

# Моделирование применимости метода радиально-сдвиговой прокатки для закрытия дефектов литой структуры стального слитка

<sup>1</sup>НАЙЗАБЕКОВ Абрахман Батырбекович, д.т.н., профессор, [naizabekov57@mail.ru](mailto:naizabekov57@mail.ru),

<sup>2</sup>ПОПОВ Федор Евгеньевич, докторант, [fedor\\_poroff@mail.ru](mailto:fedor_poroff@mail.ru),

<sup>3</sup>ПАНИЧКИН Александр Владимирович, к.т.н., зав. лабораторией, [a.panichkin@satbayev.university](mailto:a.panichkin@satbayev.university),

<sup>1</sup>ЛЕЖНЕВ Сергей Николаевич, к.т.н., профессор, [sergey\\_legnev@mail.ru](mailto:sergey_legnev@mail.ru),

<sup>4</sup>\*АРБУЗ Александр Сергеевич, PhD, зав. лабораторией, [alexandr.arbuz@nu.edu.kz](mailto:alexandr.arbuz@nu.edu.kz),

<sup>1</sup>Рудненский индустриальный институт, Казахстан, Рудный, ул. 50 лет Октября, 38,

<sup>2</sup>НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темиртау, пр. Республики, 30,

<sup>3</sup>НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а,

<sup>4</sup>Назарбаев Университет, Казахстан, Астана, пр. Кабанбай батыра, 53,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Целью работы было изучить применимость метода радиально-сдвиговой прокатки для деформационной обработки содержащих дефекты литой структуры стальных слитков. Метод радиально-сдвиговой прокатки (RSR) наиболее подходит для этих целей с точки зрения отсутствия ограничений по длине заготовки и реализуемого вихревого течения металла в условиях благоприятного напряженно-деформированного состояния. За основной материал был взят слиток с диаметром 32 мм с искусственным поперечным сквозным дефектом. По результату эксперимента была построена 3D-модель конечного вида полости дефекта и проанализирована морфология заваривания различных его зон. Объем дефекта уменьшился с 620 мм<sup>3</sup> до 380 мм<sup>3</sup>. Результат эксперимента показал, что метод RSR хорошо подходит для закрытия поверхностных дефектов глубиной 1-3 мм. При наличии осевых дефектов метод RSR не заваривает дефекты, а растягивает вдоль направления прокатки, меняя форму.

**Ключевые слова:** радиально-сдвиговая прокатка, дефекты литой структуры, ОДС-сталь, эволюция дефекта, моделирование.

## Введение

Эта работа – часть серии исследований по изучению получения ODS-сталей методами жидкой металлургии. За основу эксперимента была взята сталь, используемая в изучении возможности введения нанопорошка оксида иттрия в жидкий расплав стали 12X13 (12%Cr) во время индукционной вакуумной плавки. ODS-стали – это один из перспективных материалов для использования на атомных станциях IV+ поколения [1]. Твердые тугоплавкие оксиды (иттрия или титана), внедряясь в зерна аустенита, при разливке закрепляют их, играя роль никеля в жаропрочных нержавеющей сталях. Никель при облучении нейтронами распадается на долгоживущие опасные радиоактивные изотопы, поэтому важно найти ему замену.

Решением вопроса может стать получение ODS-сталей методами обычной жидкой металлургии с переплавом и получением больших слитков, пригодных для массового производства. Од-

нако даже при внедрении легирующих примесей в сталь необходимо обеспечить их равномерное распределение в объеме материала. Это возможно, только применяя очень большие деформации с немонотонным течением металла. Кроме того, необходимо обеспечить закрытие обычных литейных дефектов, возникающих в процессе разливки.

Слитки стали, не проходящие дополнительной обработки давлением, могут содержать такие внутренние дефекты, как трещины, осевая пористость, скопление микроскопических пузырьков газа и полости в объеме стали. Самый плохой сценарий, при котором дефект образуется на начальных этапах технологического процесса и остается неучтенным на последующих стадиях, что приводит к развитию дефекта в стали [2].

