

«Пеликан» – первый российский роботизированный дифрактометр для анализа остаточных напряжений

Т. И. Иванова¹, А. В. Шепшелевич¹, И. В. Степанов¹, Д. А. Дмитриев¹, В. С. Ярмушов¹ УДК 681.2

АО «ИЦ «Буревестник» – крупнейшее в России предприятие по исследованию, разработке и производству рентгеновской аппаратуры для промышленных и научных целей, является дочерней компанией АК «АЛРОСА» (ПАО). Среди широкой линейки продукции отдельной строкой в историю развития предприятия вписаны рентгеновские дифрактометры, серийный выпуск которых начался 65 лет назад и продолжается до сих пор. За это время было запущено в эксплуатацию более десяти тысяч дифрактометров, успешно зарекомендовавших себя как надежный аналитический инструмент для материаловедческих исследований во всех известных научно-образовательных центрах нашей страны, федеральных университетах и институтах РАН, а также в госкорпорациях «Росатом», «Роскосмос», «Ростех», в российских федеральных ядерных центрах, на предприятиях Объединенной двигательной корпорации, в компаниях «Норникель», «Роснефть», РУСАЛ и многих других. В статье представлена новая разработка – первый российский роботизированный дифрактометр для анализа остаточных напряжений. Описаны принцип работы, характеристики, возможная комплектация и сферы применения прибора.

Ключевые слова: остаточное напряжение, рентгеновская дифракция, роботизированный дифрактометр

Рентгеновская дифрактометрия в сочетании со специализированным программным обеспечением является эффективным методом неразрушающего контроля для диагностики и анализа распределения остаточных напряжений в деталях и металлоконструкциях.

В 2025 году АО «ИЦ Буревестник» завершил успешными испытаниями разработку специализированного дифрактометра для определения остаточных напряжений, получившего название «Пеликан». Это первый российский роботизированный дифрактометр, который позволяет анализировать остаточные напряжения в различных, в том числе, труднодоступных точках поверхности крупногабаритных объектов. Аппарат является важным аналитическим инструментом в производственном контроле качества.

Остаточными называют напряжения, которые остаются и уравниваются внутри твердого тела после устранения причин, первоначально вызвавших их появление, то есть после снятия внешней нагрузки.

Остаточные напряжения остаются в любой детали после ее обработки. Кроме того, они могут возникать вследствие фазовых превращений, облучения частицами высоких энергий, неоднородного нагрева и охлаждения и т. д.

Часто остаточные напряжения достигают 70–80% предела текучести материала, а иногда бывают еще более высокими. В некоторых случаях они оказываются весьма опасными для целостности деталей, сварных соединений и конструкций и могут привести к их разрушению.

Напряжения приводят к изменениям дифрактограмм, что позволяет изучать их рентгеновскими методами, поскольку длина волны рентгеновского излучения того же порядка, что и постоянная кристаллической решетки. Рентгенодифракционный метод определения остаточных напряжений основывается на том, что упругая деформация кристаллической решетки изменяет межплоскостные расстояния и приводит к угловому сдвигу дифракционных линий, особенно заметному в дальнеугловой области рентгенограммы.

¹ АО «ИЦ «Буревестник», Санкт-Петербург, РФ.

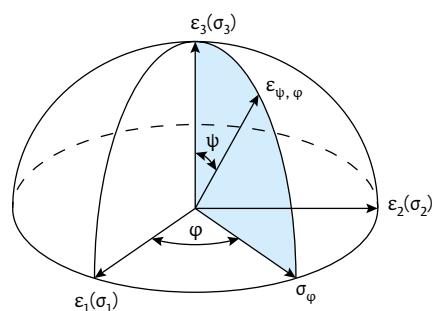


Рис. 1.
Эллипсоид напряжений

В реальных деталях напряженное состояние является объемным, его можно представить в виде эллипсоида (рис. 1).

Напряженное состояние образца определяется тремя главными нормальными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Направление σ_3 перпендикулярно поверхности образца, а σ_1 и σ_2 действуют в плоскости образца. Исследуемые образцы не подвергаются внешним воздействиям (напряжения являются остаточными), поэтому на поверхности из условий равновесия $\sigma_3 = 0$.

Рентгеновские лучи проникают в образец на глубину порядка десятка микрометров, то есть на малую часть его толщины, поэтому с достаточной точностью можно считать, что в этом тонком приповерхностном слое $\sigma_3 \approx 0$, а напряженное состояние определяется суммой главных напряжений $\sigma_1 + \sigma_2$, действующих на поверхности.

Рентгенодифракционный узел (рис. 2) дифрактометра «Пеликан» позволяет проводить измерения в диапазоне углов 2θ от 120 до 160°, что обеспечивает регистрацию дифракционных максимумов различных металлов и сплавов в дальнеугловой области.

