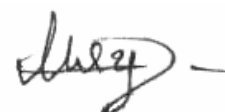


На правах рукописи



Мяготин Антон Владимирович

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО
ПЕНООБРАЗОВАНИЯ**

Специальность: 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент

Беляев Александр Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Городецкий Андрей Емельянович

кандидат технических наук

Полянский Владимир Анатольевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики»

Защита состоится «23» декабря 2010 г. в 14 ч. 00 мин.

на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 при ИПМаш РАН по адресу:
199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61, ИПМаш РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ИПМаш РАН.

Автореферат разослан « » ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук,

профессор



Дубаренко Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Пористые и ячеистые материалы имеют широкое инженерное, научное и коммерческое применение. Среди материалов с нерегулярной микроструктурой, получаемых производственным путем, металлическая пена признана привлекательной в использовании благодаря уникальной комбинации физических и технологических свойств, таких как высокая жесткость, низкая плотность, устойчивость к температурным колебаниям и механическим воздействиям, экологичность и простота утилизации. Интенсивные исследования в области коллоидной химии позволили существенно сократить стоимость производства данного материала, однако промышленный выпуск металлических пен до сих пор ограничен по следующим причинам. Во-первых, многие аспекты физических и химических процессов, сопутствующих пенообразованию, остаются невыясненными. Во-вторых, существующие технологические процедуры производства несовершенны, что приводит к возникновению неконтролируемых вариаций в структуре и свойствах материала. В-третьих, практически отсутствуют методы диагностики качества изготавливаемой пены, а также деталей, использующих ее в качестве наполнителя.

Ранее для изучения металлического пенообразования использовались преимущественно трехмерные томографические изображения образцов, представляющих собой промежуточные этапы эволюции пены. Подобный подход имеет следующие недостатки: процедура подготовки и проведение серии экспериментов занимают продолжительное время; кинематика пенообразования представлена лишь небольшой серией промежуточных «слепков», что приводит к неточностям при обработке экспериментальных данных; из-за стохастической природы процесса не представляется возможным анализировать индивидуальные особенности образцов.

В 2001 году группой немецких ученых под руководством профессора Т. Баумбаха (Институт синхротронного излучения, Карлсруэ, Германия) был поставлен уникальный эксперимент по мониторингу эволюции металлической пены от стадии твердого образца и момента зарождения первичных пор до полного ее распада методом рентгеновской радиографии. Полученные изображения позволяют выполнять оценку и анализ различных морфологических и кинематических параметров пенообразования. В радиографических последовательностях формирование пены представляется быстро изменяющимися, накладывающимися друг на друга проекциями пузырей, пор и пенных пленок. Сложность отображенных структур явилась причиной того, что в последующие годы анализ изображений ограничивался визуальным оцениванием, выполняемым наблюдателем, либо автоматическим определением элементарных характеристик (например, проекционной площади образца). Отсутствие инструментов измерения параметров пен и строгих определений искомым характеристик пенообразования не позволяло выполнить полноценную обработку и интерпретацию новых экспериментальных данных. Именно поэтому разработка методов анализа и обработки проекционных изображений процесса формирования металлической пены является актуальной и востребованной темой.

Целью исследования является разработка и реализация методов автоматической цифровой обработки последовательностей радиографических изображений для определения параметров пены и процесса пенообразования.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**:

1. Выполнить обзор существующих методов анализа и обработки радиографических изображений процесса металлического пенообразования.
2. Разработать метод детектирования коалесцентных событий (плёночных разрывов), разрушающих пенную структуру материала.
3. Предложить алгоритм обнаружения пор и пенных плёнок в радиографических изображениях.
4. Реализовать методику измерения поля скоростей пенообразования.
5. Оценить точность разработанных методов для синтетических моделей пенообразования, а также провести серию иллюстративных исследований на реальных радиографических данных.

Методы исследования. Диссертационное исследование включает в себя теоретические и численные методы. К теоретическим методам относятся методы линейной алгебры, дифференциального и интегрального исчисления, теории преобразования Фурье. К численным методам относятся классические и разработанные в рамках представленной работы алгоритмы для выполнения анализа и обработки изображений.

Научная новизна работы заключается в адаптации существующих и разработке новых методов автоматического цифрового анализа для измерения кинематических и морфологических параметров пенообразования в сериях радиографических изображений.