Традиционно для закрытия и заварки дефектов используетсяковка. Существует целое направление теоретических и экспериментальных исследований, посвященных интенсификации

процесса закрытия дефектов [3]. В большинстве случаев используют горячую ковку, с плоскими бойками [4]. Скорость хода наковален используется в диапазоне 8-20 мм/с [5], с обжатием образцов на 15-20% и температурой 1200-1250°C [6].

Использование прокатки как основного метода для закрытия несплошностей слитка наименее распространен как на практике, так и в теории из-за более высокого уровня растягивающих напряжений, вредных для закрытия дефектов [7]. Чаще используется для избавления от усадочных пустот и пор и полостей, возникающих в процессе литья слитков [8].

Кроме того, перечисленные классические способы реализуют монотонное течение металла и приводят к существенному уменьшению сечения заготовки. Это не всегда полезно с точки зрения измельчения и диспергирования внедренных в сталь легирующих оксидов.

Для этих целей планируется использовать обработку слитка методами интенсивной пластической деформации (SPD). Такие известные и эффективные методы SPD, как равноканальное угловое прессование и кручение под высоким давлением малопригодны для обработки слитков из-за ограничения размеров заготовки. Метод радиально-сдвиговой прокатки (RSR), изобретенный проф. Галкиным [9], наиболее подходит для этих целей с точки зрения отсутствия ограничений по длине заготовки и реализуемого вихревого течения металла в условиях благоприятного напряженно-деформированного состояния. Схема радиально-сдвиговой прокатки показана на рисунке 1.

Трехвалковая схема RSR прокатки обеспечивает чрезвычайно высокий уровень деформации (более 30 мм/мм за полный цикл прокатки). Напряженно-деформированное состояние этого процесса отличается от обычной двухвалковой кривой прокатки, используемой при прошивке труб [10]. У RSR нет высокого уровня растягивающих напряжений в центральной зоне, они урав-

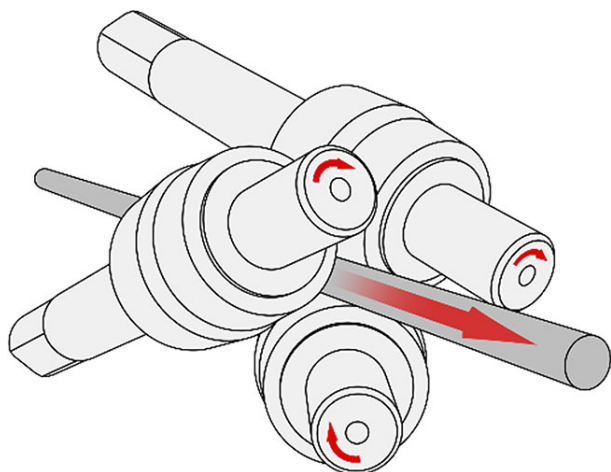


Рисунок 1 – Схема радиально-сдвиговой прокатки

новешиваются сжимающими. Этот факт, а также очень большой уровень накопленных деформаций за полный цикл обработки, позволяют существенно изменить структуру образца до состояния ультрамелкозернистого состояния (УМЗ), что и было продемонстрировано в работе [11]. Этот тип прокатки был использован для прокатки слитков аустенитной стали в [10]. Однако изучением поведения и закрытия дефектов в слитке посредством RSR никто не занимался.

Для изучения этого вопроса было проведено экспериментальное исследование эволюции модели сквозного поперечного дефекта (по диаметру) в слитке нержавеющей ODS-стали с обжатием 61%. Такое обжатие по результатам прошлых исследований должно быть достаточно для интенсивного перемешивания всего объема прутка вихревым движением металла и преобразования периферийной трети радиуса прутка в ультрамелкозернистое состояние [11]. Размер и положение искусственного дефекта соответствуют особенностям течения металла в слитке в процессе прокатки и дефект проходит через все характерные зоны напряженно-деформированного состояния прокатываемой заготовки, что позволяет характеризовать процесс заваривания целиком, без сверления множества дефектов различной глубины, как в случае с обычной продольной прокаткой.

