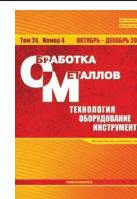




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Использование метода синхротронной компьютерной ламинаграфии при изучении особенностей строения металлических сплавов (обзор исследований)

Олег Кутькин^{1, а, *}, Иван Батаев^{1, б}, Глеб Довженко^{2, в}, Зинаида Батаева^{3, д}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Никольский пр., 1, Кольцово, 630559, Россия

³ Сибирский государственный университет водного транспорта, ул. Щетинкина, 33, г. Новосибирск, 630099, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0003-1277-388X>,  kutkino@list.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>,  i.bataev@corp.nstu.ru,

^в  <https://orcid.org/0000-0003-0615-0643>,  g.dovjenko@skif.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0001-5027-6193>,  bataevazb@ngs.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.1.08

История статьи:

Поступила: 04 октября 2022

Рецензирование: 02 ноября 2022

Принята к печати: 03 ноября 2022

Доступно онлайн: 15 декабря 2022

Ключевые слова:

Компьютерная томография
Компьютерная ламинаграфия
Рентгеновские методы исследования
Синхротронное излучение

Финансирование:

Работа выполнена в соответствии с Федеральным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FSUN-2020-0014 (2019-0931)): «Исследования метастабильных структур, формируемых на поверхностях и границах раздела материалов при экстремальном внешнем воздействии».

АННОТАЦИЯ

Статья содержит обзор исследований, связанных с использованием синхротронной компьютерной ламинаграфии при изучении особенностей строения металлических сплавов, подвергнутых различным методам внешнего воздействия. **Введение.** Отражена важная роль рентгеновского излучения в области исследования материалов. Сопоставлены возможности стандартных рентгеновских приборов, оснащенных рентгеновскими трубками, и современных источников синхротронного излучения (СИ), характеризующихся уникальными параметрами. **Методы изучения плоских образцов. Томография и синхротронная ламинаграфия.** Информативным методом, основанным на использовании синхротронного рентгеновского излучения, является компьютерная томография (SRCT), позволяющая получать изображения сечений изучаемых объектов путем обработки множества абсорбционных рентгенограмм. Представлена краткая классификация томографов пяти поколений. Проблем, возникающих при получении данных от некомпактных (неизометричных) образцов, удается избежать при использовании метода синхротронной компьютерной ламинаграфии (SRCL), который сочетает в себе принципы ламинаграфии с преимуществами синхротронной визуализации. В настоящее время метод применяется для неразрушающего контроля неизометричных объектов на ряде источников синхротронного излучения (ESRF, ANKA, Spring-8). **Разрешение компьютерной синхротронной ламинаграфии.** Использование монохроматического излучения при реализации метода компьютерной ламинаграфии является фактором, обеспечивающим высокое пространственное разрешение, вплоть до микронного и субмикронного масштаба. Не менее важный фактор связан с характеристиками используемого детектора. При использовании наноламинаграфии получены изображения с разрешением ~ 100 нм. **Сравнение методов ламинаграфии и томографии. Метод дополненной ламинаграфии (Augmented laminography).** Метод дополненной ламинаграфии (Augmented laminography) позволяет повысить качество изображений за счет дополнения пространства Фурье, анализируемого при реализации ламинаграфии, информации, полученной при использовании компьютерной томографии с более низким разрешением. Реконструкция, выполненная с использованием метода Augmented laminography, характеризуется отсутствием существенных артефактов и высоким разрешением. **Реализация метода ламинаграфии.** Угол наклона поворотной оси θ при реализации метода SRCL связан с геометрией образцов и в каждом случае определяется экспериментально. С целью достижения необходимого разрешения величина θ должна обеспечить оптимальное среднее значение интенсивности прошедшего излучения. Энергию рентгеновского излучения рассчитывают исходя из характеристик материала, а именно с учетом показателя поглощения излучения. Для реконструкции изображений исследуемых объектов используют программные комплексы, реализующие метод фильтрованной обратной проекции, основанный на преобразовании Радона. **Примеры использования ламинаграфии для анализа образцов из металлических сплавов.** Метод ламинаграфии может быть использован при выполнении *in situ* исследований, что позволяет в режиме реального времени контролировать процессы, развивающиеся в различных условиях внешнего воздействия, например, при пластической деформации металлических пластин. Интерес представляют данные о формировании в процессе нагружения металлических заготовок дефектов типа пор. В литературе описаны многочисленные примеры применения *post-mortem* исследований металлических сплавов различного назначения. Важная информация получена при изучении усталостных трещин, а также дефектов, возникающих в процессе контактно-усталостного нагружения материалов. **Заключение.** Реализация методов SRCT и SRCL рациональна на строящемся в Новосибирске источнике синхротронного излучения поколения 4+ «СКИФ».

Для цитирования: Использование метода синхротронной компьютерной ламинаграфии при изучении особенностей строения металлических сплавов (обзор исследований) / О.М. Кутькин, И.А. Батаев, Г.Д. Довженко, З.Б. Батаева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 219–242. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-219-242.

Введение

Считается, что с открытием в 1895 году рентгеновского излучения и дифракции рентгеновских лучей в 1912 году началась «новая эра» в области исследования материалов. Этот тип лучей

*Адрес для переписки

Кутькин Олег Максимович, студент, лаборант
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (962) 811-59-27, e-mail: kutkino@list.ru

оказался мощнейшим инструментом, позволяющим выявлять особенности строения материалов на разных масштабных уровнях. За период чуть больше 100 лет специалистами предложены десятки методов исследований, основанных на использовании рентгеновского излучения. В большинстве аналитических приборов в качестве источников излучения используются рентгеновские трубки. Таких приборов, выпущенных в различных странах, огромное количество, оценить которое весьма проблематично.

Особый вид дорогостоящего и по многим параметрам уникального аналитического оборудования составляют ускорители частиц и специализированные источники синхротронного излучения. Синхротронное излучение (СИ) представляет собой электромагнитные колебания, создаваемые ультрарелятивистскими электронами при их движении по криволинейной траектории под действием магнитного поля. При движении по круговой орбите излучение имеет распределение интенсивности в виде конуса с углом расхождения $\gamma^{-1} = E/mc^2$ рад. Максимум мощности испускаемого излучения приходится на частоту:

$$\nu_{\max} = \frac{3}{2} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^3 \text{ Гц},$$

где ν_{\max} – частота излучения; E – полная энергия электрона; m – масса электрона; c – скорость света.

Изменением траектории движения электрона можно варьировать максимум излучения в широком диапазоне электромагнитной шкалы. Синхротронное излучение обладает высокой степенью линейной поляризации в плоскости орбиты электрона и большей интенсивностью по сравнению с излучением рентгеновских трубок [1].

Первыми источниками СИ были ускорители заряженных частиц, при работе которых синхротронное излучение является «паразитным». По мере выявления достоинств синхротронного излучения и увеличения числа задач, решаемых с его использованием, оказалось, что имеет смысл создавать специализированные источники СИ, в которых анализируемое излучение является не «паразитным», а основным, полезным.

Уникальные параметры СИ определяют его огромные преимущества по сравнению с други-

ми источниками, в том числе с рентгеновскими трубками. Большие значения потока фотонов обеспечивают более высокое разрешение при эквивалентном времени экспозиции путем уменьшения размеров пикселей рентгеновских детекторов либо за счет изменения размеров пучка рентгеновского излучения.

Одним из методов, основанных на использовании синхротронного или рентгеновского излучения, является компьютерная томография (КТ), позволяющая получать изображения сечений изучаемых объектов обработкой множества абсорбционных рентгенограмм. При реализации анализируемого метода компьютер обеспечивает работу источника рентгеновского излучения и обработку данных, зафиксированных детектором. К преимуществам использования синхротронного источника при данном способе визуализации изображений относятся параллельность лучей и высокие значения яркости излучения, что приводит к сокращению времени сбора данных и улучшению контраста при монохроматическом излучении.

С использованием томографии можно получать трехмерные картины объектов для дальнейшего их анализа. Компьютерная томография показывает очень хорошие результаты при изучении компактных (изометричных) образцов. В то же время при реализации этого метода исследований проявляются некоторые ограничения. Во-первых, для обеспечения качества получаемых изображений необходим максимально возможный доступ к изучаемому объекту. Второе ограничение связано с тем, что для предотвращения чрезмерного поглощения излучения размеры объекта должны быть небольшими. При невыполнении указанных условий на изображениях проявляются артефакты в виде искажений, не соответствующих реальному объекту. С целью уменьшения количества артефактов, возникающих при реализации метода компьютерной томографии, образец должен быть вытянут на величину, меньшую чем эффективное поле зрения 2D-детектора во всех направлениях, перпендикулярных оси вращения. С учетом этого обстоятельства наиболее рациональным является анализ образцов цилиндрической формы [2].

Указанные проблемы могут быть решены при использовании метода ламинографии, а также томографии с ограниченным углом. В свою оче-

редь, метод томографии с ограниченным углом обладает недостатками, которые были рассмотрены в работе *L. Helfen* и др. [3].

Представленный далее обзор сфокусирован на методе синхротронной ламинографии для анализа металлических сплавов.

Методы изучения плоских образцов

Томография и синхротронная ламинография

Один из возможных подходов к проблеме изучения некомпактных (неизометричных) образцов основан на идее синхронного перемещения источника рентгеновского излучения вместе с детектором вокруг неподвижного предмета. Такой подход был предложен в 1932 году *Ziedses des Plantes* и метод на его основе назван планиграфией (*planigraphies*) [4]. В соответствии с этим методом для получения изображения одного сечения объекта, находящегося в фокальной плоскости, используется совокупность рентгенограмм, полученных за один цикл сканирования. Отмеченный принцип лежит в основе метода классической томографии (также называемый методом ламинографии), при реализации которого для получения изображений разных сечений необходимо изменять положение объекта исследования по вертикали. Несмотря на простоту, метод является быстрым, изображения характеризуются хорошим качеством (разрешением).

В 1970-х годах такой подход [5] стали применять в медицине для изучения человека. Адаптированный принцип классической томографии (ламинографии) применялся в медицинских томографах первого поколения (рис. 1). Объектом исследования первых приборов был мозг (рис. 2). Следует подчеркнуть, что размер пикселя в них составлял 3 мм (в современных приборах – 30...200 мкм). По сравнению с современными томографами приведенное на рисунке изображение характеризуется достаточно низким качеством. Его анализ не позволяет получить полноценную информацию о состоянии пациента.

Специалистами предложены различные классификации томографов. В соответствии с одной из них выделяют пять поколений томографов (рис. 1, б и 3) [7], различающихся конструктивными решениями и количеством проекций, фиксируемых детекторами. При использовании сканеров первого поколения изображения получали послойно передвижением одной остроуправленной рентгеновской трубки и одного детектора вдоль рамы. После 160 измерений рама поворачивалась на угол 1° в осевом направлении и анализировалось состояние следующего слоя. Измерение интенсивности излучения при анализе каждого слоя длилось ~ 4,5 мин, а построение изображения занимало ~ 2,5 часа.