1. Разработан не имеющий аналогов метод автоматического обнаружения коалесцентных событий, базирующийся на спектральном анализе и рекурсивном разбиении изображений.
2. Впервые определены численные меры оценки интенсивности коалесцентных явлений – мгновенный и интегральный темпы коалесценции.
3. Предложен метод обнаружения проекционных границ пор и пенных плёнок, базирующийся на сегментации контрастных границ с субпиксельной точностью, процедуре связывания и поиске оптимальных параметров фигуры методом градиентного спуска и отличающийся от классических тем, что распознавание искомым объектов выполняется корректно при наличии помех и большого числа перекрытий отображаемых структур.
4. Тензорный метод вычисления поля скоростей в видеопоследовательностях дополнен интерполяцией адаптивным окном Гаусса, что позволяет определить векторы скоростей по всей площади кадра.
5. Представлены результаты анализа последовательностей реальных радиограмм, подтверждающие возможность использования предложенных методов в информационно-измерительных системах мониторинга процесса металлического пенообразования.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что разработанные методы могут использоваться при создании систем неразрушающего контроля качества металлической пены или деталей, в которых она выступает наполнителем. Кроме того, их систематическое использование позволит оценить влияние исходного состава образцов и параметров пенообразования на результирующую микроструктуру и, как следствие, оптимизировать существующие технологии производства.

Достоверность научных результатов определяется строгостью используемого в работе математического аппарата, корректностью выбранных предположений и сравнительным анализом результатов, полученных в работе, с имеющимися экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Проекция коалесцентных событий детектируются посредством анализа амплитудных спектров и рекурсивного разбиения изображений.
2. Проекционная площадь коалесцентных событий используется в качестве количественной меры интенсивности коалесцентных явлений.
3. Разработана процедура распознавания проекционных границ пор и пенных пленок, которая выполняется корректно даже при наличии шумов и большого числа перекрытий отображаемых объектов.
4. Показано, что дополнение тензорного метода интерполяцией адаптивным окном Гаусса позволяет определить векторы скорости на всей площади кадра.
5. С использованием синтетических моделей пенообразования предложена методика оценки погрешностей измерений, выполняемых разработанными методами.
6. По результатам численных экспериментов на реальных радиографических данных установлена возможность использования новых методов в информационно-измерительных системах для определения параметров металлического пенообразования.

Внедрение результатов. Предложенные в рамках диссертационной работы методы реализованы в виде консольных приложений на языке Си++ с применением компилятора GNU Compiler Collection (GCC). Указанные программы используются при проведении рентгенографических исследований металлического пенообразования в Институте синхротронного излучения при Исследовательском центре г. Карлсруэ (Германия) и на экспериментальной станции ID19 Европейского центра синхротронного излучения (Гренобль, Франция).

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: «3-я конференция по методам неразрушающего контроля» (Прага, Чехия, 2005 г.); «Российско-корейская конференция по передаче и обработке сигналов, сенсорам и системам мониторинга» (Хабаровск, 2006 г.); «8-я конференция по дифракционным и абсорбционным рентгеновским методам диагностики» (Баден-Баден, Германия, 2006 г.); «Совместная российско-китайская конференция по современным материалам и технологиям производства» (Хабаровск, 2007 г.); а также на семинарах Фраунгоферовского института неразрушающего контроля (Дрезден, Германия, 2005 г.); Института синхротронного излучения (Карлсруэ, Германия,

2008 г.); кафедры «Вычислительной техники» Тихоокеанского государственного университета (Хабаровск, 2008 г.); кафедры «Информатики» Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (Санкт-Петербург, 2009 г.); Института проблем машиноведения РАН (Санкт-Петербург, 2010 г.); кафедры «Мехатроники» Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург, 2010 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 9 печатных работах, перечисленных в конце автореферата, куда входят 4 статьи (3 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК), 1 монография, 3 доклада на научно-технических конференциях, 1 патентное свидетельство.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 122 наименования, трех приложений, а также содержит 52 рисунка и 1 таблицу. Объем диссертации с приложениями составляет 153 страницы машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности и практической значимости темы диссертационного исследования, приводятся постановка задачи и краткая аннотация содержания работы по разделам.

В первой главе дается краткий обзор областей применения, физических процессов, вовлеченных в пенообразование, методов производства металлических пен; приводится описание экспериментальной рентгенографической установки, используемой для визуализации процесса формирования пены.