Для диагностики и анализа напряжений необходимо определить изменения в кристаллической решетке в объеме исследуемого объекта, для этого рентгенодифракционный узел требуется повернуть на $\pm 45^\circ$ от нормали к поверхности образца в двух перпендикулярных направлениях Ω или χ .

Дифрактометр комплектуется линейным позиционно-чувствительным детектором, обеспечивая высокую скорость измерений с большой достоверностью.



Рис. 2. Рентгенодифракционный узел дифрактометра «Пеликан»

Конструкция включает шестиосевой промышленный робот и систему лазерной триангуляции, которые делают возможным позиционирование рентгенодифракционного узла с точностью до 0,02 мм, а абсолютная погрешность измерения угловых положений дифракционных максимумов не превышает $\pm 0,05^\circ$.

Комплектация дифрактометра «Пеликан» может включать рентгеновские трубки с разными материалами анода. Базовая – трубка с медным анодом. По желанию заказчика можно установить трубки с кобальтовым, хромовым, молибденовым и другими анодами. Набор рентгеновских трубок с различными длинами волн излучения обеспечивает анализ широкого спектра сплавов и материалов.

В состав дифрактометра входит шкаф управления и внешняя система охлаждения рентгеновской трубки. Защитный кабинет, ограждающий рабочую область, выполнен таким образом, чтобы уберечь персонал от воздействия рентгеновского излучения. Его конструкция соответствует всем санитарным нормам и правилам РФ, предъявляемым к дифрактометрам. Система безопасности исключает несанкционированное попадание человека внутрь во время измерений.

Дифрактометр комплектуется встроенным ПК с программным обеспечением DifraVision, которое управляет

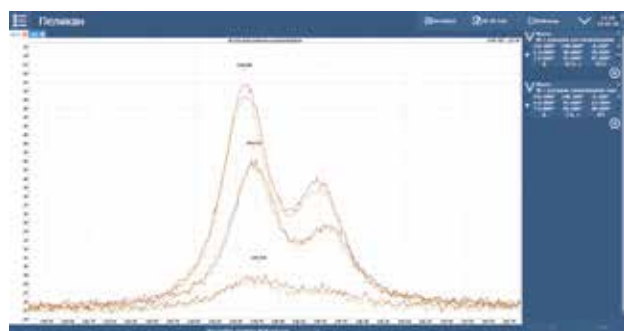


Рис. 3.
Интерфейс ПО DifraVision, разработанного АО «ИЦ «Буревестник»

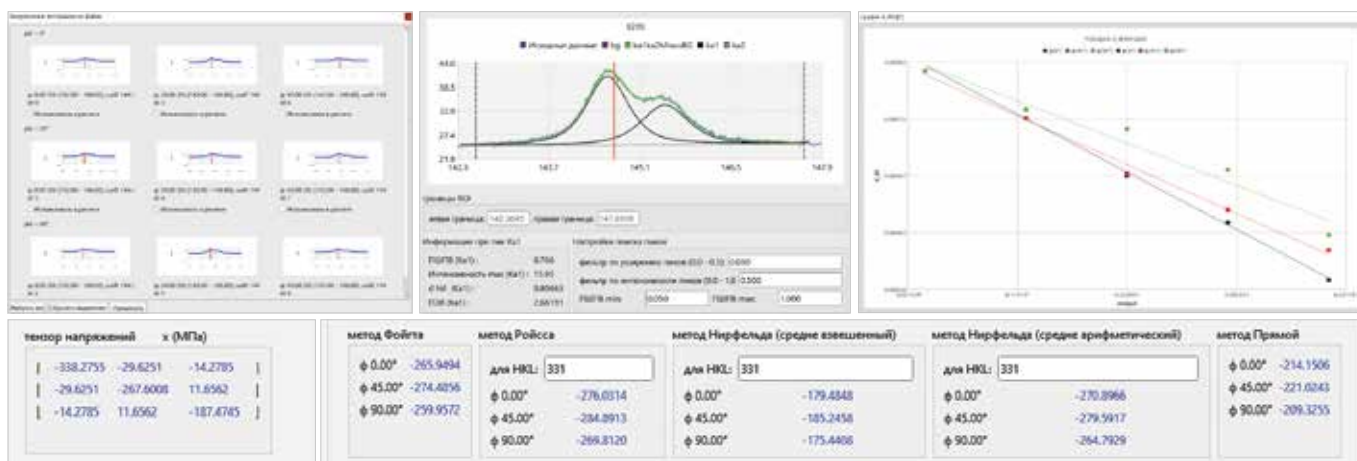


Рис. 4. Интерфейс ПО StressMaster

аппаратом и собирает данные, представляющие собой рентгенограмму в цифровом виде, то есть зависимость скорости счета импульсов от угловых положений блока детектирования и рентгеновской трубки для заданных в эксперименте угловых диапазонов (рис. 3).