#### Методы исследования

Экспериментальная часть проводилась на стане радиально-сдвиговой прокатки RSR-10/30. Слиток диаметром 32 мм и длиной 150 мм был выплавлен в индукционной вакуумной печи УИПВ-0,001 (ИМиО, г. Алматы) на основе стали 12X13 с добавлением 0,5% порошка наночастиц оксида иттрия. Перед прокаткой, в поперечном сечении слитка было высверлено сквозное отверстие, моделирующее дефект. Диаметр отверстия для моделирования дефекта был выбран 5 мм, что составляет 16% от диаметра слитка. Такой метод является часто применимым для физического и компьютерного моделирования поведения литых дефектов [5].

Температура прокатки была выбрана в обычном диапазоне горячей обработки подобных сплавов и составила 1200°C. Нагрев слитка проводился в камерной печи Nabertherm LH30/14. Прокатка проводилась за один нагрев в 6 проходов с обжатием по диаметру в 2 мм с 32 мм до 20 мм. Прокатанный слиток показан на рисунке 2 сверху.

Самым распространённым методом характеристики дефекта является рентгеновская томография, обладающая хорошей способностью выявлять дефекты в большом объеме материала. Но для проведения этой процедуры необходимо дорогостоящее оборудование [12], которое обычно находится на промышленных предприятиях с высокими требованиями в таких сферах, как медицина, аэрокосмическая отрасль и др. [13]. Са-

мым важным недостатком этого метода считается точность локализации дефекта [14]. Поэтому, в существующей работе, для более точной характеристики развития полости дефекта было проведено послойное физическое удаление материала заготовки с последующей 3D-реконструкцией дефекта. Образец в месте дефекта был распилен на параллельные поперечные диски толщиной в 1 мм на прецизионном отрезном станке QATM Brilliant-220, диском толщиной 0.6 мм и скоростью распила 10 мкм/с. Диски поперечных сечений содержащего дефект участка образца показаны на рисунке 2 внизу.

Отрезанные диски были пронумерованы и отсканированы на сканере с разрешением в 1200 DPI, и импортированы в CAD КОМПАС-3Д (ASKON), для перевода изображений в векторный формат. На основе этих сечений создавалась 3D-модель дефекта для визуализации стадии эволюции формы определения изменения его объема.

### Научные результаты

Экспериментальная прокатка слитка показала неполное и неравномерное закрытие дефекта. На поперечных сечениях хорошо видна разница в направлениях течения металла по сечению. Объем дефекта, рассчитанный на основе 3D-модели, уменьшился с 620 мм<sup>3</sup> до 380 мм<sup>3</sup>. Визуализация

развития дефекта после прокатки показана на рисунке 3.

Участок дефекта, близкий к внешнему слою, с одной стороны заваривается практически полностью, с другой стороны – заварен частично либо закрывается, образуя из сквозного дефекта узкую трещину без соединения. Это позволяет прогнозировать эффективность процесса при наличии неглубоких несимметричных поверхностных дефектов глубиной до трети радиуса слитка.

Здесь также очень важно обратить внимание на несимметричность закрытия дефекта подобную наблюдаемой в стали. Здесь она менее выражена, но отрицать системность этого эффекта нельзя. Наиболее вероятно, такая асимметричность обусловлена динамической неустойчивостью процесса радиально-сдвиговой прокатки и особенностями течения металла между тремя валами и симметрией самого дефекта, толкающую весь металл в одну сторону от оси. Наверняка эти же особенности обусловили и винтовую форму осевого дефекта – заметный по рисунку 2 характерный винтовой гребень на поверхности заготовки после прокатки. Ответ на этот вопрос может дать эксперимент с подробным изучением стадий закрытия несквозных несимметричных дефектов с разными обжатиями. Вероятно, все они будут завариваться до глубины примерно 30% радиуса



Рисунок 2 – Прокатанный образец с дефектом (вверху) и диски распила поперечных сечений содержащего дефект участка образца (внизу)