В сканере второго поколения (середина 1970-х годов) (рис. 3, а) использовалась трубка,

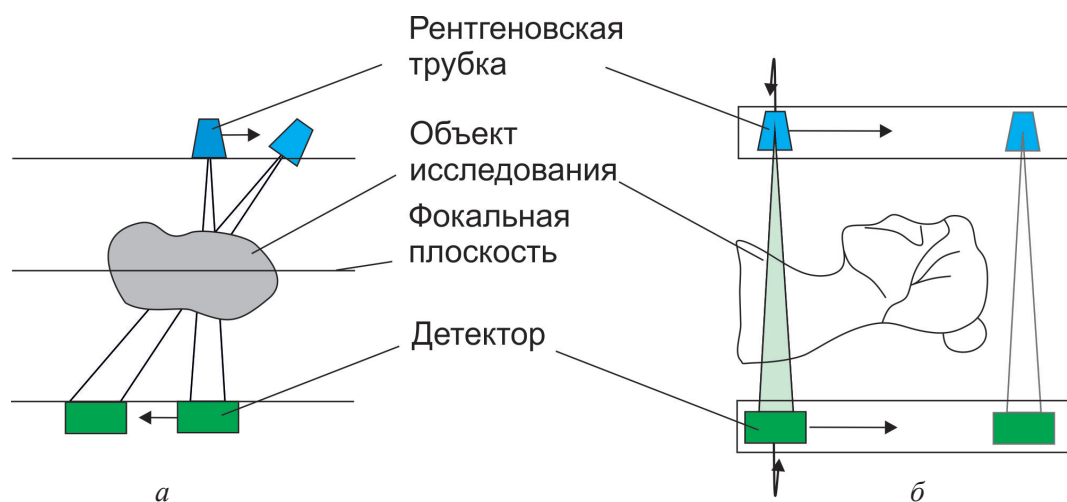


Рис. 1. Схема классической томографии (а) [6] и схема томографа первого поколения (б) [7]

Fig. 1. Schematic of classical tomography (a) [6] and schematic of the first generation tomograph (b) [7]

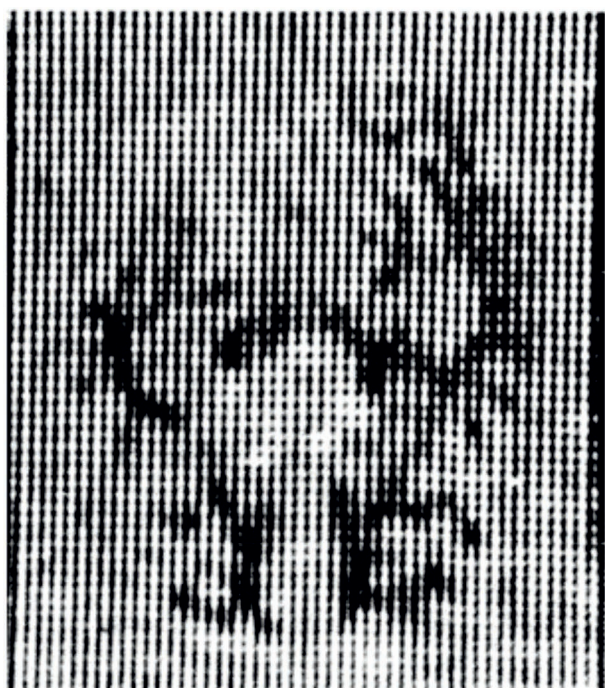


Рис. 2. Первое изображение мозга, полученное методом томографии [8]

Fig. 2. The first image of the brain obtained by tomography [8]

формирующая веерный рентгеновский пучок в сочетании с несколькими детекторами, которые, вращаясь вокруг пациента, находились напротив друг друга. Благодаря веерному лучу и нескольким детекторам угол поворота в приборах этого типа увеличился до 30° . При этом, так же как и в приборах первого поколения, был использован принцип параллельного сканирования. Время измерений, необходимое для получения одного изображения, в данном случае составляло ~ 18 с.

В приборах третьего поколения начали использовать принцип спирального перемещения рентгеновской трубки и детекторов излучения, прошедшего через пациента. Один шаг соответствовал линейному перемещению стола на определенную величину. При этом трубка и детекторы синхронно осуществляли вращение на один полный оборот вокруг лежащего на столе пациента. Такое техническое решение позволило значительно уменьшить время исследования. Увеличилось и количество детекторов (до ~ 700 штук). При использовании приборов третьего поколения

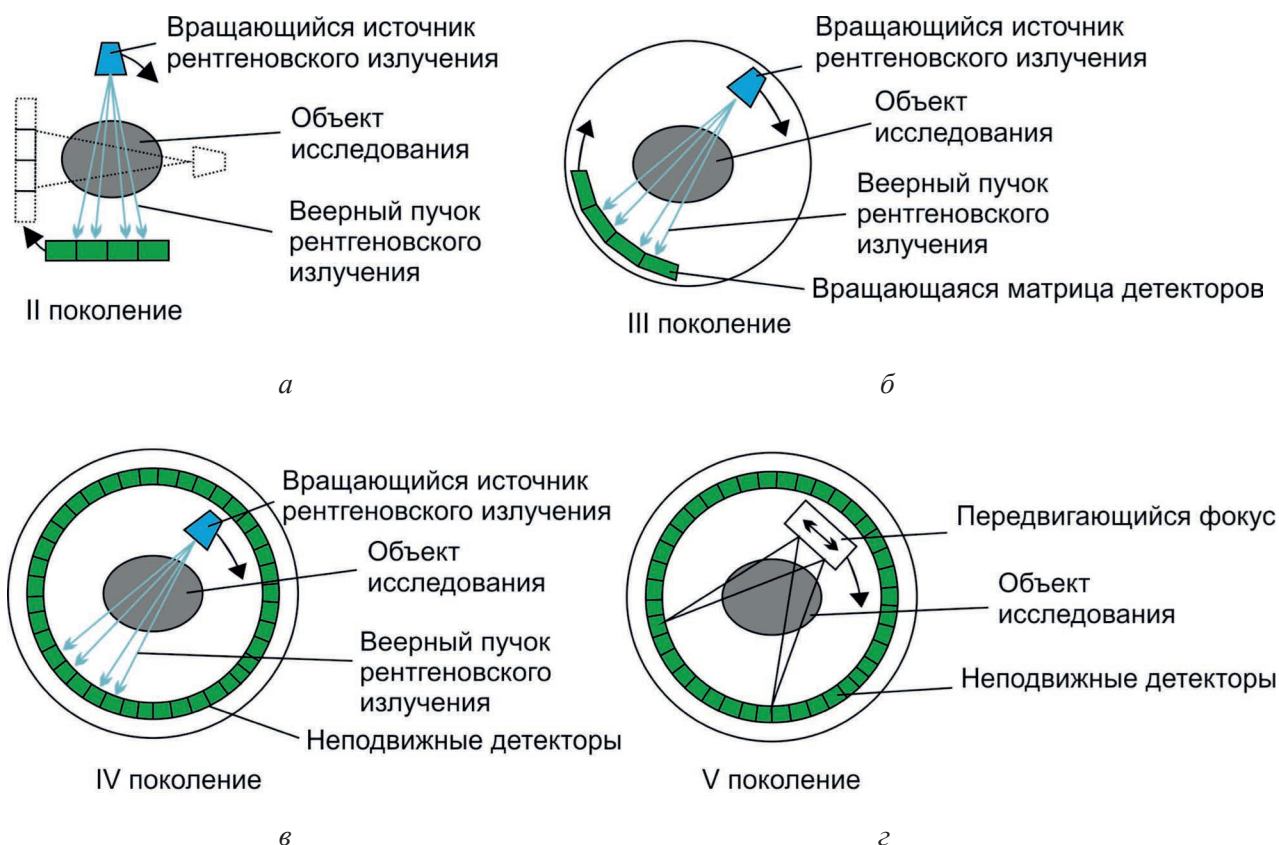


Рис. 3. Схемы томографов нескольких поколений [7]

Fig. 3. Schematics of several generations of tomographs [7]

появилась возможность для исследования брюшной полости и легких пациента.

В конструкции томографов, соответствующих четвертому поколению, совокупность неподвижных детекторов (1088 люминесцентных датчиков) располагается в виде кольца (вокруг пациента). Время сканирования (при получении одного снимка) уменьшилось до 0,7 с [7].

Главной особенностью приборов пятого поколения (начало 1980-х годов) стало использование неподвижной электронно-лучевой пушки. В процессе съемки поток электронов фокусируется и направляется на вольфрамовую мишень, находящуюся под столом пациента. Быстродействующие твердотельные детекторы располагаются напротив мишеней в форме дуги с углом 216° . Существенных отличий в качестве изображений по сравнению с предыдущим поколением оборудования нет. При этом время сканирования уменьшилось до 33 мс. Такие томографы могут быть применены для исследования сердца.

J. Zhou с соавторами в работе [6] представили новый подход к использованию ламинаграфии для исследования материалов. В соответствии с ним анализируемый объект линейно перемещается относительно веерного пучка, созданного микрофокусной рентгеновской трубкой (рис. 4). Такое решение позволяет получать данные, соответствующие повороту на угол α для объекта, находящегося в параллельном пучке.

Предложенный *J. Zhou* с соавторами метод имеет ряд преимуществ по сравнению с классической томографией. За одно сканирование он

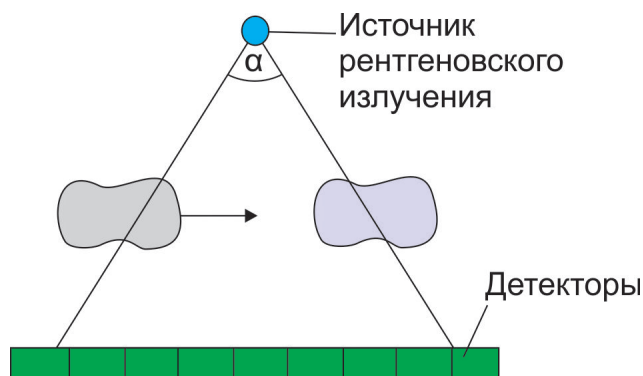


Рис. 4. Реализация процесса ламинаграфии по схеме, предложенной *J. Zhou* и др. [6]

Fig. 4. Implementation of the laminography process according to the scheme proposed by *J. Zhou* [6]

позволяет получить изображение всего объема образца. Его практическая реализация обеспечивает улучшенное качество изображения сечений (без эффекта размытия).

Принципы формирования излучения при использовании синхротронных источников и рентгеновских трубок существенно отличаются. По этой причине для источников СИ предложены иные технические решения, позволяющие получать томографические изображения. Метод синхротронной компьютерной томографии (*Synchrotron radiation computed tomography – SRCT*) предполагает, что образец вращается вокруг оси, перпендикулярной потоку рентгеновского излучения (рис. 5, а).

Проблем, возникающих при получении данных от некомпактных (неизометричных) образцов, удастся избежать с помощью метода синхротронной компьютерной ламинаграфии (*Synchrotron radiation computed laminography – SRCL*), предложенного в 2005 году *L. Helfen* с соавторами [9]. На установке, совместимой со стационарным синхротронным источником (*ESRF*, станция *ID19*), ими была разработана

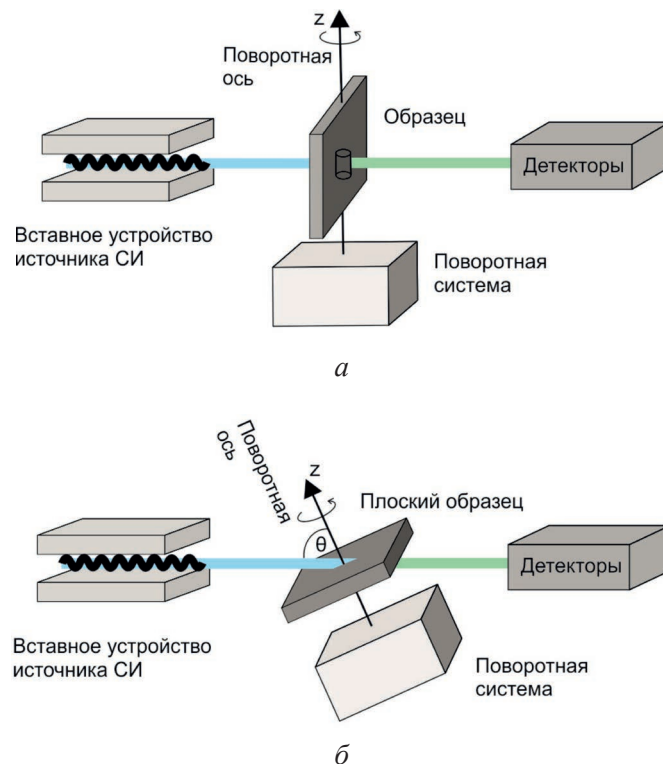


Рис. 5. Схемы установок, реализующих принцип томографии (а) и ламинаграфии (б) [12]

Fig. 5. Schematics of setups, implementing the principle of tomography (a) and laminography (b) [12]

методика сбора данных о строении анализируемого объекта.

Метод *SRCL* сочетает в себе принципы ламинографии с преимуществами синхротронной визуализации. В настоящее время он применяется для неразрушающего контроля неизометричных объектов на ряде источников синхротронного излучения (*ESRF, ANKA, Spring-8*).

При реализации метода *SRCL* поворотная ось отклонена на угол θ по отношению к направлению рентгеновского луча (рис. 5, б). Такое решение, влияющее на качество изображения, позволяет уменьшить расстояние от образца до детектора. Угол наклона θ определяется экспериментально. При этом максимальный разворот оси обычно ограничен конструктивными возможностями гониометра, удерживающего и вращающего образец. Результаты исследований, получаемые при использовании методом *SRCL*, сопоставимы с данными, которые могут быть зафиксированы методом цифрового томосинтеза [10, 11].

L. Helfen с соавторами полагают, что метод *SRCL* можно воспринимать как более обобщенную версию метода *SRCT* [2]. Исходя из этого и схожести в конструкции оборудования методы компьютерной ламинографии и томографии могут быть реализованы на одной установке. В работе *S.L. Fisher* и др. [13] такая возможность была продемонстрирована при использовании лабораторного источника рентгеновского излучения. Показано, что томографические методы исследования, в том числе основанные на фазовом контрасте [14], могут быть применены и к ламинографии.

Метод компьютерной ламинографии предполагает необходимость использования оборудования, в состав которого входит источник рентгеновского излучения, поворотный стол с наклонной осью, система детекторов и компьютер с программным комплексом для обработки данных. В зависимости от поставленной задачи могут быть реализованы технические решения, обеспечивающие какое-либо дополнительное воздействие (растяжение, кручение, нагрев образца, пропитка волокнистого композита и др.). В последующих разделах статьи приведены примеры с применением подобных установок.