В начале главы описываются основные свойства пористых металлов, которые являются привлекательными для использования в различных приложениях. К таким свойствам следует отнести высокую прочность, структурную стабильность при изменяющихся температурных и механических воздействиях, утилизируемость. Отмечается, что данный материал может применяться при производстве облегченных конструкций (в первую очередь для аэрокосмической и автомобильной отраслей), фильтров, элементов отвода тепла, медицинских имплантов. Далее указывается, что свойства пористых материалов находятся в непосредственной зависимости от их микроструктуры – морфологии.

В следующем разделе перечисляются основные термины, используемые при описании структуры пены, – поры, пленки и каналы Плато-Гиббса. Кратко рассматриваются физические процессы, сопутствующие формированию пены. Пенообразование включает дренаж (отток жидкого материала под действием силы тяжести или избыточного капиллярного давления), коалесценцию (разрыв пенных пленок с последующим объединением нескольких пор), огрубление структуры (изменение геометрической формы пор) и движение пузырей.

Перечисляются основные способы производства металлических пен, такие как прямое пенообразование, отливка и металлургический метод. Отмечается, что образцы, рассматриваемые в рамках данной работы, были подготовлены посредством последнего. Метод заключается в том, что металлический порошок (алюминиевый сплав AlSi7) перемешивают с газообразующим реагентом (TiH_2),

массовая доля которого составляет 0,3 – 1 %. Полученную смесь прессуют при высоких температуре и давлении и формируют образцы, имеющие вид таблеток серого цвета.

Далее в главе раскрывается принцип рентгенографических методов, который состоит в том, что при прохождении пучка через исследуемый объект происходит поглощение излучения, пропорциональное толщине и плотности материала. Таким образом, трехмерная структура объекта проецируется на плоскость, а рентгенографические методы, регистрирующие изменения интенсивности потока излучения, называются контрастными.

В работе рассматриваются базовые принципы функционирования устройств генерации рентгеновского излучения – рентгеновских трубок и источников синхротронного излучения. Далее выполняется анализ достоинств и недостатков каждого из устройств. Благодаря высокой интенсивности и малому углу расхождения излучения, генерируемого синхротроном, становится возможным выполнять радиографическую съемку с высокими частотой и разрешением (порядка нескольких микрон).

В следующем разделе приводится краткий обзор систем детектирования рентгеновского излучения. В радиографических экспериментах, рассматриваемых в данной работе, использовалась камера Фрелона, которая является детектором косвенного подсчета фотонов. В ней рентгеновское излучение преобразуется в видимый свет при помощи сцинтилляционного экрана. Поток света после прохождения увеличительных линз направляется на матрицу фотодиодов. Управляющая электроника периодически считывает изображение с матрицы и передает его на компьютер, где оно сохраняется в файл. Значение яркости изображения f в заданной дискретной позиции $(i, j) \in \mathbf{Z}^2$ задается

$$\text{уравнением } f(i, j) = \left[c \cdot \int_{t_0}^{t_0+\tau} \left(\int_{i\Delta x}^{(i+1)\Delta x} \int_{j\Delta y}^{(j+1)\Delta y} I(x, y, t) dx dy \right) dt \right]_q, \text{ где } I(x, y, t) \text{ – интенсивность}$$

излучения, Δx , Δy – вертикальный и горизонтальный размеры пикселя матрицы, τ – время экспозиции (период дискретизации), c – параметр аналого-цифрового преобразователя, $[\cdot]_q$ – квантование цифрового сигнала.

Далее формулируются используемые в работе собственные определения пикселя и цифрового изображения. В отличие от общепринятого значения, пиксель $p_{i,j}$ – это квадрат единичной площади $[i-0.5, i+0.5) \times [j-0.5, j+0.5) \subset \mathbf{R}^2$, где (i, j) – координаты центра пикселя, а не точка на плоскости или индекс элемента матрицы. Преимущество данного подхода заключается в том, что представляется возможным оперировать с субпиксельными координатами. Цифровое изображение $f: \mathcal{F}_{M \times N} \mapsto \mathcal{C}$ размером $M \times N$ пикселей определяется как отображение плоскости

изображения $\mathcal{F}_{M \times N} \subset \mathbf{R}^2$, т.е. объединения пикселей $\mathcal{F}_{M \times N} = \bigcup_{i=0}^{M-1} \bigcup_{j=0}^{N-1} p_{i,j}$, на

множество значений функции яркости $\mathcal{C} \subset \mathbf{R}$ (для бинарного изображения $\mathcal{C} = \{0, 1\}$, для изображений с градациями серого цвета $\mathcal{C} = \{0, 1, \dots, 255\}$).