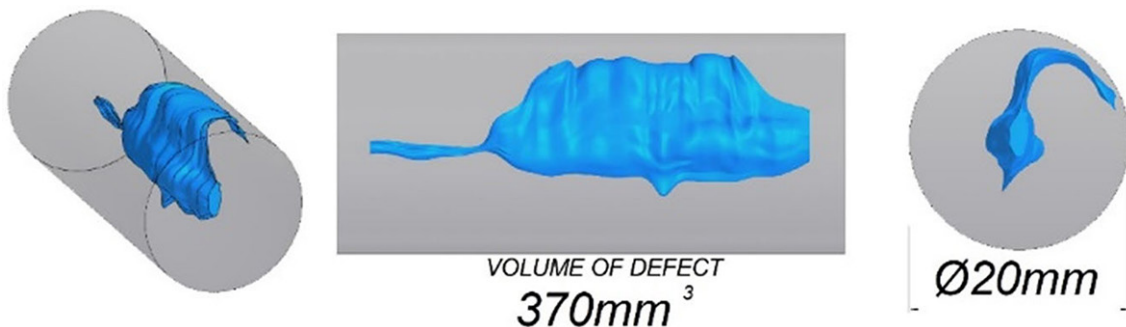


Рисунок 3 – Визуализация развития поперечного сквозного дефекта в слитке стали после радиально-сдвиговой прокатки с обжатием 61%

вне зависимости от асимметрии расположения.

### Выводы

Экспериментальная прокатка показала, что закрытие дефектов происходит в первую очередь на периферийной части прутка, наиболее интенсивное заваривание происходит на глубине 1-3 мм от края. Дефект переходит из сквозного поперечного положения в центральную часть, уменьшая свой объем в среднем на 50%. Центральная часть дефекта не заваривается, только сужаясь и удли-

няясь вместе с материалом заготовки пропорционально её вытяжке в процессе прокатки.

Трехвалковая радиально-сдвиговая прокатка очень эффективна для закрытия поверхностных дефектов глубиной до 30% радиуса, но строго не рекомендуется для обработки слитка, содержащего дефекты осевой части.

*Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP09259982).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zinkle S.J., Was G.S., Materials Challenges in Nuclear Energy. Acta Materialia 2013, 61, 735-758.
2. Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Typical Engineering Steel Defects. Metallurgist 2021, 64, 1279-1287.
3. Frolov I., Client oriented quality in metallurgical technologies. Metal Forming Seminar in National Metallurgical Academy of Ukraine. Dnipropetrovsk, Ukraine. May, 2012.
4. Banaszek G., Bajor T., Kawatek A., Knapirski M., Modeling of the Closure of Metallurgical Defects in the Magnesium Alloy Die Forging Process. Materials 2022, 15, 7465.
5. Banaszek G., Computer and laboratory modelling the analysis of closing up of Metallurgical defects in ingots during hot forging. 2005.
6. Kim Y., Cho J., Bae W., Efficient Forging Process to Improve the Closing Effect of the Inner Void on an Ultra-Large Ingot. Journal of Materials Processing Technology 2011, 211, 1005-1013.
7. Chen D.C., Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Porous Metal Sheets Containing Internal Void Defects. Journal of Materials Processing Technology 2006, 180, 193-200.
8. Chen J., Chandrashekhara K., Mahimkar C., Lekakh S.N., Richards V.L., Void Closure Prediction in Cold Rolling Using Finite Element Analysis and Neural Network. Journal of Materials Processing Technology 2011, 211, 245-255.
9. Galkin S.P., Gamin Y.V., Kin T.Yu., Analysis of Temperature Influence on Strain-Speed Parameters of Radial-Shear Rolling of Al-Zn-Mg-Ni-Fe Alloy. Materials 2022, 15, 7202.
10. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Kaputkina L.M., Huy T.B., Prediction of the Fracture of Metal in the Process of Screw Rolling in a Two-Roll Mill. Metallurgist 2018, 61, 925-933.
11. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K., Dyja H.; Panin E., Lepsiyayev A., Sultanbekov S., Shamenova R., Using of Radial-Shear Rolling to Improve the Structure and Radiation Resistance of Zirconium-Based Alloys. Materials 2020.
12. Romano S., Abel A., Gumpinger J., Brandão A.D., Beretta S., Quality Control of AlSi10Mg Produced by SLM: Metallography versus CT Scans for Critical Defect Size Assessment. Additive Manufacturing 2019, 28, 394-405.
13. Chioibas D., Mihai S., Mahmood M.A., Lungu M., Porosnicu I., Sima A., Dobrea C., Tiseanu I., Popescu A.C., Use of X-Ray Computed Tomography for Assessing Defects in Ti Grade 5 Parts Produced by Laser Melting Deposition. Metals 2020, 10, 1408.
14. Andriamihaja S., Padmanabha E., Characterization of pore systems in carbonate using 3d x-ray computed tomography. Pet Coal 2016.