Разрешение компьютерной синхротронной ламинографии

Ранее упоминалось, что при использовании томографии необходим полный доступ к изучаемому объекту, размер которого меньше размера детектора. В противном случае происходит ухудшение качества получаемого изображения. Это обстоятельство ограничивает применение метода *SRCT* для исследования больших, неизометричных образцов, например пластин. Причиной размытия (ухудшения качества) изображения и появления артефактов является недостаток данных, которые требуются для точного восстановления сечения. Восстановление изображений при отсутствии некоторой доли данных может быть выполнено с использованием обратного пространства (трехмерного пространства Фурье) (рис. 6) [2]. Следует, однако, иметь в виду, что синхротронная компьютерная ламинография осуществляет лучшее пространственное разрешение в тех направлениях, вдоль которых потерь данных не происходит, т. е. вне отсутствующих конусов.

Выделенное на рис. 6 направление оси образца k_z ориентировано параллельно падающему лучу рентгеновского излучения. Область обратного пространства, полученная после преобразования Фурье одной двумерной проекции и выделенная на рис. 6, б серым цветом, представляет собой плоскость, параллельную векторам k_u и k_v . При построении большого числа проекций анализируемая область образует вращательно-симметричное тело, внешний контур которого имеет форму гиперболической поверхности, описываемой уравнением

$$k_{xy}^2(k_z) = k_{\max}^2 + k_z^2 \operatorname{tg} 2\theta,$$

где $k_{\max} = \frac{1}{2s_p}$, s_p – размер пикселя.

В представленном на рис. 6, б объеме отсутствуют два конуса с углом раскрытия 2θ . Объясняется это наклоном оси вращения при реализации метода *SRCL*. Потеря информации в одном направлении из-за отсутствия некоторой доли данных может быть компенсирована увеличением пространственного разрешения в других направлениях. Использование монохроматического излучения при реализации метода

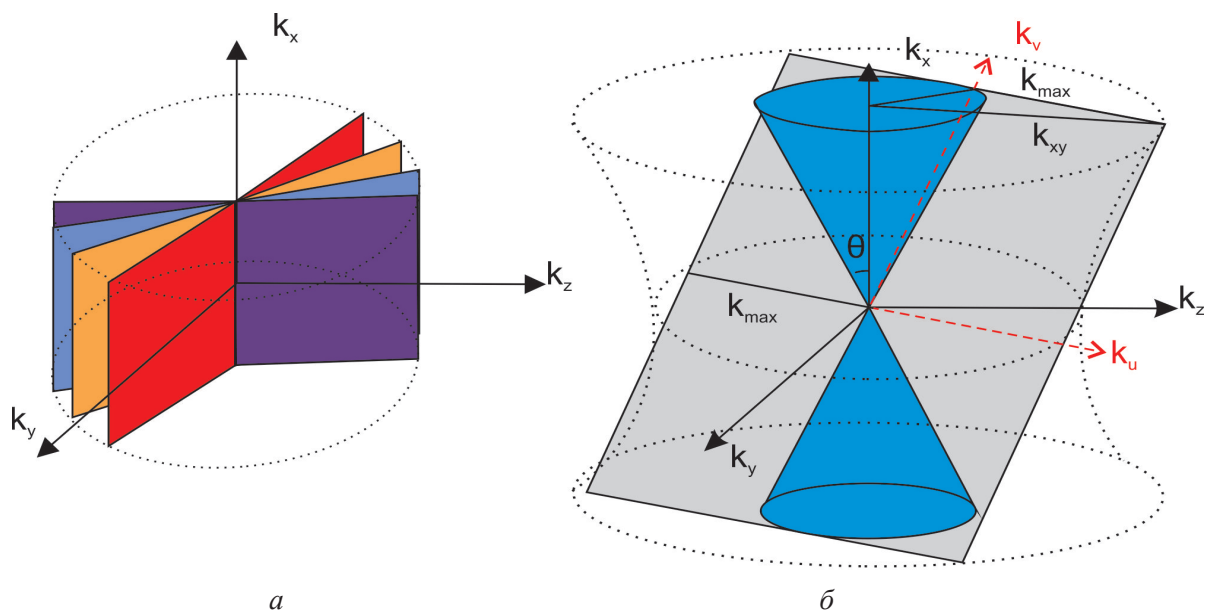


Рис. 6. Области обратного пространства, полученные с использованием преобразования Фурье:

a – SRCT-сканирование; *б* – SRCL-сканирование. Конусы недостающей информации обозначены синим цветом [2]

Fig. 6. Reciprocal space regions obtained using the Fourier transform:
a – SRCT-scan; *б* – SRCL-scan. Cones of missing information are marked in blue [2]

SRCL является фактором, обеспечивающим высокое пространственное разрешение вплоть до микронного и субмикронного масштаба. Максимальное разрешение метода определяется характеристиками используемого детектора. С помощью нанолитографии получены изображения с разрешением ~ 100 нм [15].

В тех случаях, когда пространственное разрешение не является определяющим требованием, может быть применен метод нейтронной ламинографии, достоинством которого является чувствительность к химическим элементам, отличная от рентгеновских лучей. Особенности адаптации метода ламинографии для нейтронной визуализации представлены в работе [12].

Сравнение методов ламинографии и томографии

Метод дополненной ламинографии (Augmented laminography)

Посредством метода компьютерной ламинографии реализуется изотропная схема сканирования луча, которая осуществляет одинаковое разрешение и чувствительность (*resolution and sensitivity*) в направлениях, перпендикулярных

оси вращения. Как упоминалось ранее, эта особенность, характерная для метода КЛ, дает отличные результаты по сравнению с методом КТ с ограниченным углом.

Преимущества схемы компьютерной ламинографии заключаются в следующем:

- 1) полный поворот на 360° доступен даже для крупногабаритных образцов;
- 2) постоянный наклон образца при выполнении анализа обеспечивает близкое среднее значение интенсивности прошедшего излучения;
- 3) вращательная симметрия доступной области Фурье является фактором, способствующим дальнейшему восстановлению изображения.

Отмеченные преимущества продемонстрированы в работе *Feng Xu* с соавторами [3]. В тех случаях, когда при реализации метода КТ возникает предельный угол, после которого изображение образца получить не удастся, может быть использован метод КЛ. Отмечается, что артефакты изображения поверхности образца в направлении нормали к движению рентгеновского излучения при реализации метода КТ ограничивают достижимое разрешение в большей степени, чем в методе КЛ. Кроме того, при реализации компьютерной томографии неизотропные артефакты

ты в данных плоскостях создают на изображениях более заметные искажения по сравнению с изотропными артефактами от КТ.

Одно из преимуществ метода синхротронной компьютерной томографии перед синхротронной компьютерной ламинаографией заключается в возможности выбора оптимального соотношения «сигнал/шум – количество артефактов» после сканирования объекта. Если с помощью метода КТ удастся провести сканирование образца при повороте на 360° , то в этом случае имеется возможность выбрать такое количество экспериментальных данных, которое позволит выполнить реконструкцию изображения с большим значением отношения сигнал/шум и меньшим количеством артефактов. Преимущества метода КЛ делают его пригодным в тех случаях, когда диапазон отсутствующего угла, ограниченный геометрией образца или конструктивными особенностями оборудования, для метода КТ велик.

Marcus Zuber и др. разработали метод *Augmented laminography* (метод дополненной ламинаографии – ДЛ) [16], при реализации которого в качестве источников излучения используют рентгеновские трубки. Его достоинства были продемонстрированы на примере исследования окаменелостей. Указанный метод является комбинацией обоих типов сканирования: КТ и КЛ. Идея его заключается в дополнении пространства Фурье ламинаографии информацией, полученной посредством компьютерной томографии с более низким разрешением (рис. 7). Однако при исследовании удлиненных образцов некоторые области пространства Фурье по-прежнему отсутствуют из-за большего поля зрения и, как следствие, низкого разрешения, характерного для компьютерной томографии такого рода объектов. Реализация метода *Augmented laminography* предполагает необходимость увеличения поля зрения при сканировании образца с нулевым наклоном. Связано это с условием КТ-сканирования.

На рис. 8 для демонстрации качества изображений, получаемых с помощью различных методов исследования, приведены результаты анализа тестовых образцов, которые состояли из нескольких слоев, различных по форме и материалам [16]. Изображение плоскости x - y , полученное методом КЛ, характеризуется хорошим разрешением и качеством. Разрешение

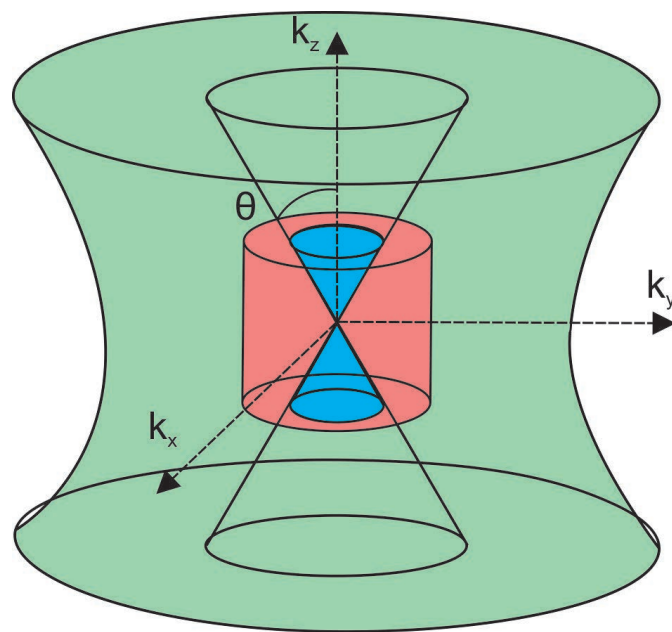


Рис. 7. Области пространства Фурье реконструированного объема. Зеленый объем, находящийся за пределами двух внутренних конусов с углами 2θ , относится к компьютерной ламинаографии, а красный объем – к компьютерной томографии с низким разрешением. Синий объем соответствует области, где недостающая информация в данных ламинаографии может быть восстановлена при использовании метода КТ [16]

Fig. 7. Sampled areas in the Fourier space of the reconstructed volume. The green volume outside the two inner 2θ cones refers to CT laminography and the red volume refers to low-resolution CT. The blue volume corresponds to the area where missing information in the laminography data can be reconstructed using CT [16]

анализируемой плоскости, реконструированное методом КТ, заметно хуже. Наиболее качественный результат демонстрирует метод *Augmented laminography*.

При рассмотрении плоскости x - z методом компьютерной ламинаографии заметны артефакты, существенно искажающие особенности строения анализируемого объекта. Изображение, полученное методом компьютерной томографии, свободно от этого недостатка. При этом для него, так же как и для изображения в плоскости x - y , характерно низкое пространственное разрешение. Реконструкция, полученная методом *Augmented laminography* (рис. 8), характеризуется отсутствием существенных артефактов и высоким разрешением. Основные характеристики трех методов приведены в табл. 1.

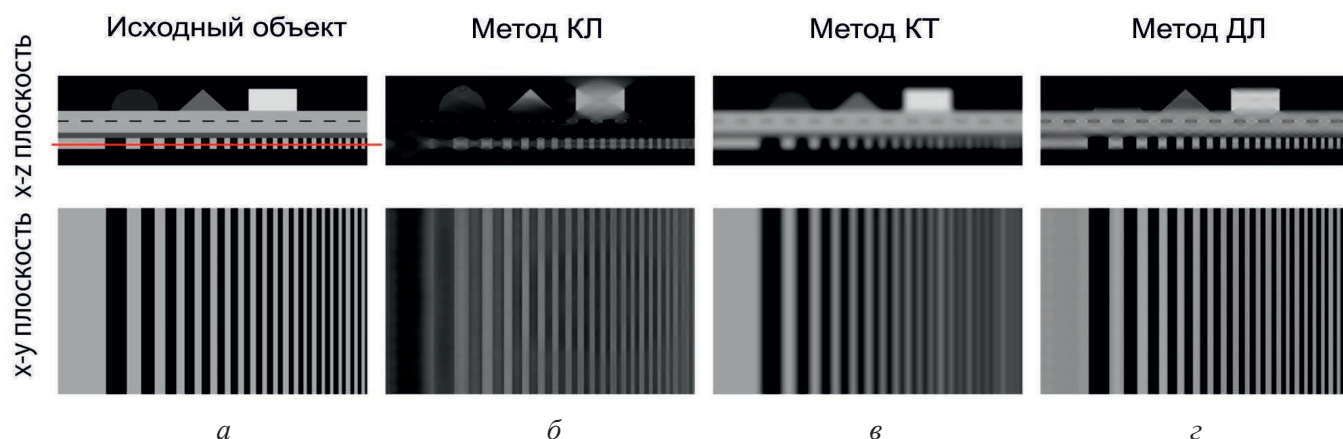


Рис. 8. Сравнение различных методов сканирования объекта, форма которого приведена на схеме а. Ламинография реализована при угле наклона образца $\theta = 29,8^\circ$. На схеме а плоскость x-y обозначена красной линией [16]

Fig. 8. Comparison of different object scanning methods. The laminography is implemented at an inclination angle of the sample $\theta = 29.8^\circ$. In diagram a the x-y plane is marked with a red line [16]

Таблица 1

Table 1

Сравнение методов томографии, ламинографии и дополненной ламинографии [16]

Comparison of tomography, laminography, and augmented laminography methods [16]

Компьютерная томография	Дополненная ламинография	Компьютерная ламинография
+ Высокое разрешение в плоскости xy	+ Высокое разрешение в плоскости xy	+ Одинаковое разрешение вдоль осей x, y, z
+ Может быть достигнуто значительное геометрическое увеличение	+ Типичные артефакты КЛ в значительной степени подавлены (промежуточное между КЛ и КТ разрешение в направлении z)	– Образец должен соответствовать полю зрения
– Размытие в направлении z	– Увеличено время сканирования	– Сильное затухание для больших объектов

Реализация метода ламинографии

Угол наклона поворотной оси θ при реализации метода SRCL связан с геометрией образцов и в каждом случае определяется экспериментально. С целью достижения необходимого разрешения величина θ должна обеспечить оптимальное среднее значение интенсивности прошедшего излучения.