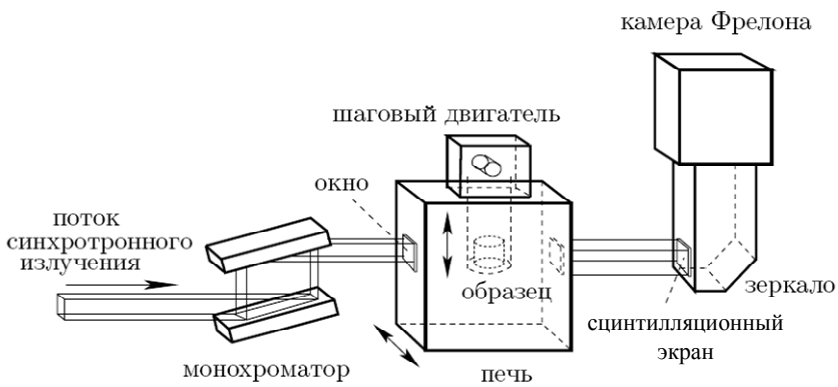


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В конце главы рассматривается экспериментальная установка мониторинга процесса металлического пенообразования (рис. 1). Образец помещается в печь, оборудованную полированными алюминиевыми окнами. Поток синхротронного излучения направляется на монохромную оптику. Шаговый мотор используется для позиционирования образца в потоке излучения. Монохромный поток после прохождения материала попадает на сцинтилляционный экран камеры Фрелона. Рентгеновские фотоны преобразовываются в видимый свет, который регистрируется фотодиодной матрицей. Размер радиографического изображения составляет 2048 x 2048 пикселей. Пространственное разрешение пикселя – 10 мкм. Частота регистрации кадров выбирается из диапазона 1 – 20 Гц. Каждая последовательность включает 500 – 900 изображений. Отдельные кадры типовой радиографической последовательности приведены на рис. 2. В среднем эксперимент занимает от трех до пятнадцати минут.

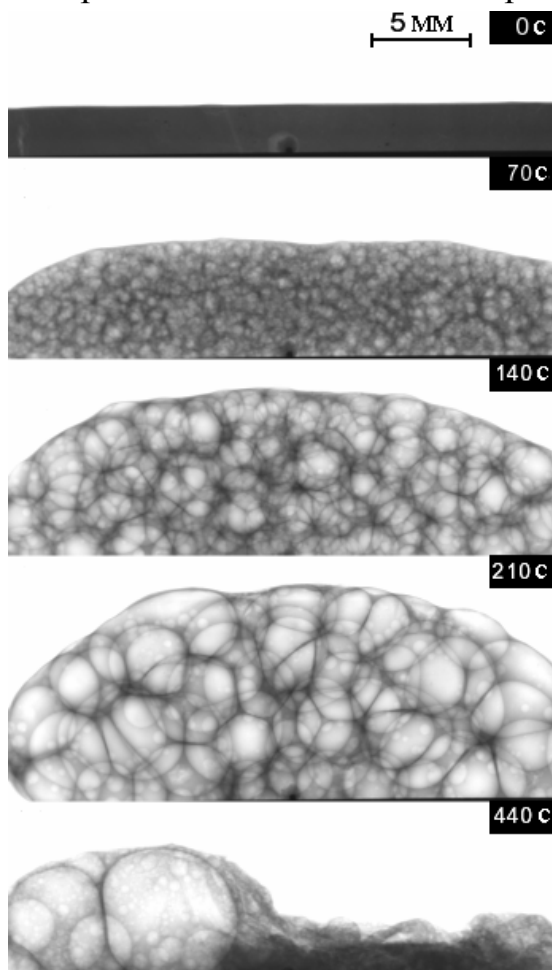


Рис. 2. Формирование и распад металлической пены в радиографических изображениях

В заключительной части отмечается, что для обеспечения корректности измерений параметров пенообразования следует ввести предположение о том, что данный процесс изотропен.

Во второй главе представлен метод детектирования коалесцентных событий.

