

УДК 620.178:677.042

А. А. Кумахов, А. А. Болотоков, Институт Рентгеновской Оптики, 125315, Москва, Россия, alimkumakhov@gmail.com, optics@yandex.ru.

9. Рентгеновские поликапиллярные линзы и их использование в материаловедении.

В статье описаны принципы работы поликапиллярной рентгеновской оптики, их основные параметры, особенности. Даны некоторые области использования в аналитических приборах поликапиллярной оптики, в частности, дается применение рентгеновской оптики в портативном рентгеновском комплексе для анализа напряженно-деформированного состояния с примерами расчета эксплуатационного и остаточного ресурсов.

Ключевые слова: поликапиллярная оптика, неразрушающий контроль, рентгеновский анализ.

Одной из проблем в горном машиностроении является выявление преддефектного состояния используемого оборудования, выявления брака, определение напряженно-деформированного состояния материала и др. Единственным прямым методом неразрушающего контроля является рентгеновская дифрактометрия. Одним из способов повышения эффективности рентгеновских приборов является применение в них поликапиллярной оптики Кумахова. Ознакомимся с принципами работы и параметрами рентгенооптических изделий.

В последние годы, интерес к рентгеновской оптике возрос в связи с необходимостью исследования наноматериалов, различных минералов, многослойных структур и т.д. Поликапиллярная оптика Кумахова, основана на явлении многократного полного внешнего отражения [1,2,3,4].

Особенностями поликапиллярной оптики являются возможность фокусировки излучения (линзы Кумахова), создание квазипараллельных пучков (полулинзы) для дифрактометрии, большой угол захвата излучения (до 0,2 радиан) и т.д. [5,6,7,8]. Диапазон применения этой оптики достаточно широк (до 60 keV для рентгеновского излучения). Благодаря этим свойствам поликапиллярная оптика уже используется в тысячах приборах по всему миру. Эта оптика используется в большом ассортименте аналитических приборов – дифрактометрах, спектрометрах, рефлектометрах, приборах с малоугловым рассеянием и т. д. [9].

Принцип работы поликапиллярной оптики

В рентгеновской области спектра показатель преломления $n < 1$, и вакуум является оптически наиболее плотной средой. В результате этого возникает явление полного внешнего отражения [10] (в противоположность оптическим спектрам) в случае лучей, падающих на поверхность среды извне. Поэтому это отражение и называется “внешним”. Высокая отражательная способность имеет место лишь при скользких углах падения. Лучи, падающие на поверхность под углами меньшими θ_c (критический угол), отражаются, а под большими углами - нет (Рис.1а). Типичное значение θ_c для энергий ~ 10 кэВ – несколько миллирадиан.

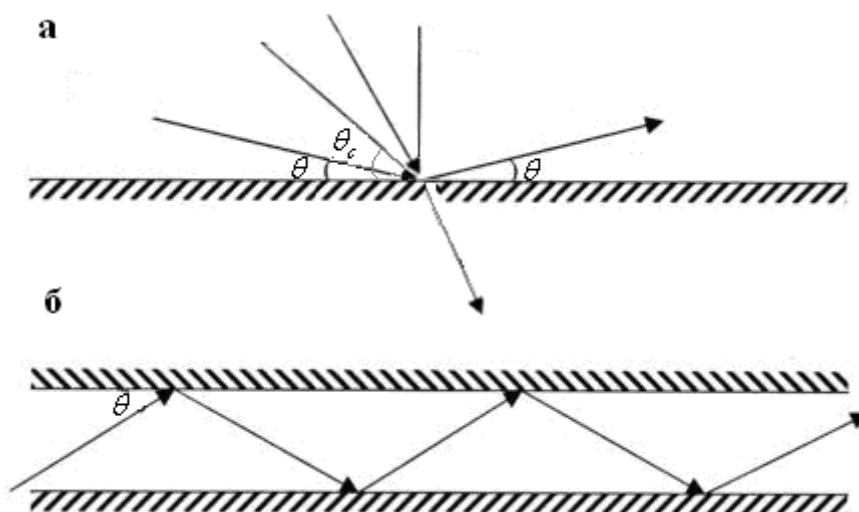


Рис. 1 Отражение рентгеновских лучей от гладкой поверхности (а) и распространение вдоль канала в результате многократных отражений (б).