Энергию рентгеновского излучения рассчитывают исходя из характеристик материала, а именно с учетом показателя поглощения излучения. Монохроматическое рентгеновское излучение, проходя через какую-либо среду, при взаимодействии с атомами или молекулами затухает согласно закону Бугера – Ламберта – Бера:

$$I = I_0 e^{-k_\lambda l}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность до прохождения среды толщиной l ; I – интенсивность на выходе из среды. Зависимость показателя поглощения k_λ от длины волны поглощаемого излучения называется спектром поглощения вещества.

В тех случаях, когда образец состоит из нескольких материалов и исходя из значений поглощательной способности, необходимо подобрать уровень энергии, обеспечивающий оптимальный контраст изображения. При этом показатель поглощения определяется выражением

$$k_\lambda l = \int_L f(x, l) dl, \quad (2)$$

где $f(x, l)$ – линейный коэффициент поглощения материала; dl – элемент пути поглощения вдоль луча L .

Исходя из зависимостей (1) и (2), определив на основе экспериментальных данных функцию поглощения, можно восстановить изображение объема изучаемого тела. Для этого необходимо решить уравнение вида

$$\ln \frac{I_0}{I} = \int_L f(x, l) dl. \quad (3)$$

В настоящее время для решения данного уравнения используют программные комплексы, позволяющие по данным томографии или ламинаграфии методами фильтрованной обратной проекции [17], основанной на преобразовании Радона, *Algebraic Reconstruction Technique* и др., реконструировать изображения исследуемых объектов.

Примеры использования ламинаграфии для анализа образцов из металлических сплавов

Первоначально компьютерную ламинаграфию применяли в качестве метода исследования элементов микросистемной техники, а именно печатных плат. Применение его для решения отмеченной задачи актуально и в настоящее время. Позже метод стали применять при изучении объектов культурного наследия [18, 19], в палеонтологии [20], материаловедении [21] и других областях исследования.

В материаловедении метод ламинаграфии востребован при решении задач, связанных с изучением объектов из полимерных композитов [22] и металлических сплавов. Эффект, обусловленный фазовым контрастом, может быть использован для выделения границ раздела между различными материалами со слабой поглощательной способностью. Суть предлагаемого решения заключается в изменении расстояния от источника излучения до образца, что обеспечивает проявление на детекторе интерференционных эффектов. Такой подход способствует улучшению резкости границ компонентов образца.

Ниже рассмотрены примеры использования метода ламинаграфии для анализа ряда сплавов.

In situ исследования при пластической деформации металлических пластин

Метод компьютерной ламинаграфии дает уникальную возможность представления механизмов распространения трещин в листовых материалах и фиксации внутренних повреждений в трех измерениях образца. В ряде работ синхротронную компьютерную ламинаграфию применяли для изучения процессов формирования трещин и разрушения металлических пластин [23–27]. Схема одного из устройств, применяемых для нагружения образцов с концентраторами напряжений, представлена на рис. 9.

Схема станции ID19, расположенной в Европейском центре синхротронных исследований ESRF (Франция), оборудованная устройствами для реализации метода ламинаграфии, представлена на рис. 10 [28]. С помощью нагружающего устройства на ней была выполнена работа по изучению механизмов разрушения и развития трещин в образцах из алюминиевого сплава (табл. 2) [29]. Схема деформируемых образцов представлена на рис. 11. В процессе испытаний оценивали объем образующихся дефектов, их переориентацию и размеры по Ферету (*Feret's shape factor*).

При исследовании материалов методом ламинаграфии ось вращения образца была наклонена по отношению к направлению рентгеновского луча на угол $\sim 65^\circ$ (рис. 12). Для проведения исследований использовали розовый пучок от ондулятора (период 13 мм) с пиковой энергией рентгеновского излучения ~ 26 кэВ, отфильтрованный с помощью алюминиевой пластины толщиной 5,6 мм. Указанные параметры обеспечивали компромисс между проникающей способностью рентгеновских лучей и контрастностью формируемого изображения [31]. При проведении исследований образец, установленный в захватах машины растяжения, вращался на 360° . Единичный шаг поворота составлял $0,1^\circ$. Таким образом, процесс сканирования одного образца предполагал получение и последующую обработку 3599 рентгенограмм. Время экспозиции при получении каждой рентгенограммы составляло 50 мс. Для реконструкции 3D-изображения рентгенограммы обрабатывали с использованием алгоритма фильтрованной обратной проекции [32].

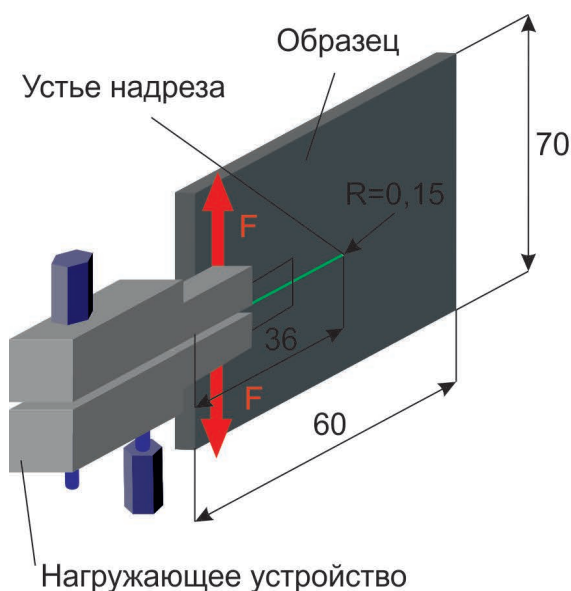


Рис. 9. Схема устройства, используемого для нагружения образца с концентратором напряжений [27]

Fig. 9. Schematic of the device used for loading a specimen with a stress concentrator [27]

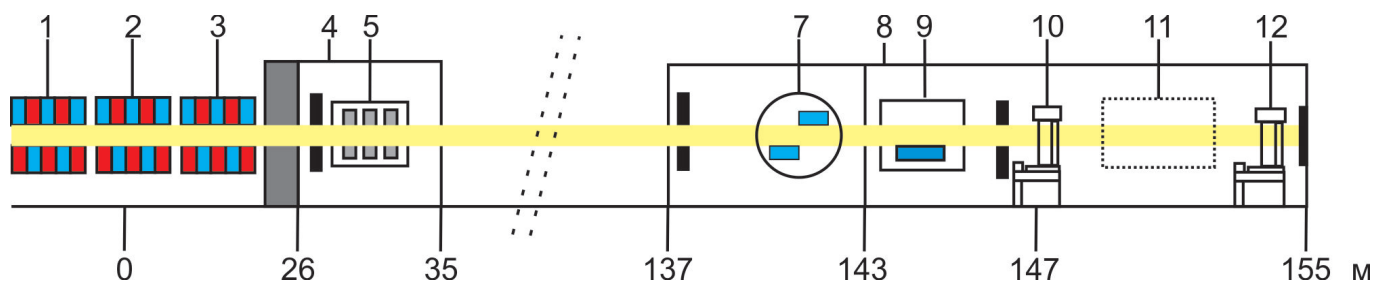


Рис. 10. Основные элементы станции ID19:

1 – ондулятор U32; 2 – вигглер W150; 3 – revolver U32/U17.6; 4 – первый оптический хатч; 5 – аттенюаторы; 6 – второй оптический хатч; 7 – двухкристалльный монохроматор; 8 – экспериментальный хатч; 9 – многослойный монохроматор; 10 – зона томографии высокого разрешения; 11 – зона дополнительных инструментов (ламинографии, горизонтальной дифрактометрии и т. д.); 12 – зона томографии среднего разрешения [28]. Нижний ряд цифровых значений соответствует расстоянию в метрах от источника излучения

Fig. 10. Main elements of ID19:

1 – undulator U32; 2 – wiggler W150; 3 – revolver U32/U17; 4 – Optics Hutch 1; 5 – attenuators; 6 – Optics Hutch 2; 7 – double-crystal monochromator; 8 – Experimental Hutch; 9 – multilayer monochromator; 10 – high-resolution tomograph; 11 – Custom space for additional instruments, such as a laminograph, horizontal diffractometer, etc; 12 – medium-resolution tomography [28]. The lower row of numerical values corresponds to the distance from the radiation source, in meters

Таблица 2

Table 2

Состав алюминиевого сплава (масс. %)

Composition of aluminum alloy (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Остальное
≤0,5	≤0,5	3,8...4,9	0,3...0,9	1,2...1,8	0,1	0,25	0,15	90,7...94,7	0,05...0,15

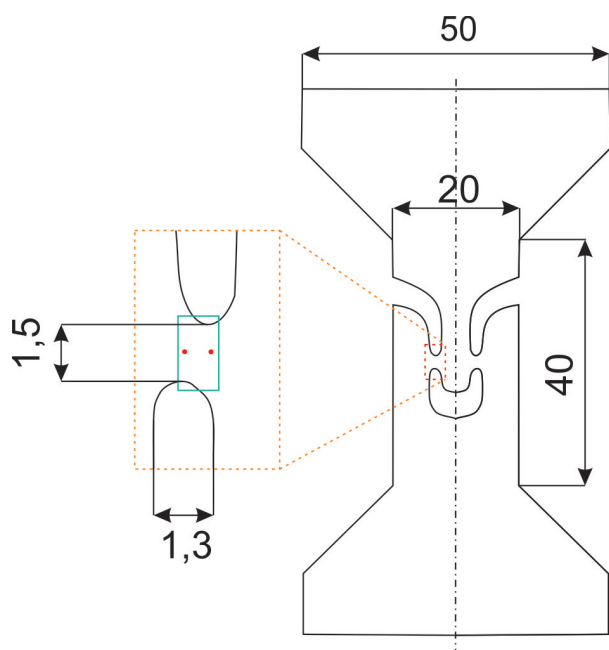


Рис. 11. Эскиз образца с выделенной областью. Красные точки обозначают положение экстензометра, используемого для измерения смещения деформируемых зон [30]

Fig. 11. Sketch of the specimen with the selected area. The red dots denote the position of the extensometer used to measure the displacement of the deformable zones [30]

Помимо статистической обработки дефектов строения материала в работе был выполнен углубленный анализ механизмов повреждений, приводящих к окончательному разрушению нагруженных образцов. Установлено, что процесс разрушения материала связан с поведением содержащихся в нем интерметаллидных частиц. Посредством метода ламинаграфии авторы работы выделили два этапа развития процесса разрушения. На начальном этапе в процессе деформации внутри частицы образуются трещина, перпендикулярная направлению максимального главного напряжения (*maximum principal stress*). Далее в процессе нагружения образца эти трещины раскрываются и приводят к появлению больших полос. По результатам исследований, полученных методами ламинаграфии и фрактографии образцов, были сделаны выводы о механизме разрушения сплава в условиях внешнего нагружения. Результаты дополнительного моделирования методом *RVE* (*representative elementary volume*) показали, что раскрытие

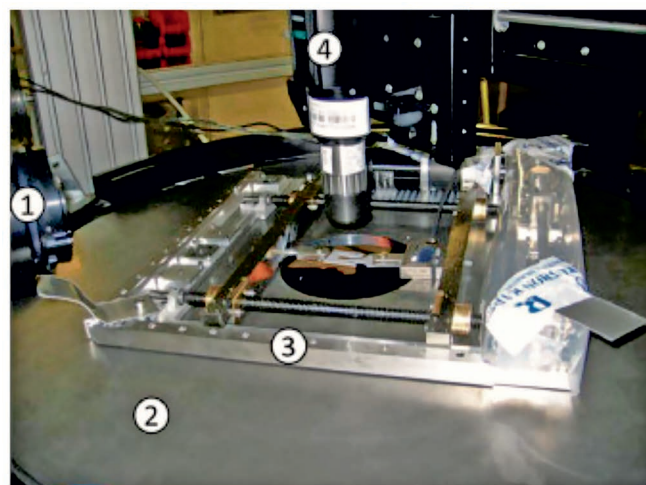


Рис. 12. Экспериментальная установка для ламинаграфии плоских образцов в процессе растяжения:

1 – детектор рентгеновского излучения; 2 – вращающаяся платформа; 3 – электромеханическая машина растяжения *in situ*; 4 – оптический микроскоп; 5 – образец (после разрушения); 6 – тензодатчик (5 кН); 7 – штифт [29]

Fig. 12. Experimental setup for laminography of flat samples during stretching:

1 – X-ray detector; 2 – Rotating laminography platform; 3 – Electro-mechanical in-situ tensile machine; 4 – Optical microscope; 5 – Shear specimen (broken); 6 – Load cell (5 kN); 7 – Loading pin [29]

предварительно растрескавшихся частиц приводит к концентрации деформации на мезоскопическом уровне, что в конечном итоге ведет к образованию полос деформации.