Во вводном разделе главы определяется термин коалесцентного события, которое представляет собой спонтанное объединение нескольких пор в одну большую вследствие разрыва пенной пленки. Отмечается, что предыдущие исследования коалесцентных процессов базировались на подсчете пленочных разрывов вручную. Указывается на необходимость разработки процедуры, которая позволит выполнять их обнаружение в автоматическом режиме. С использованием фундаментальной теоремы отсчетов показано, что явления, наблюдаемые в радиографической последовательности, можно условно разделить на непрерывные, т.е. такие, для которых выполняются условия временной дискретизации, и спонтанные, период которых

короче периода дискретизации. Далее выводится формальное определение коалесцентного события, т.е. такого, для которого нарушаются требования временной дискретизации, при этом его проекционная площадь называется коалесцентной площадью.

В работе показано, что все явления, возникающие при пенообразовании, в радиографических изображениях возможно описать локальными сдвигами и исчезновениями проекций структурных элементов. Для автоматического разделения локальных сдвигов и коалесцентных событий предлагается использовать свойство инвариантности амплитудного спектра к сдвигам в реальной области. Пусть $\hat{f}(k)$ – Фурье-образ функции $f(x)$, тогда образ функции $f(x+x_0)$, сдвинутой по аргументу, имеет вид: $\exp(2\pi i x_0 k) \cdot \hat{f}(k) = r(k) \exp(i(\varphi(k) + 2\pi x_0 k))$, где $r(k)$, $\varphi(k)$ – амплитудный и частотный спектры. Откуда следует, что сдвиг в реальной области соответствует сдвигу фазовой характеристики, при этом амплитудный спектр остается неизменным. На основании данного факта был предложен метод обнаружения коалесцентных событий. Соответствующий алгоритм представлен рекурсивной процедурой `detect_CE()` (рис. 3). Для двух последовательных кадров f_l и f_{l+1} она вычисляет общую коалесцентную площадь $d_{l,l+1}$ и отображает ее положение на выходном изображении $g_{l,l+1}$. В качестве настроечных параметров в процедуре используются наименьший возможный размер сектора Δ_{xy} и пороговое значение T_ε . Алгоритм включает несколько вычислительных стадий. *Сравнение* (строки 1-3): амплитудные спектры входных радиограмм сравниваются, и, если разница меньше, чем порог T_ε , процедура завершает работу, т.е. коалесцентных событий обнаружено не было. *Выравнивание* (строки 3-6): для сокращения разницы амплитудных спектров производится выравнивание изображений. Процедурой `compare_disp_2D()` вычисляется относительный сдвиг (δ_x, δ_y) . Далее создается временное изображение $f_{l+1}^{(1)}$, которое является копией f_{l+1} , сдвинутой на (δ_x, δ_y) . Разница амплитудных спектров между исходным и выровненным изображениями рассчитывается снова. *Разбиение* (строки 12-18): если разница все еще превышает порог, процедура производит разбиение области изображения. При неравенстве спектров возможны два крайних случая: суперпозиция различных сдвигов в пределах одного сектора изображения и коалесцентное событие. Чтобы локализовать положение последнего, исходный

```

procedure detect_CE ( $f_l, f_{l+1}, M, x_0, y_0$ )
1: bool isEqual = compare_spectra( $f_l, f_{l+1}, T_\varepsilon$ )
2: if isEqual then return
3:  $(\delta_x, \delta_y) = \text{compare\_disp\_2D}(f_l, f_{l+1})$ 
4:  $f_{l+1}^{(1)} = \text{extract\_sub\_image}(f_{l+1}, \delta_x, \delta_y, M)$ 
5: bool isEqual = compare_spectra( $f_l, f_{l+1}^{(1)}, T_\varepsilon$ )
6: if isEqual then return
7: if  $M \leq \Delta_{xy}$  then
8:    $d_{l,l+1} = d_{l,l+1} + \Delta_{xy}^2$ 
9:   отобразить  $U = [x_0, x_0 + \Delta_{xy}] \times [y_0, y_0 + \Delta_{xy}]$  в  $g_{l,l+1}$ 
10:  return
11: end if
12: for  $r = 0$  to 1 do
13:   for  $c = 0$  to 1 do
14:      $f_l^{(r,c)} = \text{extract\_sub\_image}$ 
15:        $(f_l, rM/2, cM/2, M/2)$ 
16:      $f_{l+1}^{(r,c)} = \text{extract\_sub\_image}$ 
17:        $(f_{l+1}, rM/2, cM/2, M/2)$ 
18:     detect_CE
19:        $(f_l^{(r,c)}, f_{l+1}^{(r,c)}, M/2, rM/2, cM/2)$ 
20:   end for
21: end for