Принцип работы поликапиллярной оптики Кумахова следующий. Как было сказано выше, рентгеновские лучи могут отражаться от гладкой поверхности, когда угол падения пучка меньше, чем критический угол. Таким образом, рентгеновские фотоны, введённые в капиллярный канал могут распространяться в результате многократного отражения. Если канал изогнут так, что соблюдаются определённые соотношения между диаметром канала, радиусом кривизны и энергией фотона, рентгеновское излучение может отклоняться на достаточно большие углы [11].

Поликапиллярной линзой или линзой Кумахова называют пучок капилляров, предназначенный для преобразования расходящихся рентгеновских пучков в интенсивное фокальное пятно. Необходимо заметить, что упорядоченные капиллярные структуры могут быть использованы как интерференционные элементы. Основными параметрами, характеризующими степень фокусирования, являются плотность потока фотонов в пятне и размеры фокусного пятна. [12].

Поликапиллярные линзы и их основные параметры

С момента создания первой сборной линзы (рис.2) изменилась технология изготовления, геометрия, основные параметры линз. Первая линза была собрана из 2000 отдельных капилляров.

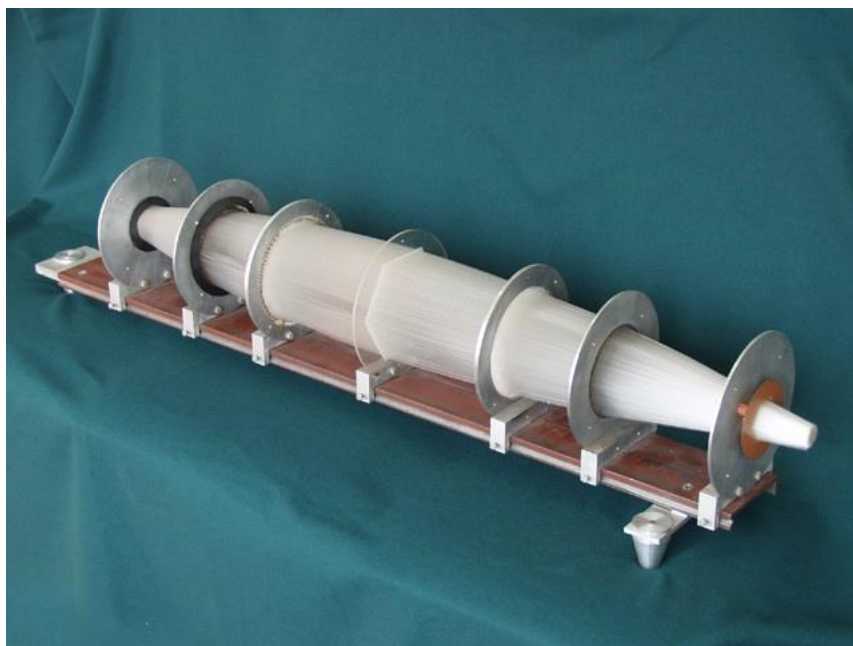


Рис. 2 Первая сборная поликапиллярная линза.

Технология изготовления современных монолитных линз (рис. 3) представляет из себя вытяжку поликапиллярной заготовки в специальной печи.

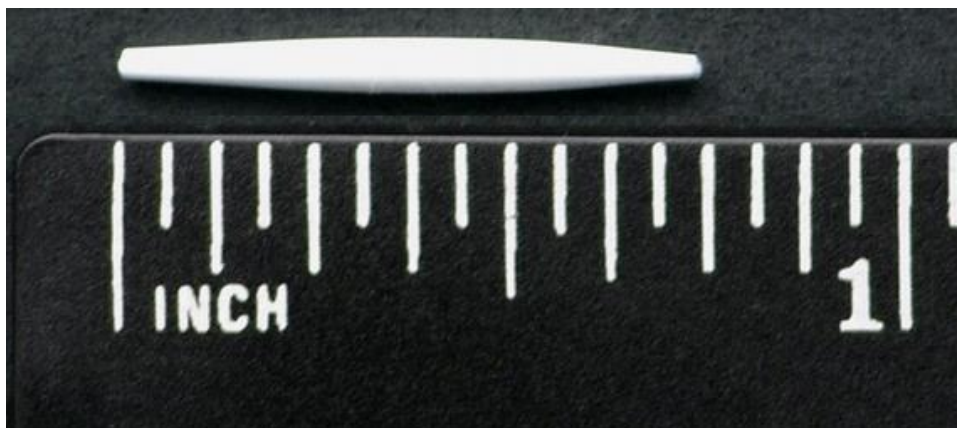


Рис. 2 Монолитная поликапиллярной линзы.