Анализ остаточных напряжений вдоль заданных направлений, а также расчет полного тензора напряжений выполняется при помощи программного обеспечения StressMaster, разработанного АО «ИЦ «Буревестник» (рис. 4). В программу встроена база данных материалов для автоматического выбора различных рентгеновских и упругих констант, используемых при расчете остаточных напряжений в четырех разных приближениях, в том числе для заданных пользователем кристаллографических направлений hkl.

Завершение разработки роботизированного дифрактометра «Пеликан» для анализа остаточных напряжений – очень важный этап в отечественном приборостроении. На рынок выходит высокотехнологичный инструмент, который будет востребован в машиностроении, производстве авиадвигателей, газовых и паровых турбин и других областях промышленности, где рабочие процессы предусматривают возникновение в изделиях остаточных напряжений, которые следует контролировать.

Авторы / Authors

Иванова Татьяна Ивановна, к. г.-м. н., заведующая лабораторией рентгеновских дифрактометров и методов АО «ИЦ «Буревестник», Россия, 197350, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Паршина, д. 3, стр. 1. Область научных интересов: кристаллография и рентгеновская дифракция.

Ivanova Tatyana Ivanovna, PhD (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of X-ray Diffractometers and Methods of Bourevestnik JSC, Russia, 197350, St. Petersburg, st. Lyotchika Parshina, 3, building 1. Area of scientific interests: crystallography and X-ray diffraction. ivanovati@alrosa.ru

Шепшелевич Андрей Витальевич, к. т. н., ведущий инженер, АО «ИЦ «Буревестник», Россия, 197350, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Паршина, д. 3, стр. 1. Область научных интересов: разработка и испытания электромеханических узлов. Shepshelevich Andrey Vitalievich, Ph.D., leading engineer, Bourevestnik JSC, Russia, 197350, St. Petersburg, st. Lyotchika Parshina, 3, building 1. Area of scientific interests: development and testing of electromechanical devices.

Степанов Иван Владимирович, ведущий научный сотрудник, АО «ИЦ «Буревестник», Россия, 197350, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Паршина, д. 3, стр. 1. Область научных интересов: физика твердого тела и рентгеновская дифракция. Stepanov Ivan Vladimirovich, leading researcher, Bourevestnik JSC, Russia, 197350, St. Petersburg, st. Lyotchika Parshina, 3, building 1. Area of scientific interests: solid state physics and X-ray diffraction.

Дмитриев Дмитрий Алексеевич, ведущий инженер программист, АО «ИЦ «Буревестник», Россия, 197350, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Паршина, д. 3, стр. 1. Область научных интересов: программирование микроконтроллеров, написание и отладка управляющего ПО. Dmitriev Dmitry Alekseevich, leading software engineer, Bourevestnik JSC, Russia, 197350, St. Petersburg, st. Lyotchika Parshina, 3, building 1. Area of scientific interests: microcontroller programming, development and testing of hardware.

Ярмушов Вадим Сергеевич, ведущий инженер-программист, АО «ИЦ «Буревестник», Россия, 197350, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Паршина, д. 3, стр. 1. Область научных интересов: написание и отладка аналитического ПО. Yarmushov Vadim Sergeevich, leading engineer programmer, Bourevestnik JSC, Russia, 197350, St. Petersburg, st. Lyotchika Parshina, 3, building 1. Area of scientific interests: development and testing of analytical software. KravtsovYuN@alrosa.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.03.2026
Принята к публикации 08.04.2026



Дифрактометр роботизированный для определения остаточных напряжений **ПЕЛИКАН**

Система управления

ПО «DifraVision»

обеспечивает управление аппаратом и сбор данных

Аналитический комплекс «StressMaster»

осуществляет обработку данных и расчет напряжений

Автономная система охлаждения

Промышленный робот с 6-ю степенями свободы

Защитный кабинет

обеспечивает безопасность персонала от воздействия рентгеновского излучения

«Пеликан» — первый российский роботизированный дифрактометр для анализа остаточных напряжений в металлических изделиях. Позволяет проводить измерения в различных, в том числе труднодоступных, точках сложных поверхностей крупногабаритных объектов.

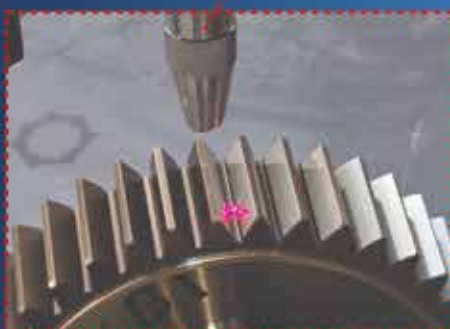
Неразрушающий контроль качества

Рентгеновский метод определения остаточных напряжений

Высокая скорость проведения измерений с большой достоверностью

Быстрая смена рентгеновских трубок с различными анодами

(медный, кобальтовый, хромовый, железный и другие)



Промышленный робот с измерительным узлом