```

Рис. 3. Алгоритм обнаружения коалесцентных событий

сектор делится на подсекторы. Соответственно, каждая радиограмма разбивается на четыре сектора размером $M/2 \times M/2$ пикселей, и процедура `detect_SE()` вызывается рекурсивно на каждом из них. *Детектирование* (строки 7-11): как только сторона сектора уменьшается до размера Δ_{xy} , процедура сообщает об обнаружении события. Значение $d_{l,l+1}$ инкрементируется на площадь наименьшего сектора Δ_{xy}^2 , и коалесцентная площадь U отображается на выходном изображении $g_{l,l+1}$. Для двух кадров размерами M^2 пикселей вычислительная сложность алгоритма составляет $O(M^2 (\log_2 M)^2)$ операций.

Чтобы формализовать понятие интенсивности коалесцентных процессов, вводится *мгновенный темп коалесценции*, который для l -го кадра радиографической последовательности определен как $a_l = d_{l,l+1} / M^2 \Delta t$, т.е. представляет собой общую коалесцентную площадь, нормированную к площади изображения и периоду дискретизации. Далее определяется интегральный темп коалесценции $A_l = \Delta t \sum a_l$ – общая коалесцентная площадь, рассчитанная для серии кадров $[0, l]$.

В работе проводится анализ точности результатов, получаемых описанной выше процедурой детектирования. С использованием численных экспериментов, моделирующих пенообразование и коалесценцию, генерируется серия

радиографических изображений, площадь событий в которых известна. Разработанный метод применяется на синтетических радиограммах для определения характеристик a_l и A_l , которые затем сравниваются с исходными. Для тестирования были предложены две модели. Первая – модель изолированных пузырей. Она включает множество сфер, заключенных в трехмерном объеме, которые двигаются, поднимаются вверх, надуваются и в некоторые случайные моменты времени исчезают, имитируя коалесцентные события. Генерация радиограмм выполнялась при помощи классического алгоритма трассировки лучей. На рис. 4, а приведена виртуальная сцена модели изолированных пузырей, график б отображает проекции сфер и определенную с помощью разработанного метода коалесцентную площадь (черные области). Характеристики исходного и рассчитанного темпов коалесценции показали, что относительная ошибка определения площади не превышала 10%. В качестве второй модели выступало томографическое изображение реальной алюминиевой пены (рис. 4, в). В виртуальной лаборатории размещался источник излучения и детектор. Образец смещался с постоянной скоростью, имитируя линейное смещение и рост пены. Коалесцентные события моделировались путем обнуления коэффициентов

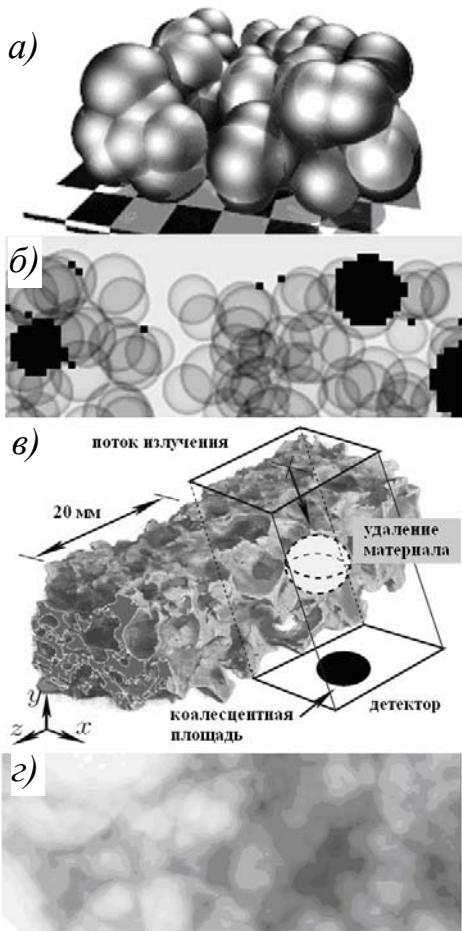


Рис. 4. а, в – модели пенообразования; б, г – соответствующие синтетические радиограммы

плотности в сферическом объеме. Как и в предыдущем эксперименте, синтетические радиограммы генерировались алгоритмом трассировки лучей. На базе данной модели было показано, что в отличие от разностного метода, ошибка определения коалесцентной площади не превышает 10-15 % для широкого диапазона пороговых значений T_c и скоростей образца.