### **Құйылған құрылымды болат құйманың ақауларын жабу үшін радиалды-ығысу илемдеу әдісінің қолданылуын модельдеу**

<sup>1</sup>НАЙЗАБЕКОВ Абрахман Батырбекович, т.ғ.д., профессор, [naizabekov57@mail.ru](mailto:naizabekov57@mail.ru),

<sup>2</sup>ПОПОВ Федор Евгеньевич, докторант, [fedor\\_poroff@mail.ru](mailto:fedor_poroff@mail.ru),

<sup>3</sup>ПАНИЧКИН Александр Владимирович, т.ғ.к., зертхана меңгерушісі, [a.panichkin@satbayev.university](mailto:a.panichkin@satbayev.university),

<sup>1</sup>ЛЕЖНЕВ Сергей Николаевич, т.ғ.к., профессор, [sergey\\_legnev@mail.ru](mailto:sergey_legnev@mail.ru),

<sup>4</sup>\*АРБУЗ Александр Сергеевич, PhD, зертхана меңгерушісі, [alexandr.arbuz@nu.edu.kz](mailto:alexandr.arbuz@nu.edu.kz),

<sup>1</sup>Рудный индустриалдық институты, Қазақстан, Рудный, Қазанға 50 жыл көшесі, 38,

<sup>2</sup>«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,

<sup>3</sup>«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан, Алматы, Сәтбаев көшесі, 22а,

<sup>4</sup>Назарбаев Университеті, Қазақстан, Астана, Қабанбай батыр даңғылы, 53,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Жұмыстың мақсаты – болат құймалардың құйма құрылымының ақаулары бар деформациялық өңдеу үшін радиалды-ығысу илемдеу әдісінің қолданылуын зерттеу. Радиалды-ығысу илемдеу (RSR) әдісі қолайлы кернеулі деформацияланған жағдайда дайындаманың ұзындығына және металдың құйынды ағынына шектелулер болмау тұрғысынан осы мақсаттарға ең қолайлы. Негізгі материал үшін диаметрі 32 мм жасанды көл-

денең ақауы бар құйма алынды. Эксперимент нәтижесінде ақау қуысының соңғы түрінің 3D моделі жасалды және оның әртүрлі аймақтарының қайнату морфологиясы талданды. Ақау көлемі 620 мм<sup>3</sup>-тен 380 мм<sup>3</sup>-ке дейін азайды. Эксперимент нәтижесі RSR әдісі 1-3 мм тереңдіктегі беткі ақауларды жабу үшін жақсы жұмыс істейтінін көрсетті. Осьтік ақаулар болған кезде RSR әдісі ақауларды қайнатпайды, бірақ пішінін өзгерту арқылы илектеу бағыты бойынша созылады.

**Кілт сөздер:** радиалды-ығысу, құйма құрылымының ақаулары, ODS болат, ақау эволюциясы, модельдеу.

### **Modelling of Applicability of Radial Shear Rolling Method for Closure of Defects in Cast Structure of Steel Ingot**

<sup>1</sup>NAYZABEKOV Abrahman, Dr. of Tech. Sci., Professor, naizabekov57@mail.ru,

<sup>2</sup>POPOV Fedor, Doctoral Student, fedor\_popoff@mail.ru,

<sup>3</sup>PANICHKIN Alexander, Cand. of Tech. Sci., Head of Laboratory, a.panichkin@satbayev.university,

<sup>1</sup>LEZHNEV Sergey, Cand. of Tech. Sci., Professor, sergey\_legnev@mail.ru,

<sup>4</sup>\*ARBUZ Alexander, PhD, Head of Laboratory, alexandr.arbuz@nu.edu.kz,

<sup>1</sup>Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, Rudny, 50 years of October Street, 38,

<sup>2</sup>NPJSC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,

<sup>3</sup>NCJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev», Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22a,

<sup>4</sup>Nazarbayev University, Kazakhstan, Astana, Kabanbay Batyr Avenue, 53,

\*corresponding author.

