

УДК 620.178:677.042

А. А. Кумахов, аспирант КБГУ, г. Нальчик, мл. научный сотрудник, ИРО, г. Москва, **А. А. Болотоков**, вед. научный сотрудник, ИРО, **М. В. Алексеев**, аспирант, Московский государственный горный университет

Научный руководитель: **М. С. Островский**, д.т.н., проф., Московский государственный горный университет

E-mail: kaftmr@msmu.ru

Измерение остаточных напряжений в деталях горных машин методом рентгеновской дефрактометрии

Изложены принципы поликапиллярной рентгеновской оптики. Рассматриваются возможности применения последних достижений в этой области для неразрушающего контроля остаточных напряжений в элементах конструкций горных машин.

Ключевые слова: остаточные напряжения, неразрушающий контроль, рентгеновские лучи, капиллярная оптика.

A. A. Kumakhov, A. A. Bolotokov, M. V. Alexeev

Measurement of Residual Stresses in Parts of Mining Machines Using X-Ray Method

The principles of X-ray optics. The possibilities of application of the latest developments in this area for non-destructive testing of residual stresses in structural elements of mining machines.

Keywords: residual stresses, non-destructive testing, X-rays, capillary optics.

Тенденции повышения требований к качеству продукции машиностроения при одновременном снижении её металлоёмкости влекут все большее использование деталей малой жесткости. Обеспечение заданных параметров качества таких деталей сопряжено со значительными трудностями из-за технологических остаточных деформаций (коробления), возникающих в процессе изготовления. Основным фактором, влияющим на их коробления, являются технологические остаточные деформации изгиба, а его сохранение с течением времени обусловлено степенью релаксации остаточных напряжений и стабильностью структурно-фазового состояния материала.

Технологические остаточные деформации обусловлены нарушением уравновешенного напряженного состояния заготовки при удалении припусков механической обработки и одновременным формированием в поверхностном слое начальных напряжений (под последними понимаются

напряжения, имеющие место в заготовке после обработки, но до её освобождения от внешних связей и деформирования) (рис. 1), а также изменением напряженного состояния, предварительно созданного силами крепления заготовки в приспособлениях. Технологические остаточные деформации проявляются главным образом в виде изгиба и изменения размеров детали после проведения очередной операции и удаления внешних связей и воздействий. [12].



Рис. 1. Принципиальная схема взаимодействия напряжений при односторонней обработке.

Эпюры напряжений: 1 – остаточные напряжения в заготовке, 2- начальные напряжения, возникающие в результате односторонней обработки; 3 – начальные напряжения после обработки; 4,5 – часть остаточных напряжений, которые возникают от продольных (4) и изгибных (5) деформаций; 6 – сформированные остаточные напряжения

Таким образом, одной из проблем в горном машиностроении является выявление брака, преддефектного состояния используемого оборудования, определение напряженно-деформированного состояния материала и др. Единственным прямым методом неразрушающего контроля поверхности является рентгеновская дифрактометрия. В последние годы интерес к рентгеновской оптике возрос в связи с необходимостью исследования наноматериалов, различных минералов, многослойных структур и т.д. Одним из способов повышения эффективности рентгеновских приборов является применение в них поликапиллярной оптики.

Поликапиллярная оптика, основана на явлении многократного полного внешнего отражения [1-4]. Особенности поликапиллярной оптики являются возможность фокусировки излучения (поликапиллярная линза), создание квазипараллельных пучков (поликапиллярная полулинзы) для дифрактометрии, большой угол захвата излучения (до 0,2 радиан) и т.д. [5-8]. Диапазон применения этой оптики достаточно широк (до 60 кэВ 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 $n < 1$, вследствие чего для нее вакуум является оптически более 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.2а). Типичное значение θ_c для энергий ~ 10 кэВ – несколько миллирадиан.

