбассе основными коллекторами свободного газа являются песчаники. В отличие от коллекторов классических газовых месторождений они обладают повышенной плотностью и невысокими значениями пористости и проницаемости. Газ в песчаниках находится как в свободной фазе, в сообщающихся порах и трещинах, так и в замкнутых (закрытых) порах. Одной из форм нахождения газа в песчаниках являются включения в породообразующих зернах кварца. Включения представлены метаном (~ 60 %), углекислым газом (~ 30 %) и азотом (~ 10 %) [3].

Цель данной работы, заключается в исследовании влияния палеоглубины на преобразование газовых включений в кварцевых зернах пород посредством изучения шлифов песчаников, вмещающих угли различных марок.

Под палеоглубиной понимается максимальная глубина, которую достигла порода в процессе формирования осадочного бассейна, когда испытывала максимальные давления и температуру. Условно палеоглубина пород определяется по марке близлежащего угля и так же характеризует степень преобразования породы.

Как известно, с увеличением палеоглубины (степени преобразования) породы уплотняются, уменьшается их пористость и проницаемость. При этом, в работе [4] доказано, что часть газа, находящаяся в порах песчаников, в результате их уплотнения, под большим давлением, диффузионным путем проникает в зоны развития пластических деформаций, формируя полосы Бёма (бёмовскую штриховку).

Впервые эти полосы были описаны немецким петрографом Августом Бёмом [5]. При описании альбитового и хлоритового гнейса, слюдистого и кварцитового сланца он указывает на присутствие многочисленных цепочек газовых включений. Эти цепочки были выявлены им в различных минералах, слагающих указанные породы: в кварце, мусковите, полевом шпате. Он отмечает, что во многих шлифах кварц пронизан трещинами и микропорами, в которых находится много включений и эти полосы расположены рядами, местами пересекающимися. Так же он отмечает хаотически рассеянные включения, в некоторых из них наблюдаются движущиеся пузырьки.

В конце XX в этот вопрос рассматривался в ИГТМ НАН Украины при изучении микроструктурных деформаций породообразующего кварца песчаников нижнего и среднего карбона Донецкого бассейна. В результате исследований кварцевых зерен песчаников отобранных в пределах развития углей марки Г, Ж, К, ОС, полосы Бёма были выделены как отдельный тип микроструктурной деформации, представляющий собой выходы плоскостей скольжения, декорированные газовыми и газожидкими включениями, на поверхность среза или скола зерна. Преобладающее развитие полосок Бёма в кварцевых зернах песчаников Донбасса объяснялось повышенным содержанием газов, которые образуются в процессе углефикации из углей и

рассеянной органики в углевмещающих отложениях. Указанные полосы повсеместно отмечаются в зернах кварца песчаников, отобранных в пределах развития угля марок Г, Ж, К, ОС. С увеличением степени преобразования пород, в кварцевых зернах песчаников вмещающих угли марок К, ОС, Т, параллельно происходит деление газовых включений из крупных в более мелкие, термодинамические более устойчивые [4].

Несмотря на уже полученные результаты исследований природы газовых включений и их связи с преобразованием пористости пород [6], данная проблема требует более детального изучения. Особое внимание необходимо уделить ранним (угли марки Д) и поздним (угли марки А) стадиям преобразований пород, поскольку данный вопрос в предыдущих исследованиях рассматривался недостаточно.

Чтобы правильно описать процесс преобразования газовых включений, под действием изменяющихся условий, была сформулирована задача детального исследования включений в кварцевых зернах песчаников вмещающих угли различных марок. Для решения данной задачи исследовались шлифы песчаников, отобранные в районах распространения углей марок Д, Г (песчаник  $l_1Sl_2$ , глубина отбора 450 м, ш. Кураховская, Красноармейский район), Ж (песчаник  $l_3^1Sl_5$ , глубина отбора 1139 м, ш. им. А.Г. Стаханова, Красноармейский район) и А (песчаник  $h_7^6Sh_8^6$ , глубина отбора 480 м, ш. Ровеньковская, Должанско-Ровенецкий район).

Шлифы исследовались с использованием микроскопа ПОЛАМ – Р111 при увеличении от 100 до 1200 крат с применением иммерсионной жидкости. Включения и микродеформации учитывались в кварцевых зернах при их размере не менее 0,05 мм, который соответствует минимальному размеру зерен песчаной фракции. Поскольку, увеличение 100 крат не позволяет детально рассмотреть включения и микродеформации в кварцевых зернах, последующие исследования проводились при увеличении 1200 крат с иммерсией.

Для зерен кварца песчаников, отобранных в районах распространения углей марок Д, Г характерно наличие как микротрещин, так и образованных по ним полосок Бёма. На рисунке 1а, представлена микротрещина в зерне кварца еще не залеченная поровыми растворами, что указывает на начальную стадию процесса, представлена изогнутой полосой, длина которой составляет около 80 мкм.

На рис. 1б видна система субпараллельно расположенных микротрещин, которые декорируются микроскопическими газовыми включениями, точный размер которых определить достаточно трудно. Данные микротрещины находятся на этапе залечивания вторичным кварцем с формированием газовых включений, результатом чего является появление закрытых пор, совокупность которых представляют собой полоски Бёма.