Разработанный метод был далее опробован на радиографических последовательностях реального процесса пенообразования. В работе проведен анализ двух образцов. В исходный состав первого примешивались кремниевые-углеродные частицы диаметром 3 мкм, а во второй – 63 мкм соответственно. Измеренные характеристики представлены на рис. 5, а и б. В соответствии с оценками мгновенного темпа коалесценции, сразу после старта пенообразования регистрируются первые события. Они имеют малую амплитуду и высокую частоту появления. С течением времени событий становится меньше, но при этом их амплитуда возрастает благодаря росту среднего диаметра пор. Анализ радиографических изображений (рис. 5, в и г) позволяет утверждать о наличии существенной разницы в характере пенообразования, протекающего в образцах.

Измеренные характеристики также свидетельствуют, что уже на ранних стадиях у образца с крупными частицами произошло большее число разрывов пенных пленок. Как следствие, его внутренняя структура грубее, т.е. наблюдается значительное число пор большого диаметра. Представленные измерения позволили подтвердить выдвинутую ранее гипотезу о том, что малые частицы стабилизируют пенные пленки, тогда как частицы, размер которых сопоставим с толщиной пленок, ускоряют механизмы разрушения, что приводит к образованию пены с нерегулярной структурой.

В третьей главе представлен метод распознавания образов, целью которого ставится обнаружение проекционных границ пор в радиографических изображениях и их аппроксимация окружностями или эллипсами. В главе описываются сначала детали алгоритма для распознавания окружностей, а затем приводятся модификации, которые следует предпринять для нахождения эллипсов.

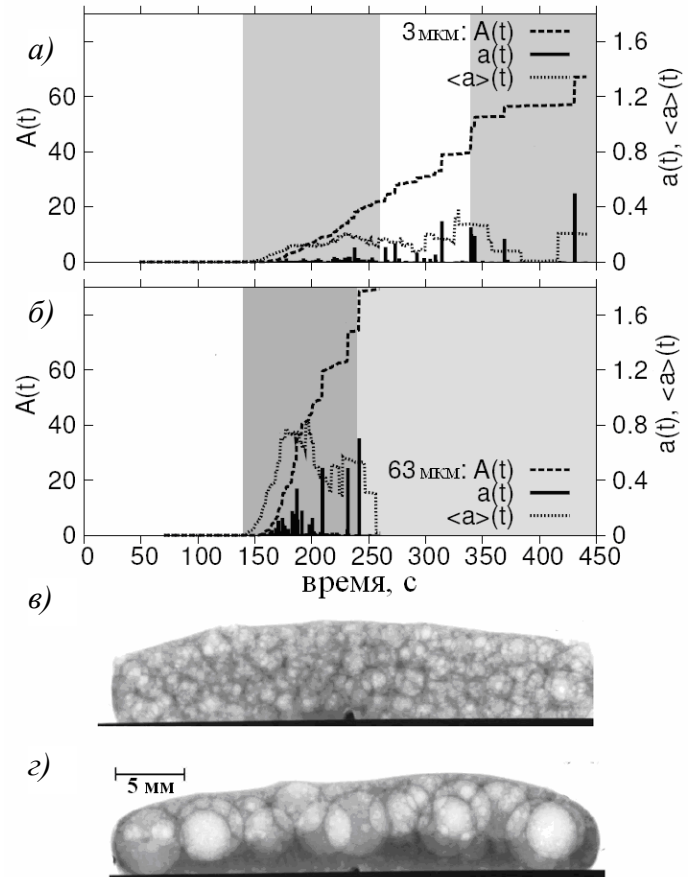


Рис. 5. Измеренные характеристики и радиографические изображения образцов с частицами размерами 3 мкм (а, в) и 63 мкм (б, г)

Глава открывается обзором методик, используемых при анализе морфологии пористого материала. Рассматриваются стереологические методы, компьютерная томография и радиография. Подчеркивается, что радиографический метод позволяет получать информацию об изменениях в структуре пены во время ее формирования. Формулируются основные этапы разрабатываемого алгоритма. К ним относятся: сегментация контрастных границ, пиксельное связывание и распознавание образов.