Визуализация пор, развивающихся в процессе пластической деформации

В качестве примера визуализации пор, возникающих в процессе пластической деформации материала, можно привести работу *Isshin Ando* и др. [33], выполненную на станции *BL20XU* источника *Spring-8* (Япония) [34]. Объектами исследования служили образцы, полученные при спекании порошка чистого железа (*JFE Steel Co.*,

ЛР301А). Пористость объектов исследования (включая открытые и закрытые поры) составляла 11,7 %. Образцы размерами $3 \times 2 \times 1$ мм³ деформировали по схеме растяжения.

Оборудование станции BL20XU позволяло проводить исследования с максимальным пространственным разрешением 1 мкм для последующей реконструкции объема при минимальном размере вокселя 0,3 мкм. Энергия фотонов монохроматического рентгеновского пучка, генерируемого охлаждаемым жидким азотом двухкристальным монохроматором Si (111), составляла 37,7 кэВ. Ось вращения образца была наклонена под углом 45° к рентгеновскому лучу. Детектор располагался на расстоянии 18,0 мм от центра вращения, находящегося на поверхности образца. Рентгенограммы диаметром 1000 мкм получены с экспозицией 300 мс при повороте на 0,1° (для каждого снимка). Изображения реконструированы путем обработки множества рентгенограмм с применением алгоритма фильтрованной обратной проекции и визуализированы в виде 3D-изображений с использованием программного обеспечения Avizo 9.1.1 (FEI Co.).

Методом SRCL анализировали исходный (недеформированный), а также образцы, деформированные по схеме растяжения со скоростью 10^{-3} с⁻¹. Изучали пять пластически деформированных образцов, находящихся в различном структурном состоянии (после деформации с различной степенью). В процессе исследований была проведена количественная оценка конфигурации пор. Преобразования пор, происходящие при повышенных значениях деформации, отслеживались методом алгебраической топологии и постоянной гомологии (*persistent homology*) [35]. Подход, основанный на использовании метода ламинаграфии, позволил описать процесс объединения пор в образцах железа, полученных методом порошковой металлургии.

Post-mortem исследования сплавов

Метод ламинаграфии может быть использован для исследования материалов, которые предварительно были подвергнуты различным видам внешнего воздействия. В этих случаях нет необходимости в установке на станции какого-либо дополнительного оборудования.

Деформация и разрушение магниевого сплава

В работе Kondori и др. [36] приведены результаты исследования методом ламинаграфии сплава магния AZ31B. Вырезанные из горячекатаной пластины толщиной 32 мм образцы (рис. 13, а, б) были подвергнуты одноосному растяжению на сервогидравлической машине. Один образец деформировали до разрушения, другой – до стадии, соответствующей значительному падению нагрузки. Полученные на электроэрозионной установке срезы стержней (рис. 14, в) исследовали методом ламинаграфии на станции ID19 ESRF. Изучали механизмы накопления постзародышевых повреждений и их роль в формировании и росте макроскопических трещин.

Угол наклона оси вращения объектов исследования составлял ~25°. Исследования проведены с использованием монохроматического излучения с энергией фотонов 25 кэВ. Минимальное расстояние от образца до детектора составляло 70 мм, что привело к улучшению качества границ объектов за счет проявления фазового контраста. Сканируемая область имела объем 1 мм³ с размером вокселя 0,7 мкм. Время экспозиции каждой проекции составляло 250 мс. Исследуемые объемы были восстановлены на основании анализа 1500 рентгенограмм.

С целью количественной оценки размеров и формы дефектов, сопутствующих зарождению трещин, с использованием программного обе-

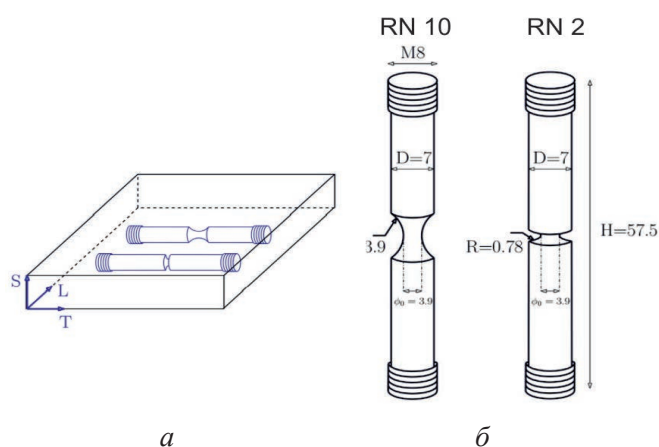


Рис. 13. Пластина (а), из которой были вырезаны образцы типа RN10 и RN2 для испытаний на растяжение (б) [36]

Fig. 13. Samples (RN10 and RN2) (a) orientation in the plate and its geometry (b) [36]

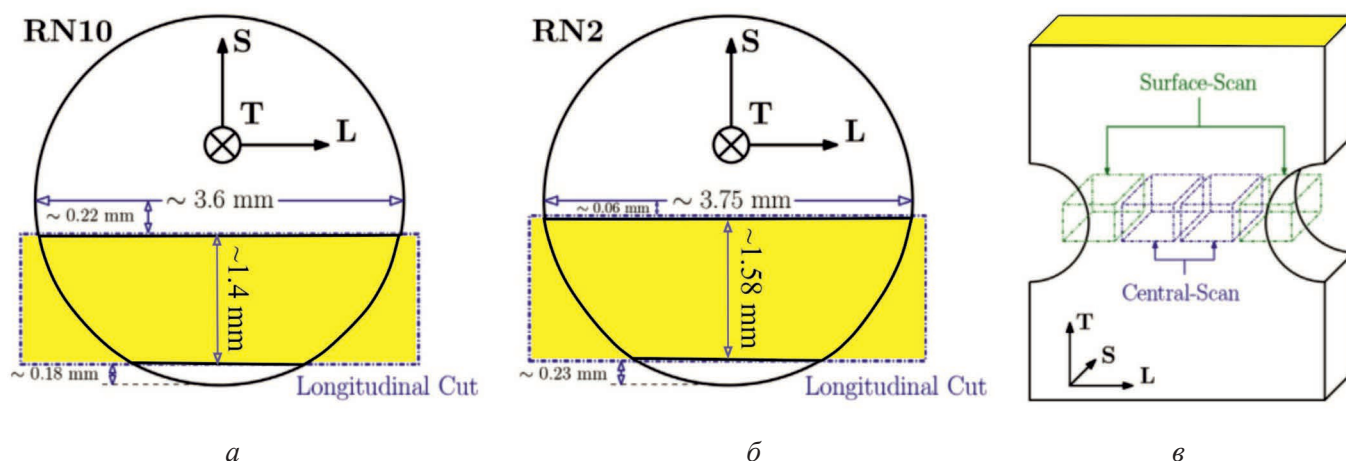


Рис. 14. Схема вырезки объектов, подвергнутых исследованию методом ламинаграфии, из деформированных растяжением образцов:

a, б – виды сверху, показывающие размеры и относительное расположение двух продольно вырезанных пластин; *в* – вид отдельной пластины с четырьмя областями исследования, помеченными как *Surface-Scan* и *Central-Scan* [36]

Fig. 14. Schematic of cutting out objects from tensile deformed specimens studied by the laminography:

a, б – top views showing the dimensions and relative location of two longitudinally cut plates; *в* – view of a single plate with four study areas labeled as *Surface-Scan* and *Central-Scan* [36]

спечения «ImageJ» был проведен анализ ~1000 пустот, соответствующих каждому изображению, зафиксированному методом ламинаграфии. Все измерения проводились на изображениях, параллельных плоскости *T-L*, на разной толщине образца. Анализируемая площадь составляла 31 мм² для образцов *RN10* и 36 мм² – для образцов *RN2* (геометрия образцов описана в работе [37]). Площадь, занимаемая каждой пустотой, рассчитывалась с учетом ее эллиптической формы. Общая доля дефектов была определена как отношение площади пустот к общей проанализированной площади (за исключением макротрещин). Геометрические параметры макротрещин были определены индивидуально.

Анализ результатов, полученных методом ламинаграфии, позволил выявить ряд особенностей разрушения сплава *AZ31B*, которые, как полагают авторы работы [36], могут проявляться при нагружении и других сплавов на основе магния. Анализ поведения материала в процессе растяжения свидетельствует о его пластичности. Пустоты, возникшие в процессе нагружения, распределены по всей деформируемой области образца. Повреждения возникают в виде плоских пустот, размер которых определяется пространственным положением, уровнем локальной деформации, а также характером напряженно-деформированного состояния мате-

риала. Переход от стадии, соответствующей образованию мелкогазовых, распределенных в объеме пустот, к окончательному разрушению образца происходит путем возникновения макроскопических трещин при слиянии пустот в направлении прокатки пластины. Когда несколько параллельных макротрещин в конечном итоге возникают вдали от устья надреза и сливаются воедино, образуется ступенчатая (гофрированная) поверхность. На основании проведенных исследований сделан вывод о целесообразности дальнейшего изучения кристаллографических аспектов развития повреждений в образцах из магниевого сплава при более высоком пространственном разрешении.

Визуализация усталостных трещин

Метод синхротронной компьютерной ламинаграфии может быть использован также для изучения усталостных трещин, возникающих в деформируемых материалах. В качестве примера приведены результаты исследований такого рода дефектов, возникших в сварном шве, полученном методом сварки трением с перемешиванием заготовок из алюминиевого сплава, состав которого приведен в табл. 3 [38]. Исследования проведены на станции *BL19B2* источника *SPring-8*.

Исследуемые в работе материалы были подвержены малоциклового усталостному нагру-

Состав алюминиевого сплава (масс. %)

Composition of aluminum alloy (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,65	0,2	0,30	0,06	1,04	0,13	0,04	0,02	Остальное

жению ($3,37 \times 10^5$ и $4,8 \times 10^4$ циклов). Функцию концентраторов напряжений, способствующих зарождению усталостных трещин, выполняли отверстия диаметром 0,3 мм. Размеры анализируемых образцов указаны на рис. 15.

В процессе исследований материалов методом ламинаграфии оси вращения образцов были наклонены на 30° по отношению к рентгеновскому пучку. На выходе из монохроматора энергия рентгеновского излучения составляла 28 кэВ. Рентгеновский детектор (охлаждаемая CCD-камера) фиксировал проекционные данные через каждые $0,5^\circ$ (при общем повороте на 360°) со временем экспозиции 400 мс на снимок. Для того чтобы компенсировать ослабление рентгеновского излучения, обусловленное влиянием акриловой трубы, на которой закреплялся анализируемый объект, через каждые 20 экспозиций образец убирали и фиксировали отклик, вызванный присутствием полимера.

Размер проекции, фиксируемой детектором, составлял 1984×7680 пикселей (после бинирования 2×2). При этих условиях обеспечивался

компромисс между разрешением изображения и простотой обработки данных. Эффективный размер пикселя детектора составил 5,7 мкм (после бининга). Размер поля зрения был равен 11,3 мм (по горизонтали) \times 4,4 мм (по вертикали). На длине между поворотным магнитом и образцом (52 м) рентгеновский луч был параллельным. Расстояние между образцом и детектором, составляющее 0,8 м, обеспечивало проявление эффекта фазового контраста. Изображения трещин (рис. 16) были восстановлены с использованием алгоритма фильтрованной обратной проекции и 3D-визуализации (рис. 17) семисот двадцати двумерных проекций, развернутых относительно друг друга на угол $0,5^\circ$.