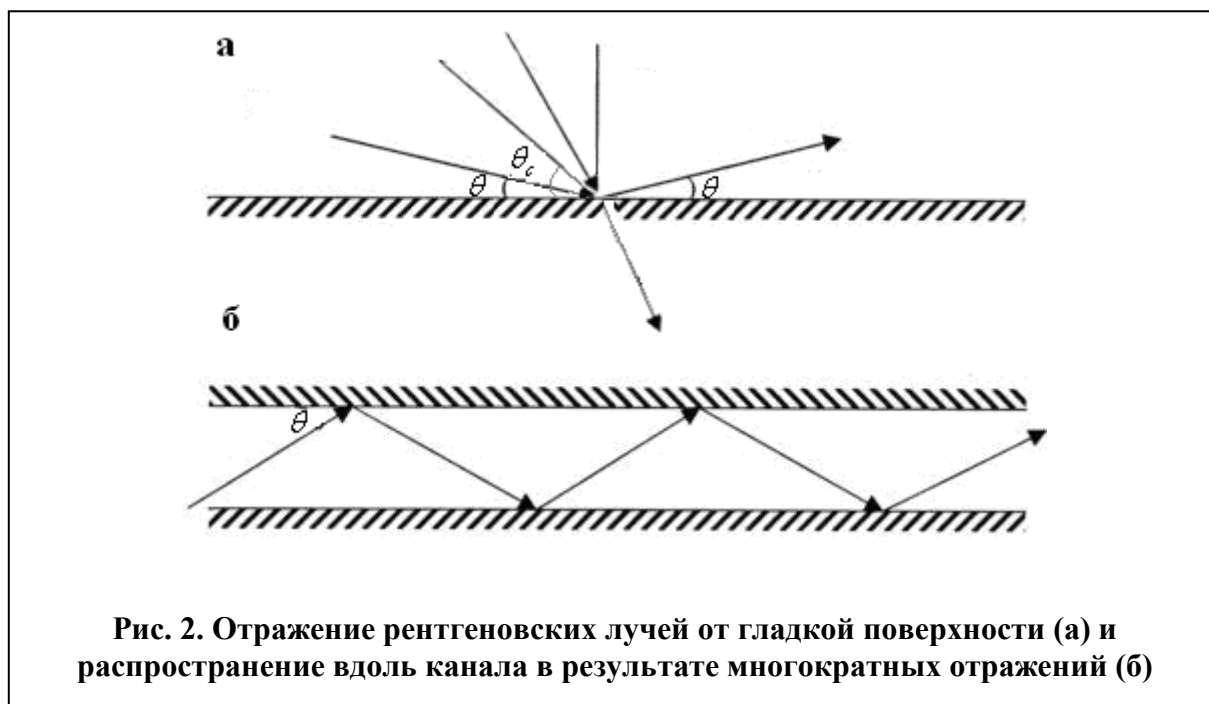


Рис. 2. Отражение рентгеновских лучей от гладкой поверхности (а) и распространение вдоль канала в результате многократных отражений (б)

Принцип работы поликапиллярной оптики следующий. Как было сказано выше, рентгеновские лучи могут отражаться от гладкой поверхности, когда угол падения пучка меньше, чем критический угол. Таким образом, рентгеновские фотоны, введенные 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].

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

Анализ предефектного состояния особо ответственных конструкций и сооружений без нарушения их связей является одним из основных способов неразрушающего контроля. Мостовые сооружения, машиностроение, горное оборудование, транспортные коммуникации, строительные конструкции, 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.



Рис. 3. Общий вид портативного рентгеновского дифрактометра

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.

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.

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.

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.

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 таблице.

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

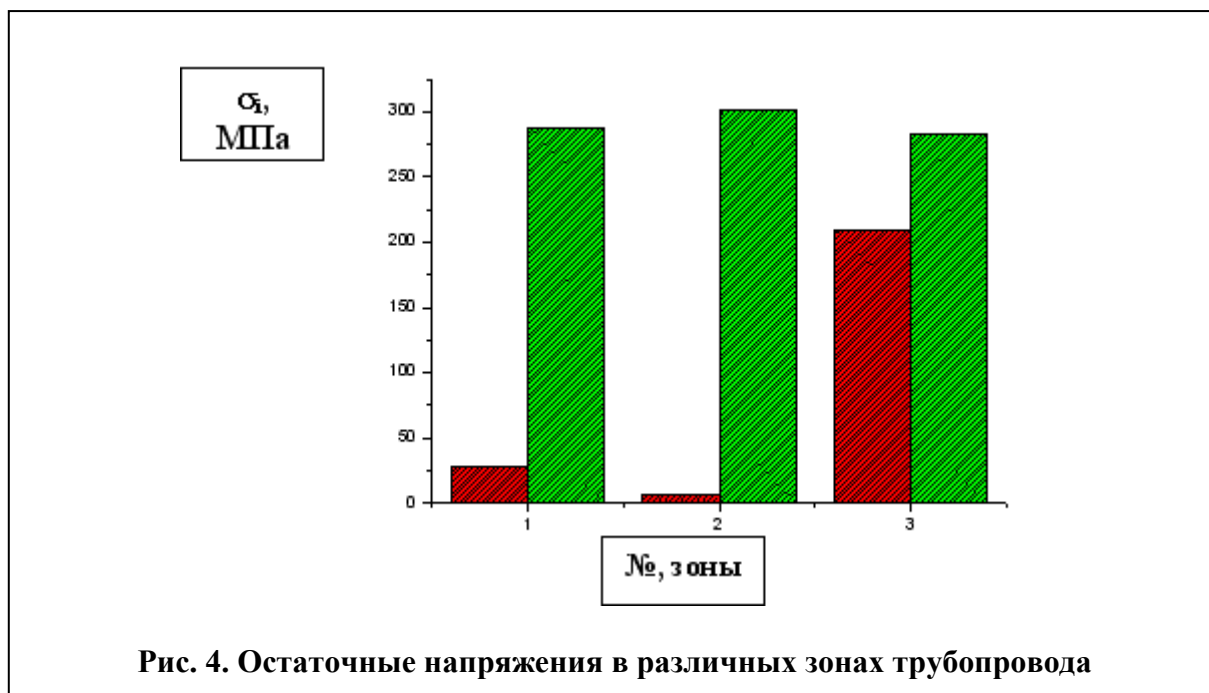


Рис. 4. Остаточные напряжения в различных зонах трубопровода

На рис. 4 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 горнодобывающей промышленности

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.

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, Коломийцев 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. **Овсеенко Е. С.**, Обеспечение качества изготовления малоожестких деталей типа дисков газотурбинных установок за счет снижения технологических остаточных деформаций, автореферат, М., 2011.