Основными параметрами поликапиллярных линз являются переднее и заднее фокусные расстояния, размер фокусного пятна, трансмиссия.

Диаметр фокусного пятна, является одним из важнейших параметров, так как от него зависит область исследуемого объекта. С уменьшением диаметра пятна, уменьшается локальность, тем самым возрастает точность измерения. Этот параметр линейно зависит от диаметра каналов линзы, выходного фокусного расстояния (пропорционально), геометрии линзы и от энергии излучения. Зависимость от энергии заключается в следующем: расходимость излучения на выходе линзы определена двойным критическим углом. С увеличением энергии критический угол уменьшается, тем самым уменьшается и диаметр фокусного пятна.

Основная проблема уменьшения диаметра фокусного пятна в микролинзах связана с тем что, высокоэнергетическая часть излучения проходит сквозь стенки линзы. Кроме того, лучи, которые перестают отражаться из-за превышения критического угла, не поглощаются в стекле, а выходят наружу. Таким образом, фокусное пятно, окружает так называемое гало, сформированное из излучения, не поглощенного в стенках. Один из возможных вариантов решения этой проблемы, заключается в увеличении толщины стенки единичного канала.

Причины этих проблем следующие:

Потери по повороту, заключаются в следующем, каждая линза имеет определенный радиус кривизны; чем больше этот радиус, тем на больший угол приходится поворачивать излучение для фокусировки в точку. Здесь наибольшие потери происходят по краям, так как по краям радиус кривизны достигает максимального значения, а в центре линзы он минимален, соответственно и потерь в центре меньше. Таким образом, можно сделать вывод, что центральная часть лучше проводит излучение.

Лучи, не захваченные каналами (в торец, стенку, попавшие в канал под углом больше критического), как правило не попадают в условия захвата. И либо гибнут в толще стекла, либо выходят наружу. Их влияние, вследствие, окружающей оболочки линзы пренебрежимо мало

Еще одним не маловажным параметром является трансмиссия. Трансмиссия – это отношение вышедшего излучения, к вошедшему в линзу. Трансмиссия линз зависит от энергии излучения, угла захвата, диаметра капилляра и радиуса его кривизны, формы огибающей.

С увеличением энергии угол захвата уменьшается, т.е. меньшее количество лучей попадает в линзу, что приводит к уменьшению трансмиссии.

Эволюция поликапиллярных линз была долгой и не простой. Размеры фокусных пятен первых линз были порядка нескольких миллиметров. Вместе с этим трансмиссия была высока порядка 20%.

На сегодняшний день в нашем институте создаются линзы с диаметром фокусного пятна менее 6мм. Однако уменьшение размеров фокусных пятен негативно сказывается на трансмиссии.

Каждая линза уникальна в своем роде. Различие линз заключается не только в отличии основных параметров друг от друга. Линзы различаются так же диаметром каналов, радиусом кривизны, диаметром сечения. То, какой получится линза, зависит от диаметра заготовки, от диаметра ее каналов, от режимов вытяжки и др.

Применение поликапиллярной оптики в портативном рентгеновском комплексе для анализа напряженно-деформированного состояния.

Анализ преддефектного состояния особо ответственных конструкций и сооружений без нарушения их связей является одним из основных способов неразрушающего контроля. Мостовые сооружения, трубопроводы, транспортные коммуникации, строительные конструкции, лифтовое хозяйство, подъемно-транспортные механизмы города и метрополитена нуждаются в периодическом контроле технического состояния, одной из основ которого является определение напряженно-деформированного состояния материала. Вывести элемент конструкции из эксплуатации до образования в нем трещин, предотвратить прохождение магистральной трещины, и как следствие, разрушение материала, приводящее к авариям и катастрофам – вот задача неразрушающего контроля.

Рентгеновская дифрактометрия является единственным прямым методом неразрушающего контроля упругих деформаций кристаллической решетки и расчета по ним напряжений, который не требует предварительных данных о состоянии материала.