Изображения трещин, возникших в процессе внешнего нагружения, были успешно восстановлены. Наблюдается хорошее соответствие расчетных данных с фактическими. Полученные в работе результаты позволили авторам на примере сварных соединений сделать вывод о высокой эффективности метода компьютерной ламинаграфии для изучения процессов усталостного разрушения материалов. Получаемая этим методом информация важна с позиции разработки материалов, характеризующихся высоким уровнем усталостных свойств.

Исследование контактно-усталостных трещин

Одно из приложений метода синхротронной компьютерной ламинаграфии связано с изучением дефектов, возникших в процессе контактно-усталостного нагружения [39–41]. Для решения этой задачи используют также и другие методы синхротронных исследований, в том числе дифракционные [42, 43]. В работе [41], выполненной Nakai с соавторами, материалом исследования была подшипниковая сталь с содержанием элементов, представленным в табл. 4. Нагружение осуществлялось по схеме качения «неподвиж-

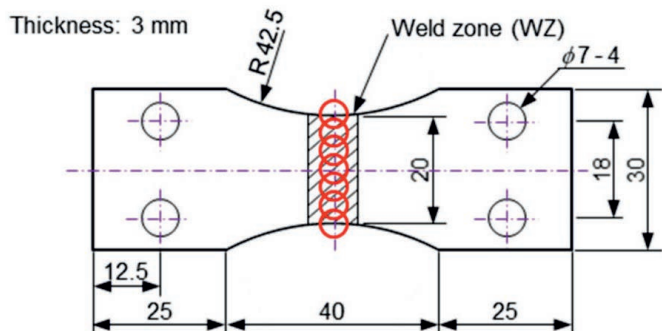


Рис. 15. Образец, вырезанный из сварного соединения, полученного методом сварки трением с перемешиванием. Красными окружностями выделены зоны, исследуемые методом ламинаграфии [38]

Fig. 15. Sample cut from a welded joint obtained by friction stir welding. The red circles are the fields of view of laminography [38]



Рис. 16. Изображение, реконструированное методом синхротронной 3D-компьютерной ламинаграфии, и снимок поверхности усталостной трещины на разрушенном образце [38]

Fig. 16. The reconstructed synchrotron radiation computed laminography 3D image and a photograph of the fatigue crack [38]

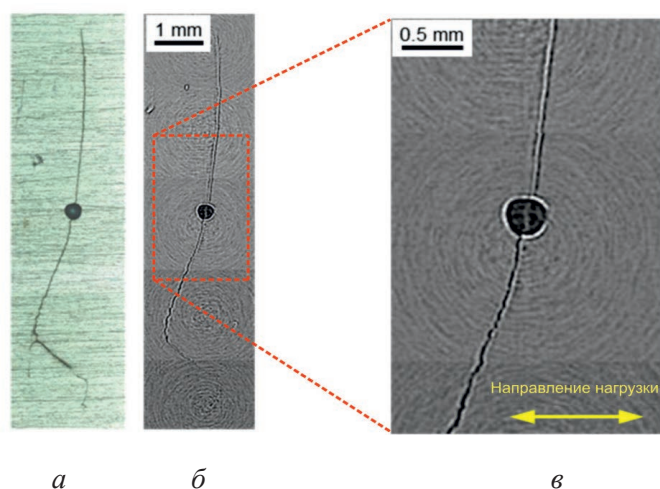


Рис. 17. Усталостная трещина на поверхности образца:

a – снимок, полученный методом световой микроскопии; *б, в* – изображения, полученные методом синхротронной компьютерной ламинаграфии [38]

Fig. 17. The fatigue crack on the sample surface:

a – image obtained by light microscopy; *б, в* – images obtained by synchrotron radiation computed laminography [38]

ная пластина – вращающийся шарик» (*rolling contact fatigue – RCF*) (рис. 18). Образец размером $24 \times 10 \times 1$ мм был вырезан из прокованного и подверженного сфероидизирующему отжигу слитка диаметром 65 мм. Повышенное содер-

жание серы в стали обеспечивало возможность исследования трещин, возникших вблизи включений MnS. Включения сульфида марганца ориентированы перпендикулярно или параллельно поверхности образца. Перед испытаниями образцы подвергались закалке с нагревом при 1103 К в течение 0,5 ч и последующему отпуску при 453 К в течение 2 ч.

В качестве инденторов использовали керамические шарики диаметром 6,0 мм с модулем Юнга 300 ГПа. Индентор совершал многократные возвратно-поступательные перемещения по поверхности образца. Длина получаемой дорожки трения составляла 3,0 мм (рис. 19) [39]. В приведенной работе представлены результаты, зафиксированные при максимальном «герцевском» напряжении $p_{\max} = 5,39$ ГПа.

Исследования проведены на станции BL46XU источника синхротронного излучения *SPring-8*. Энергия излучения на выходе из монохроматора находилась на уровне 37 кэВ, угол наклона оси образца составлял 30° . Для реконструкции изображений была записана серия из 720 рентгенограмм с шагом $0,5^\circ$ (при вращении образца на 360°). Каждая рентгенограмма получена при экспозиции длительностью 4 с. Эффективный размер вокселя в реконструированном трехмер-

Состав подшипниковой стали (масс. %)

Composition of bearing steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
1	0,35	0,47	0,006	0,02/0,049	1,5	Остальное

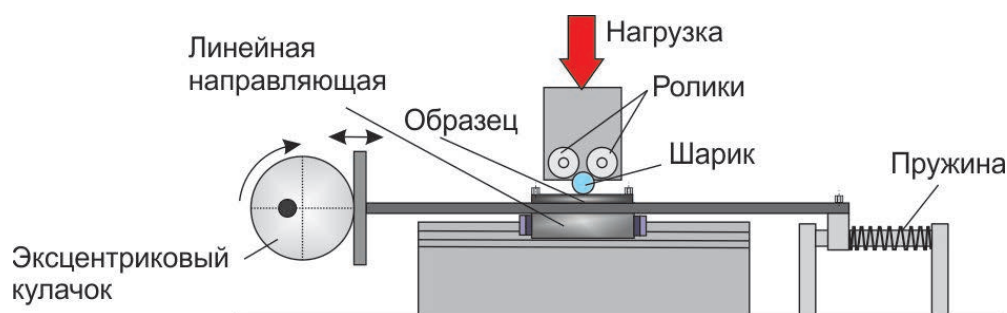


Рис. 18. Схема установки для проведения контактно-усталостных испытаний материалов [40]

Fig. 18. Schematic of a contact-fatigue test setup [40]

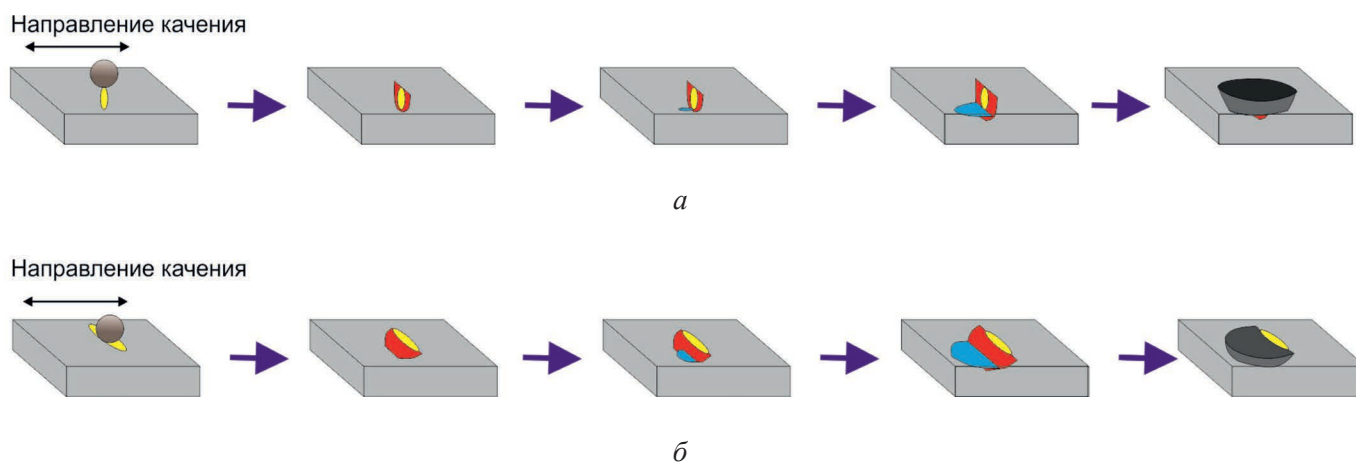


Рис. 19. Модель возникновения контактно-усталостных трещин (по работе [39]):

a – образец с короткими вертикальными включениями (малая концентрация S); *б* – образец с горизонтальными включениями

Fig. 19. Models of flaking mechanism from extended inclusion [39]:

a – sample with short vertical inclusions (low concentration of S); *б* – sample with horizontal inclusions

ном изображении составил 0,74 мкм. Эффект фазового контраста обеспечивался при расположении детектора рентгеновского излучения на расстоянии 0,30 м от образца.

На основании проведенных исследований были сделаны выводы о длительности процессов возникновения и распространения вертикальных и горизонтальных трещин, а также о

влиянии размеров и ориентации включений MnS на процессы питтингообразования в шарикоподшипниковой стали. Изображения дефектов, зафиксированные методом ламинаграфии, позволили оценить характер разрушения материала на различных стадиях испытания образцов. Анализ, проведенный авторами работ [39–41], свидетельствует об эффективности применения

метода компьютерной ламинаграфии с использованием синхротронного излучения при изучении процессов контактно-усталостного нагружения металлических материалов.

Закключение

Анализ экспериментальных работ, выполненных с использованием источников синхротронного излучения, свидетельствует об эффективности методов синхротронной компьютерной томографии (*SRCT*) и синхротронной компьютерной ламинаграфии (*SRCL*) при проведении исследований в области современного материаловедения. Метод *SRCL* дает возможность контролировать структурное состояние материалов при реализации различных схем нагружения, в том числе при изучении процессов усталостного и контактно-усталостного разрушения. Реализация методов *SRCT* и *SRCL* рациональна на строящемся в Новосибирске источнике синхротронного излучения «СКИФ». Планируемые параметры этого источника позволят с высоким пространственным разрешением получать изображения структуры конструкционных и функциональных материалов.

Список литературы

1. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение: теория и эксперимент. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
2. On the implementation of computed laminography using synchrotron radiation / L. Helfen, A. Myagotin, P. Mikulík, P. Pernot, A. Voropaev, M. Elyyan, M. Di Michiel, J. Baruchel, T. Baumbach // Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82. – P. 063702. – DOI: 10.1063/1.3596566.
3. Comparison of image quality in computed laminography and tomography / F. Xu, L. Helfen, T. Baumbach, H. Suhonen // Optics Express. – 2012. – Vol. 20. – P. 794–806. – DOI: 10.1364/OE.20.000794.
4. Ziedses des Plantes B.G. Eine neue methode zur differenzierung in der rontgenographie (planigraphies) // Acta Radiologica. – 1932. – Vol. 13. – P. 182–192. – DOI: 10.3109/00016923209135135.
5. Hounsfield G.M. A method and apparatus for the examination of a body by radiation such as X or gamma radiation. Patent Specifications, 1283915. – London: Patent office, 1972.
6. Computed laminography for materials testing / J. Zhou, M. Maisl, H. Reiter, W. Arnold // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68. – P. 3500. – DOI: 10.1063/1.115771.
7. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 132 с.
8. Hounsfield G.M. Computed medical imaging. Nobel lecture, December 8, 1979 // Journal of Computer Assisted Tomography. – 1980. – Vol. 4. – P. 665–674. – DOI: 10.1097/00004728-198010000-00017.
9. High-resolution three-dimensional imaging of flat objects by synchrotron-radiation computed laminography / L. Helfen, T. Baumbach, P. Mikulík, D. Kiel, P. Pernot, P. Cloetens, J. Baruchel // Applied Physics Letters. – 2005. – Vol. 86. – P. 071915. – DOI: 10.1063/1.1854735.
10. Grant D.G. Tomosynthesis: a three-dimensional radiographic imaging technique // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1972. – Vol. BME-19. – P. 20–28. – DOI: 10.1109/TBME.1972.324154.
11. Lauritsch G., Härer W.H. Theoretical framework for filtered back projection in tomosynthesis // Proceedings of SPIE. – 1998. – Vol. 3338: Medical Imaging 1998: Image Processing, San Diego, CA, 1998. – P. 1127–1137. – DOI: 10.1117/12.310839.
12. Synchrotron and neutron laminography for three-dimensional imaging of devices and flat material specimens / L. Helfen, T.F. Morgeneyer, F. Xu, M.N. Mavrogordato, I. Sinclair, B. Schillinger, T. Baumbach // International Journal of Materials Research. – 2012. – Vol. 103. – P. 170–173. – DOI: 10.3139/146.110668.
13. Laminography in the lab: imaging planar objects using a conventional x-ray CT scanner / S.L. Fisher, D.J. Holmes, J.S. Jørgensen, P. Gajjar, J. Behnsen, W.R.B. Lionheart, P.J. Withers // Measurement Science and Technology. – 2019. – Vol. 30. – P. 035401. – DOI: 10.1088/1361-6501/aafcae.
14. Holotomography: quantitative phase tomography with micrometer resolution using hard synchrotron radiation x rays / P. Cloetens, W. Ludwig, J. Baruchel, D. Van Dyck, J. Van Landuyt, J.P. Guigay, M. Schlenker // Applied Physics Letters. – 1999. – Vol. 75. – P. 2912–2914. – DOI: 10.1063/1.125225.
15. Nano-laminography for three-dimensional high-resolution imaging of flat specimens / L. Helfen, F. Xu, H. Suhonen, L. Urbanelli, P. Cloetens, T. Baumbach // Journal of Instrumentation. – 2016. – Vol. 8. – DOI: 10.1088/1748-0221/8/05/C05006.
16. Augmented laminography, a correlative 3D imaging method for revealing the inner structure of compressed fossils / M. Zuber, M. Laaß, E. Hamann, S. Kretschmer, N. Hauschke, Th. Van de Kamp, T. Baumbach, T. Koenig // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – DOI: 10.1038/srep41413.
17. Kak A.C., Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging. – Philadelphia:



Society of Industrial and Applied Mathematics, 2001. – 327 p. – (Classics in applied mathematics; 33). – DOI: 10.1137/1.9780898719277.