**Abstract.** The aim of this work was to investigate the applicability of radial shear rolling method for deformation treatment of steel ingots containing cast structure defects. The radial-shift rolling (RSR) method is the most suitable for this purpose from the point of view of absence of restrictions on the billet length and realisable vortex flow of metal under conditions of favourable stress-strain state. An ingot with a diameter of 32 mm with an artificial transverse through defect was taken as the basic material. According to the results of the experiment, a 3D model of the final view of the defect cavity was built and the morphology of welding of its different zones was analysed. The volume of the defect was reduced from 620 mm<sup>3</sup> to 380 mm<sup>3</sup>. The experimental result showed that the RSR method is well suited for the closure of superficial defects with a depth of 1-3 mm. In the presence of axial defects, RSR method does not weld the defects, but stretches along the rolling direction changing the shape.

**Keywords:** radial-shift rolling, cast structure defects, ODS steel, defect evolution, modelling.

## REFERENCES

1. Zinkle S.J., Was G.S., Materials Challenges in Nuclear Energy. Acta Materialia 2013, 61, 735-758.
2. Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Typical Engineering Steel Defects. Metallurgist 2021, 64, 1279-1287.
3. Frolov I., Client oriented quality in metallurgical technologies. Metal Forming Seminar in National Metallurgical Academy of Ukraine. Dnipropetrovsk, Ukraine. May, 2012.
4. Banaszek G., Bajor T., Kawalek A., Knapieński M., Modeling of the Closure of Metallurgical Defects in the Magnesium Alloy Die Forging Process. Materials 2022, 15, 7465.
5. Banaszek G., Computer and laboratory modelling the analysis of closing up of Metallurgical defects in ingots during hot forging. 2005.
6. Kim Y., Cho J., Bae W., Efficient Forging Process to Improve the Closing Effect of the Inner Void on an Ultra-Large Ingot. Journal of Materials Processing Technology 2011, 211, 1005-1013.
7. Chen D.C., Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Porous Metal Sheets Containing Internal Void Defects. Journal of Materials Processing Technology 2006, 180, 193-200.
8. Chen J., Chandrashekhara K., Mahimkar C., Lekakh S.N., Richards V.L., Void Closure Prediction in Cold Rolling Using Finite Element Analysis and Neural Network. Journal of Materials Processing Technology 2011, 211, 245-255.
9. Galkin S.P., Gamin Y.V., Kin T.Yu., Analysis of Temperature Influence on Strain-Speed Parameters of Radial-Shear Rolling of Al-Zn-Mg-Ni-Fe Alloy. Materials 2022, 15, 7202.
10. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Kaputkina L.M., Huy T.B., Prediction of the Fracture of Metal in the Process of Screw Rolling in a Two-Roll Mill. Metallurgist 2018, 61, 925-933.
11. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K., Dyja H.; Panin E., Lepshbayev A., Sultanbekov S., Shamenova R., Using of Radial-Shear Rolling to Improve the Structure and Radiation Resistance of Zirconium-Based Alloys. Materials 2020.
12. Romano S., Abel A., Gumpinger J., Brandão A.D., Beretta S., Quality Control of AlSi10Mg Produced by SLM: Metallography versus CT Scans for Critical Defect Size Assessment. Additive Manufacturing 2019, 28, 394-405.
13. Chioibas D., Mihai S., Mahmood M.A., Lungu M., Porosnicu I., Sima A., Dobrea C., Tiseanu I., Popescu A.C., Use of X-Ray Computed Tomography for Assessing Defects in Ti Grade 5 Parts Produced by Laser Melting Deposition. Metals 2020, 10, 1408.
14. Andriamihaja S., Padmanabha E., Characterization of pore systems in carbonate using 3d x-ray computed tomography. Pet Coal 2016.