Инструментом данного метода является рентгеновское излучение, длина волны которого соизмерима с межплоскостными расстояниями кристаллической решетки.

Конструкция прибора позволяет определять напряжения в заданных направлениях (метод “синус квадрат пси”), а также сумму главных напряжений в поверхностном слое металла, деталей и конструкций. О наличии напряжений в материале можно судить по смещению максимума дифракционной линии на угол $\Delta\theta$. Имеется модификация для исследования литых изделий и крупнозернистых материалов.



Остаточные напряжения, определяемые с помощью портативных рентгеновских дифрактометров, можно использовать при оценке технического состояния объектов техники, а также для прогнозирования остаточного ресурса их узлов и деталей.

Эффективность методики показана на примерах расчета эксплуатационного и остаточного ресурсов: лонжеронов лопастей несущего винта вертолета МИ-8; дисков газотурбинных двигателей; стоек шасси истребителей СУ-30МКИ; труб для газопровода.

Вертолетные лопасти



Контроль шести вертолетных лопастей с разной наработкой. Проектный ресурс для них составляет 2000 летных часов. Применение разработанной методики позволило определить для каждой лопасти эксплуатационный ресурс.

Диски ГТД

С использованием портативного рентгеновского дифрактометра провели контроль трех дисков ГТД с разной наработкой. Проектный ресурс для них составляет 800 рабочих часов. Применение разработанной методики позволило определить для каждого диска эксплуатационный ресурс. В результате диск 1 - 0 часов, диск 2 - 38 часов (брак при изготовлении), диск 3 - 752 часа.

Стойки шасси



Контроль трех стоек шасси с разной наработкой и одной стойки шасси без наработки. Проектный ресурс для них составляет 600 применений. В результате стойка шасси 1 проработает свыше проектного ресурса 40 применений,

стойка шасси 2 – 1234 применения, стойка шасси 3 – 1225 применений.

Фрагменты труб газопровода

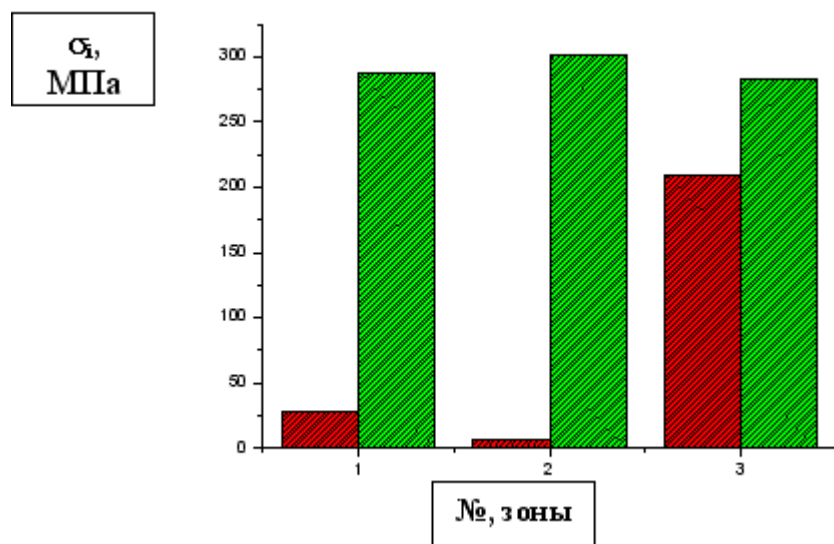
С использованием портативного рентгеновского дифрактометра проведена оценка остаточного ресурса фрагмента трубы газопровода с наработкой 17 лет. Первый этап определения уровня остаточных напряжений осуществлен для фрагмента трубы газопровода с наработкой 0 лет. Выбранные для оценки зоны у каждого фрагмента – вблизи от продольного сварного шва. Результаты расчета по разработанной методике остаточного ресурса приведены в табл.1.

Таблица 1

Расчет остаточного ресурса для фрагментов труб газопровода

№ зоны	σ_{i1} , МПа	τ_1 , год	σ_{i2} , МПа	τ_2 , год	V_i , МПа/год
1	28		288		15,3
2	6	0	302	17	17,4
3	210		283		4,3

Диаграмма 1



На диаграмме представлены полученные в зонах 1, 2 и 3 остаточные напряжения при наработке 0 лет (красный цвет) и наработке 17 лет (зеленый цвет). Из полученных данных видно, что исходный уровень растягивающих остаточных напряжений в указанных зонах

после семнадцати лет эксплуатации значительно увеличивается в двух ближних к сварному шву зонах и меньше – в третьей зоне.