Таким образом, для карбоновых песчаников Донбасса, отобранных в пределах развития углей марок Д, Г, характерен начальный этап преобразования газовых включений, поскольку на этой стадии кварцевые зерна начинают деформироваться, с появлением в них микротрещин. Часть газа,

содержащегося в поровом пространстве, переходит в микронарушения, которые при увеличении степени преобразования пород залечиваются поровыми растворами и образуют полосы Бёма.

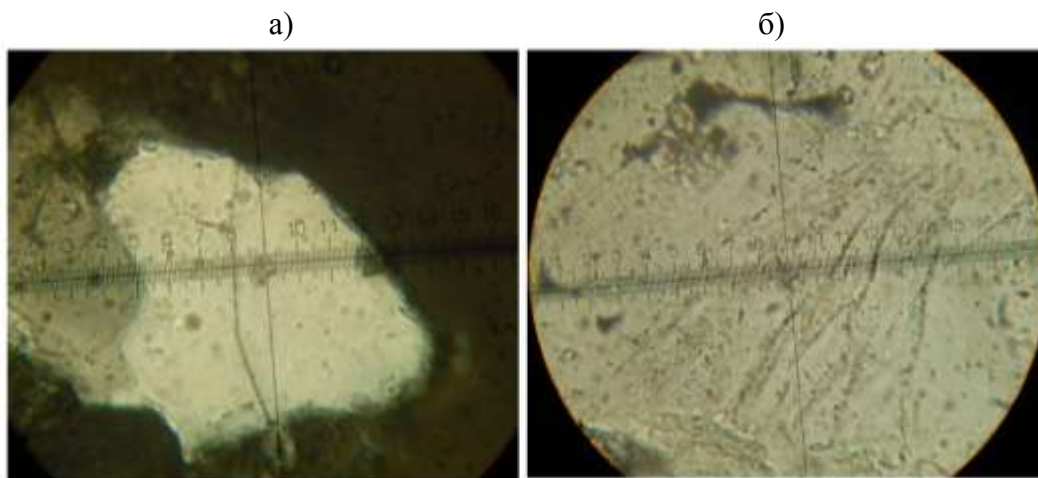


Рисунок 1 - Шлиф песчаника: а) – шлиф песчаника, микротрещина в кварцевом зерне, ув.  $1200^x$ ; б) - система полосок Бёма в кварцевом зерне, ув.  $1200^x$

Для зерен кварца песчаников, отобранных в пределах развития углей марок Ж, количество полосок Бёма значительно увеличивается. Слагающие их газовые включения размером от 1 до 2 мкм четко выражены, имеют изометричную форму. В одном кварцевом зерне встречается до 3 систем полосок Бёма, представленных субпараллельными полосами, длина которых достигает 120 мкм (рис. 2а).

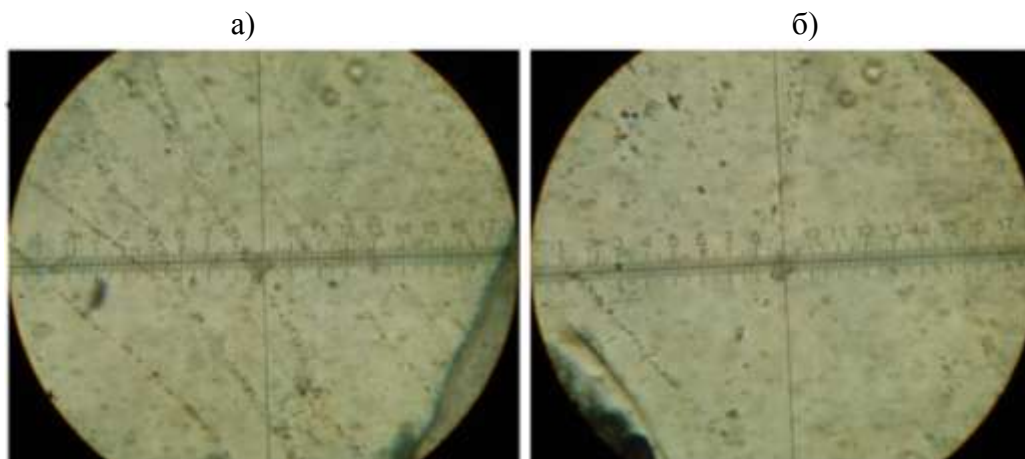


Рисунок 2 - Полоски Бёма в кварцевом зерне песчаника: а) - отобранного в пределах развития углей марок Ж ув.  $1200^x$ ; б) - отобранного в пределах развития углей марки А, ув.  $1200^x$

На поздних стадиях преобразования пород (угли марки А) в кварцевых зернах песчаников, газовые включения имеют неправильную, местами вытянутую форму. Количество полосок Бёма в кварцевых зернах значительно меньше и представляют собой включения размером около 1 мкм. Длина полосок достигает 60 мкм (рис. 2б). Исследование кварцевых зерен песчаников отобранных в пределах развития углей марки А показало, что деление газовых