18. Relics in medieval altarpieces? Combining X-ray tomographic, laminographic and phase-contrast imaging to visualize thin organic objects in paintings / K. Krug, L. Porra, P. Coan, A. Wallert, J. Dik, A. Coerdts, A. Bravin, M. Elyyan, P. Reischig, L. Helfen, T. Baumbach // *Journal of Synchrotron Radiation*. – 2008. – Vol. 15. – P. 55–61. – DOI: 10.1107/S0909049507045438.

19. Three-dimensional Imaging of paint layers and paint substructures with synchrotron radiation computed μ -laminography / J. Dik, P. Reischig, K. Krug, A. Wallert, A. Coerdts, L. Helfen, T. Baumbach // *Journal of the American Institute for Conservation*. – 2009. – Vol. 48. – P. 185–197. – DOI: 10.1179/019713612804514260.

20. Three-dimensional pelvis and limb anatomy of the Cenomanian hind-limbed snake *Eupodophis descouensi* (Squamata, Ophidia) revealed by synchrotron-radiation computed laminography / A. Houssaye, F. Xu, L. Helfen, V.D. Buffrénil, T. Baumbach, P. Tafforeau, J. Vertebr // *Journal of Vertebrate Paleontology*. – 2011. – Vol. 31. – P. 2–7. – DOI: 10.1080/02724634.2011.539650.

21. In situ synchrotron computed laminography of damage in carbon fibre-epoxy [90/0]_s laminates / A.J. Moffat, P. Wright, L. Helfen, T. Baumbach, G. Johnson, S.M. Spearing, I. Sinclair // *Scripta Materialia*. – 2010. – Vol. 62. – P. 97–100. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.09.027.

22. In situ local imaging and analysis of impregnation during liquid moulding of composite materials using synchrotron radiation computed laminography / J. Castro, F. Sket, L. Helfen, C. Gonzalez // *Composites Science and Technology*. – 2021. – Vol. 215. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108999.

23. Ueda T., Helfen L., Morgeneyer T.F. In situ laminography study of three-dimensional individual void shape evolution at crack initiation and comparison with Gurson–Tvergaard–Needleman-type simulations // *Acta Materialia*. – 2014. – Vol. 78. – P. 254–270. – DOI: 10.1016/j.actamat.2014.06.029.

24. In situ 3-D observation of early strain localization during failure of thin Al alloy (2198) sheet / T.F. Morgeneyer, T. Taillandier-Thomas, L. Helfen, T. Baumbach, I. Sinclair, S. Roux, F. Hild // *Acta Materialia*. – 2014. – Vol. 69. – P. 78–91. – DOI: 10.1016/j.actamat.2014.01.033.

25. Ductile crack initiation and propagation assessed via in situ synchrotron radiation-computed laminography / T.F. Morgeneyer, L. Helfen, I. Sinclair, H. Proudhon, F. Xu, T. Baumbach // *Scripta Materialia*. – 2011. – Vol. 65. – P. 1010–1013. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.09.005.

26. Three-dimensional quantitative in situ study of crack initiation and propagation in AA6061 aluminum alloy sheets via synchrotron laminography and finite-element simulations / Y. Shen, T.F. Morgeneyer, J. Garnier, L. Allais, L. Helfen, J. Crépin // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61. – P. 2571–2582. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.01.035.

27. 3D digital volume correlation of synchrotron radiation laminography images of ductile crack initiation: an initial feasibility study / T.F. Morgeneyer, L. Helfen, H. Mubarak, F. Hild // *Experimental Mechanics*. – 2012. – Vol. 53. – P. 543–556. – DOI: 10.1007/s11340-012-9660-y.

28. Parallel-beam imaging at the ESRF beamline ID19: current status and plans for the future / T. Weitkamp, P. Tafforeau, E. Boller, P. Cloetens, J.-P. Valade, P. Bernard, F. Peyrin, W. Ludwig, L. Helfen, J. Baruchel // *AIP Conference Proceedings*. – 2010. – Vol. 1234. – DOI: 10.1063/1.3463345.

29. Ductile damage of AA2024-T3 under shear loading: mechanism analysis through in-situ laminography / T. Tancogne-Dejeana, C.C. Roth, T.F. Morgeneyer, L. Helfen, D. Mohr // *Acta Materialia*. – 2021. – Vol. 205. – P. 116556. – DOI: 10.1016/j.actamat.2020.116556.

30. Roth C., Mohr D. Ductile fracture experiments with locally proportional loading histories // *International Journal of Plasticity*. – 2015. – Vol. 79. – P. 328–354. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2015.08.004.

31. Synchrotron-radiation computed laminography for high-resolution three-dimensional imaging of flat devices / L. Helfen, A. Myagotin, A. Rack, P. Pernot, P. Mikulík, M. Di Michiel, T. Baumbach // *Physica Status Solidi (A)*. – 2007. – Vol. 204. – P. 2760–2765. – DOI: 10.1002/pssa.200775676.

32. Efficient volume reconstruction for parallel-beam computed laminography by filtered backprojection on multi-core clusters / A. Myagotin, A. Voropaev, L. Helfen, D. Hänschke, T. Baumbach // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2013. – Vol. 32. – P. 5348–5361. – DOI: 10.1109/TIP.2013.2285600.

33. Elucidation of pore connection mechanism during ductile fracture of sintered pure iron by applying persistent homology to 4D images of pores: role of open pore / I. Ando, Y. Mugita, K. Hirayama, S. Munetoh, M. Aramaki, F. Jiang, T. Tsuji, A. Takeuchi, M. Uesugi, Y. Ozaki // *Materials Science and Engineering A*. – 2021. – Vol. 828. – P. 142112. – DOI: 10.1016/j.msea.2021.142112.

34. Development of an x-ray micro-laminography system at SPring-8 / M. Hoshino, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, N. Yagi // *AIP Conference Proceedings*. – 2011. – Vol. 1365. – P. 250–253. – DOI: 10.1063/1.3625351.

35. Obayashi I. Volume-optimal cycle: tightest representative cycle of a generator in persistent

homology // SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry. – 2018. – Vol. 2. – P. 508–534. – DOI: 10.1137/17M1159439.

36. Void growth and coalescence in a magnesium alloy studied by synchrotron radiation laminography / B. Kondori, T.F. Morgeneyer, L. Helfen, A.A. Benzergera // Acta Materialia. – 2018. – Vol. 155. – P. 80–94. – DOI: 10.1016/j.actamat.2018.05.026.

37. Kondori B., Benzergera A.A. Effect of stress tri-axiality on the flow and fracture of Mg alloy AZ31 // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2014. – Vol. 45. – P. 3292–3307. – DOI: 10.1007/s11661-014-2211-7.

38. Effect of laser peening on the mechanical properties of aluminum alloys probed by synchrotron radiation and x-ray free electron laser / Y. Sano, K. Masaki, K. Akita, K. Kajiwara, T. Sano // Metals. – 2020. – Vol. 10. – P. 1490. – DOI: 10.3390/met10111490.

39. Effects of inclusion size and orientation on rolling contact fatigue crack initiation observed by laminography using ultra-bright synchrotron radiation / Y. Nakai, D. Shiozawa, S. Kikuchi, T. Obama, H. Saito, T. Makino, Y. Neishi // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 3117–3124. – DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.389.

40. Observation of rolling contact fatigue cracks by laminography using ultra-bright synchrotron radiation / D. Shiozawa, T. Makino, Y. Neishi, Y. Nakai // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 3. – P. 159–164. – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.030.

41. 4D observations of rolling contact fatigue processes by laminography using ultra-bright synchrotron radiation / Y. Nakai, D. Shiozawa, S. Kikuchi, T. Obama, H. Saito, T. Makino, Y. Neishi // Engineering Fracture Mechanics. – 2017. – Vol. 183. – P. 180–189. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.03.021.

42. Synchrotron and neural network analysis of the influence of composition and heat treatment on the rolling contact fatigue of hypereutectoid pearlitic steels / W. Solano-Alvarez, M.J. Peet, E.J. Pickering, J. Jaiswal, A. Bevan, H.K.D.H. Bhadeshia // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 707. – P. 259–269. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.09.045.

43. Rail rolling contact fatigue formation and evolution with surface defects / S.Y. Zhang, M. Spiriyagin, H.H. Ding, Q. Wu, J. Guo, Q.Y. Liu, W.J. Wang // International Journal of Fatigue. – 2022. – Vol. 158. – P. 106762. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106762.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov











The study of characteristics of the structure of metallic alloys using synchrotron radiation computed laminography (Research Review)

Oleg Kutkin^{1, a, *}, Ivan Bataev^{1, b}, Gleb Dovzhenko^{2, c}, Zinaida Bataeva^{3, d}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Siberian Circular Photon Source "SKIF" Borekov Institute of Catalysis of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SRF "SKIF"), 1 Nikol'skii pr., Kol'tsovo, 630559, Russian Federation

³ Siberian State University of water transport, 33 Schetinkina str., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-1277-388X>,  kutkino@list.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>,  i.bataev@corp.nstu.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0003-0615-0643>,  g.dovzhenko@skif.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-5027-6193>,  bataevazb@ngs.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04 October 2022

Revised: 02 November 2022

Accepted: 03 November 2022

Available online: 15 December 2022

Keywords:

Computed tomography

Computed laminography

X-ray visualization methods

Synchrotron radiation

Funding

This research was funded by the Federal Task of Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project FSUN-2020-0014 (2019-0931): "Investigations of Metastable Structures Formed on Material Surfaces and Interfaces under Extreme External Impacts").

ABSTRACT

The paper contains a review of research related to the use of synchrotron radiation computed laminography in the study of the structure features of metal alloys subjected to various methods of external action. **Introduction.** The important role of X-rays in the field of materials research is discussed. The capabilities of standard X-ray devices equipped with X-ray tubes and modern synchrotron radiation (SR) sources with unique parameters are compared. **Methods for studying flat samples. Tomography and synchrotron laminography.** An informative method based on the use of synchrotron X-rays is synchrotron radiation computed tomography (SRCT), which allows obtaining cross-section images of objects by processing multiple absorption radiographs. A brief classification of five generations of tomographs is presented. The problems encountered in obtaining data from non-compact (non-isometric) samples are avoided by using the method of synchrotron radiation computed laminography (SRCL), which combines the principles of laminography with the advantages of synchrotron imaging. Currently the method is used for non-destructive testing of non-isometric objects by a number of synchrotron radiation sources (ESRF, ANKA, Spring-8). **Resolution of synchrotron radiation computed laminography.** The use of monochromatic radiation in realization of computed laminography method is a factor, which provides high spatial resolution down to micron and submicron scale. An equally important factor is related to the characteristics of the detector. Images with a resolution of ~100 nm were obtained using nanolaminography. **Comparison of laminography and tomography methods. Augmented laminography.** Augmented laminography allows improving image quality by augmenting the Fourier space analyzed by laminography with information obtained from lower resolution CT. Reconstruction performed using Augmented laminography is characterized by the absence of significant artifacts and high resolution. **Implementation of the laminography method.** The angle of inclination of the rotary axis θ (SRCL method) is related to the geometry of samples and is determined experimentally in each case. In order to achieve the necessary resolution, the value θ should provide an optimal average value of the intensity of the passed radiation. The energy of X-rays is calculated on the basis of material characteristics. To reconstruct images of the objects, software complexes that implement the filtered back projection method based on the Radon transform are used. **Examples of laminography application for analysis of metal alloys samples.** The laminography method can be used for in-situ investigations allowing real time monitoring of processes occurring under different conditions of external action, e.g. during plastic deformation of metal plates. Data on formation of pore-type defects in the process of loading of metal workpieces are interesting. Numerous examples of post-mortem studies of metal alloys for various purposes are described in the literature. Important information is obtained in the study of fatigue cracks, as well as defects arising in the process of contact-fatigue loading of materials. **Conclusion.** The SRCT and SRCL methods are rationally implemented at the generation 4+ synchrotron radiation source "SKIF" under construction in Novosibirsk.