Использование поликапиллярных линз в материаловедении.

И при добыче полезных ископаемых, разумно применение аналитических приборов, использующих рентгеновское излучение, для непосредственного исследования минералов при их добыче с получением, качественных и количественных результатов. Использование рентгенооптических систем в таких приборах может дать выигрыш во времени исследования образца в десятки – сотни раз. Кроме того, благодаря применению оптики возможно значительное уменьшение мощности применяемых рентгеновских источников. Что сказывается на уменьшении габаритов приборов, потребляемой ими мощности, стоимости и делает эксплуатацию более безопасной.

Перечень аналитических приборов на базе поликапиллярной оптики, разработанных в Институте рентгеновской оптики

1. Рентгенографические дифрактометры для поликристаллов;
 - многофункциональный дифрактометр для исследования неорганических поликристаллических материалов
 - рентгеновский дифрактометр для исследования крупногабаритных образцов и элементов конструкций
 - рентгеновский дифрактометр для исследования порошковых образцов и изделий,
 - портативный рентгеновский дифрактометр для исследования фазового и элементного состава
 - портативный рентгеновский дифрактометр для исследования напряженно-деформированного состояния материала и определения остаточных напряжений
 - портативный рентгеновский дифрактометр для исследования напряженно-деформированного состояния крупнозернистых образцов.
2. Рентгенографические дифрактометры для монокристаллов:
 - рентгенографические дифрактометры для определения преимущественных ориентировок и упругих деформаций в монокристаллах и монокристаллических покрытиях
 - рентгеновский дифрактометр для определения различных кристаллографических ориентировок в Булях перед разделением на блоки
 - рентгеновский дифрактометр-компаратор для определения кристаллографических ориентировок монокристаллических пластин.
3. Рентгенфлуоресцентные спектрометры;
 - микрорентгенфлуоресцентный спектрометр

- ручной рентгенфлуоресцентный спектрометр
- сверхчувствительный сенсорный рентгеновский спектрометр (на основе капиллярных структур).

Список литературы:

1. **Kumakhov M. A.** Channeling of photons and new x-ray optics, Nucl.Instr& Meth., 1990, B48, 1-4, pp.283-286.
2. **Kumakhov M.A., Komarov F.F.** Multiple reflection from surface X-ray optics. Physic reports. A Review Section of Physics Letters, vol. 191, N5, North-Holland. Amsterdam 1990.
3. **M.A. Kumakhov**, History of the evolution of the x-ray and neutron capillary optics. Optics of Beams, 1993, pp.3-17.
4. **M.A. Kumakhov, V.A. Sharov**, Neutron focusing by using capillary optics, Optics of Beams, 1993, pp.52-59.
5. Proceedings SPIE 2001 X-ray and capillary optics. Editor M. A. Kumakhov, volume 4765, p 170-182.
6. Proceedings SPIE 2004 X-ray and capillary optics. Editor M. A. Kumakhov, volume 5943, p 102-115.
7. **V.A. Arkadiev, D.I. Gruev, M.A. Kumakhov**, X-ray lens for forming quasiparallel beam. Optics of Beams, 1993, pp.27-32.
8. **G. I. Borisov and M. A. Kumakhov**, Poly-capillary lens for neutrons, Nucl. Instr& Meth., 2004, A529, 2004, 1-3, pp.129-133.
9. **Золотов Ю.А.** Аналитическая химия: наука, приложение, люди. Москва. Наука 2009, стр. 64.
10. **Блохин М. А.**, Физика рентгеновских лучей, 2 изд., М., 1957
11. **Аркадьев В.А., Кованцев В.Е, Коломитцев А.И., Кумахов М.А, Пономарёв И.Ю.** Транспортировка рентгеновского излучения по капиллярным рентгеноводам в условиях полного внешнего отражения от изогнутых поверхностей // Поверхность. – 1990. - №1.- С.54 - 59.
12. **Dabagov S.B., Fedorchuk R.V., Murashova V.A., Nikitina S.V., Yakimenko M.N.** Interference phenomenon under focusing of synchrotron radiation by a Kumakhov lens // Nucl. Instr. Met