For citation: Kutkin O.M., Bataev I.A., Dovzhenko G.D., Bataeva Z.B. The study of characteristics of the structure of metallic alloys using synchrotron radiation computed laminography (Research Review). *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 219–242. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-219-242. (In Russian).

* Corresponding author

Kutkin Oleg M., Student, Laboratory assistant
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (962) 811-59-27, e-mail: kutkino@list.ru

References

1. Ternov I.M., Mikhailin V.V. *Sinkhrotronnoe izluchenie: teoriya i eksperiment* [Synchrotron radiation. Theory and Experiment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 296 p.
2. Helfen L., Myagotin A., Mikulík P., Pernot P., Voropaev A., Elyyan M., Di Michiel M., Baruchel J., Baumbach T. On the implementation of computed laminography using synchrotron radiation. *Review of Scientific Instruments*, 2011, vol. 82, p. 063702. DOI: 10.1063/1.3596566.
3. Xu F., Helfen L., Baumbach T., Suhonen H. Comparison of image quality in computed laminography and tomography. *Optics Express*, 2012, vol. 20, pp. 794–806. DOI: 10.1364/OE.20.000794.
4. Ziedses des Plantes B.G. Eine neue methode zur differenzierung in der rontgenographie (planigraphies). *Acta Radiologica*, 1932, vol. 13, pp. 182–192. DOI: 10.3109/00016923209135135.
5. Hounsfield G.M. *A method and apparatus for the examination of a body by radiation such as X or gamma radiation*. Patent Specifications, 1283915. London, Patent office, 1972.
6. Zhou J., Maisl M., Reiter H., Arnold W. Computed laminography for materials testing. *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 68, p. 3500. DOI: 10.1063/1.115771.
7. Marusina M.Ya., Kaznacheeva A.O. *Sovremennyye vidy tomografii* [Modern tomography types]. St. Petersburg, ITMO University, 2006. 132 p.
8. Hounsfield G.M. Computed medical imaging. Nobel lecture, December 8, 1979. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 1980, vol. 4, pp. 665–674. DOI: 10.1097/00004728-198010000-00017.
9. Helfen L., Baumbach T., Mikulík P., Kiel D., Pernot P., Cloetens P., Baruchel J. High-resolution three-dimensional imaging of flat objects by synchrotron-radiation computed laminography. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 86, p. 071915. DOI: 10.1063/1.1854735.
10. Grant D.G. Tomosynthesis: a three-dimensional radiographic imaging technique. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1972, vol. BME-19, pp. 20–28. DOI: 10.1109/TBME.1972.324154.
11. Lauritsch G., Härer W.H. Theoretical framework for filtered back projection in tomosynthesis. *Proceedings of SPIE*, 1998, vol. 3338, pp. 1127–1137. DOI: 10.1117/12.310839.
12. Helfen L., Morgeneyer T.F., Xu F., Mavrogordato M.N., Sinclair I., Schillinger B., Baumbach T. Synchrotron and neutron laminography for three-dimensional imaging of devices and flat material specimens. *International Journal of Materials Research*, 2012, vol. 103, pp. 170–173. DOI: 10.3139/146.110668.
13. Fisher S.L., Holmes D.J., Jørgensen J.S., Gajjar P., Behnsen J., Lionheart W.R.B., Withers P.J. Laminography in the lab: imaging planar objects using a conventional x-ray CT scanner. *Measurement Science and Technology*, 2019, vol. 30, p. 035401. DOI: 10.1088/1361-6501/aafcae.
14. Cloetens P., Ludwig W., Baruchel J., Van Dyck D., Van Landuyt J., Guigay J.P., Schlenker M. Holotomography: Quantitative phase tomography with micrometer resolution using hard synchrotron radiation x rays. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 75, pp. 2912–2914. DOI: 10.1063/1.125225.
15. Helfen L., Xu F., Suhonen H., Urbanelli L., Cloetens P., Baumbach T. Nano-laminography for three-dimensional high-resolution imaging of flat specimens. *Journal of Instrumentation*, 2016, vol. 8. DOI: 10.1088/1748-0221/8/05/C05006.
16. Zuber M., Laab M., Hamann E., Kretschmer S., Hauschke N., Van de Kamp Th., Baumbach T., Koenig T. Augmented laminography, a correlative 3D imaging method for revealing the inner structure of compressed fossils. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7. DOI: 10.1038/srep41413.
17. Kak A.C., Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging. Philadelphia, *Society of Industrial and Applied Mathematics*, 2001. 327 p. DOI: 10.1137/1.9780898719277.
18. Krug K., Porra L., Coan P., Wallert A., Dik J., Coerdts A., Bravin A., Elyyan M., Reischig P., Helfen L., Baumbach T. Relics in medieval altarpieces? Combining X-ray tomographic, laminographic and phase-contrast imaging to visualize thin organic objects in paintings. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2008, vol. 15, pp. 55–61. DOI: 10.1107/S0909049507045438.
19. Dik J., Reischig P., Krug K., Wallert A., Coerdts A., Helfen L., Baumbach T. Three-dimensional imaging of paint layers and paint substructures with synchrotron radiation computed μ -laminography. *Journal of the American Institute for Conservation*, 2009, vol. 48, pp. 185–197. DOI: 10.1179/019713612804514260.
20. Houssaye A., Xu F., Helfen L., Buffrénil V.D., Baumbach T., Tafforeau P., Vertébré J. Three-dimensional pelvis and limb anatomy of the Cenomanian hind-limbed snake *Eupodophis descouensi* (Squamata, Ophidia) revealed by synchrotron-radiation computed laminography. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 2011, vol. 31, pp. 2–7. DOI: 10.1080/02724634.2011.539650.

21. Moffat A.J., Wright P., Helfen L., Baumbach T., Johnson G., Spearing S.M., Sinclair I. In situ synchrotron computed laminography of damage in carbon fibre–epoxy [90/0]_s laminates. *Scripta Materialia*, 2010, vol. 62, pp. 97–100. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.09.027.
22. Castro J., Sket F., Helfen L., Gonzalez C. In situ local imaging and analysis of impregnation during liquid moulding of composite materials using synchrotron radiation computed laminography. *Composites Science and Technology*, 2021, vol. 215. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108999.
23. Ueda T., Helfen L., Morgeneyer T.F. In situ laminography study of three-dimensional individual void shape evolution at crack initiation and comparison with Gurson–Tvergaard–Needleman-type simulations. *Acta Materialia*, 2014, vol. 78, pp. 254–270. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.06.029.
24. Morgeneyer T.F., Taillandier-Thomas T., Helfen L., Baumbach T., Sinclair I., Roux S., Hild F. In situ 3-D observation of early strain localization during failure of thin Al alloy (2198) sheet. *Acta Materialia*, 2014, vol. 69, pp. 78–91. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.01.033.
25. Morgeneyer T.F., Helfen L., Sinclair I., Proudhon H., Xu F., Baumbach T. Ductile crack initiation and propagation assessed via in situ synchrotron radiation-computed laminography. *Scripta Materialia*, 2011, vol. 65, pp. 1010–1013. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.09.005.
26. Shen Y., Morgeneyer T.F., Garnier J., Allais L., Helfen L., Crépin J. Three-dimensional quantitative in situ study of crack initiation and propagation in AA6061 aluminum alloy sheets via synchrotron laminography and finite-element simulations. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 2571–2582. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.01.035.
27. Morgeneyer T.F., Helfen L., Mubarak H., Hild F. 3D digital volume correlation of synchrotron radiation laminography images of ductile crack initiation: an initial feasibility study. *Experimental Mechanics*, 2012, vol. 53, pp. 543–556. DOI: 10.1007/s11340-012-9660-y.
28. Weitkamp T., Tafforeau P., Boller E., Cloetens P., Valade J.-P., Bernard P., Peyrin F., Ludwig W., Helfen L., Baruchel J. Parallel-beam imaging at the ESRF beamline ID19: current status and plans for the future. *AIP Conference Proceedings*, 2010, vol. 1234. DOI: 10.1063/1.3463345.
29. Tancogne-Dejeana T., Roth C.C., Morgeneyer T.F., Helfen L., Mohr D. Ductile damage of AA2024-T3 under shear loading: mechanism analysis through in-situ laminography. *Acta Materialia*, 2021, vol. 205, p. 116556. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.116556.
30. Roth C.C., Mohr D. Ductile fracture experiments with locally proportional loading histories. *International Journal of Plasticity*, 2015, vol. 79, pp. 328–354. DOI: 10.1016/j.ijplas.2015.08.004.
31. Helfen L., Myagotin A., Rack A., Pernot P., Mikulík P., Di Michiel M., Baumbach T. Synchrotron-radiation computed laminography for high-resolution three-dimensional imaging of flat devices. *Physica Status Solidi (A)*, 2007, vol. 204, pp. 2760–2765. DOI: 10.1002/pssa.200775676.
32. Myagotin A., Voropaev A., Helfen L., Hänschke D., Baumbach T. Efficient volume reconstruction for parallel-beam computed laminography by filtered backprojection on multi-core clusters. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, vol. 32, pp. 5348–5361. DOI: 10.1109/TIP.2013.2285600.
33. Ando I., Mugita Y., Hirayama K., Munetoh S., Aramaki M., Jiang F., Tsuji T., Takeuchi A., Uesugi M., Ozaki Y. Elucidation of pore connection mechanism during ductile fracture of sintered pure iron by applying persistent homology to 4D images of pores: role of open pore. *Materials Science and Engineering A*, 2021, vol. 828, p. 142112. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142112.
34. Hoshino M., Uesugi K., Takeuchi A., Suzuki Y., Yagi N. Development of an x-ray micro-laminography system at Spring-8. *AIP Conference Proceedings*, 2011, vol. 1365, pp. 250–253. DOI: 10.1063/1.3625351.
35. Obayashi I. Volume-optimal cycle: tightest representative cycle of a generator in persistent homology. *SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry*, 2018, vol. 2, pp. 508–534. DOI: 10.1137/17M1159439.
36. Kondori B., Morgeneyer T.F., Helfen L., Benzerga A.A. Void growth and coalescence in a magnesium alloy studied by synchrotron radiation laminography. *Acta Materialia*, 2018, vol. 155, pp. 80–94. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.05.026.
37. Kondori B., Benzerga A.A. Effect of stress triaxiality on the flow and fracture of Mg alloy AZ31. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 45, pp. 3292–3307. DOI: 10.1007/s11661-014-2211-7.
38. Sano Y., Masaki K., Akita K., Kajiwara K., Sano T. Effect of laser peening on the mechanical properties of aluminum alloys probed by synchrotron radiation and x-ray free electron laser. *Metals*, 2020, vol. 10, p. 1490. DOI: 10.3390/met10111490.
39. Nakai Y., Shiozawa D., Kikuchia S., Obama T., Saito H., Makinob T., Neishi Y. Effects of inclusion size and orientation on rolling contact fatigue crack initiation observed by laminography using ultra-bright synchrotron radiation. *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 2, pp. 3117–3124. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.389.

40. Shiozawa D., Makino T., Neishi Y., Nakai Y. Observation of rolling contact fatigue cracks by laminography using ultra-bright synchrotron radiation. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 3, pp. 159–164. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.030.
41. Nakai Y., Shiozawa D., Kikuchi S., Obama T., Saito H., Makino T., Neishi Y. 4D observations of rolling contact fatigue processes by laminography using ultra-bright synchrotron radiation. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 183, pp. 180–189. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.03.021.
42. Solano-Alvarez W., Peet M.J., Pickering E.J., Jaiswal J., Bevan A., Bhadeshia H.K.D.H. Synchrotron and neural network analysis of the influence of composition and heat treatment on the rolling contact fatigue of hypereutectoid pearlitic steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 707, pp. 259–269. DOI: 10.1016/j.msea.2017.09.045.
43. Zhang S.Y., Spiryagin M., Ding H.H., Wu Q., Guo J., Liu Q.Y., Wang W.J. Rail rolling contact fatigue formation and evolution with surface defects. *International Journal of Fatigue*, 2022, vol. 158, p. 106762. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106762.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).