Сегментация контрастных границ преобразует исходное изображение с градациями серого цвета в бинарное, в котором значение пикселя равняется единице, если пиксель принадлежит контрастной границе, и нулю – в другом случае. Далее приводится анализ радиографических изображений, на основании которого выводится формальное определение граничного пикселя и контрастной границы. В работе граничные пиксели делятся на кровельные и ступенчатые. Пиксель p в цифровом изображении f объявляется кровельным граничным пикселем, если существует точка $\mathbf{x} = (x, y) \in p$, в которой $\nabla_{\vec{n}}g(\mathbf{x}) = 0$ и $|\nabla^2_{\vec{n}}g(\mathbf{x})| \rightarrow \max$. Здесь $\vec{n} = (n_x, n_y)$ – вектор нормали контрастной границы; $g(x, y)$ – непрерывное изображение, получаемое посредством интерполяции полиномом Тейлора дискретного изображения f ; $\nabla_{\vec{n}}g(\mathbf{x}), \nabla^2_{\vec{n}}g(\mathbf{x})$ – первая и вторая производные по направлению \vec{n} . Пиксель p в цифровом изображении f объявляется ступенчатым граничным пикселем, если существует точка $\mathbf{x} = (x, y) \in p$, в которой $|\nabla_{\vec{n}}g(\mathbf{x})| \rightarrow \max$ и $\nabla^2_{\vec{n}}g(\mathbf{x}) = 0$. Численные эксперименты с использованием классических алгоритмов сегментации контрастных границ показали необходимость применения метода, работающего с субпиксельной точностью. При невыполнении данного условия большинство проекций пор в бинарных изображениях отсутствует, либо их положение находится неверно.

Для сегментации кровельных границ был адаптирован метод Штегера, принцип которого сводится к вычислению в каждом пикселе параметра t

$$t = \frac{f_x n_x + f_y n_y}{f_{xx} n_x^2 + 2f_{xy} n_x n_y + f_{yy} n_y^2}$$

с последующей проверкой принадлежности точки контрастной границы пикселю $\mathbf{x} = (x_i + tn_x, y_j + tn_y) \in p_{ij}$. Если условие выполняется, то пиксель объявляется кровельным.

Для сегментации ступенчатых границ с субпиксельной точностью в работе была предложена модификация классического детектора Канни. Для каждого пикселя p_{ij} изображения f вычисляется значение первой производной по направлению $\nabla_{\vec{u}}g(\mathbf{x})$ в точке $\mathbf{x} = (x_i + \tilde{t}w_{\vec{u}}u_x, y_j + \tilde{t}w_{\vec{u}}u_y)$, где вектор $\vec{u} = (u_x, u_y)$ – дискретная аппроксимация вектора \vec{n} ; $w_{\vec{u}}$ – ширина пикселя в направлении \vec{u} ; скаляр $\tilde{t} \in [-1/2, +1/2]$. Если производная $\nabla_{\vec{u}}g(\mathbf{x})$ имеет локальный максимум в пикселе p_{ij} , то он объявляется ступенчатым.

Далее в главе приводится описание процедуры связывания, которая по заданному бинарному изображению составляет список контуров L_c , где контур

определен как цепочка граничных пикселей. Разрабатывается формальное определение контура c_i и описывается алгоритм построения списка L_c .

Процедура распознавания образов рассматривается в следующем разделе. Обзор методов нахождения окружностей в изображениях выявил, что существующие алгоритмы либо накладывают ограничения на число пересечений окружностей, либо имеют значительные вычислительные затраты (например, преобразования Хафа). В работе приводится концепция нового алгоритма, который включает следующие шаги. Для каждого контура $c_i \in L$ методом наименьших квадратов находятся приближенные параметры исходной фигуры (окружности или эллипса), т.е. так называемое начальное решение $v^{(0)}$. Далее вычисляется искусственная мера – энергия $E(v)$, которая минимизируется при лучшем совпадении геометрической фигуры и границы отображенной поры. Из списка контуров L_c удаляются те кандидаты, которые потенциально принадлежат кривой v . Далее извлекается новый контур c_{i+1} , и алгоритм выполняет следующую итерацию.

Нахождение начального решения формулируется как задача минимизации функции ошибки $\varepsilon(\hat{x}, \hat{y}, R) = \sum_k (R^2 - ((x_k - \hat{x})^2 + (y_k - \hat{y})^2)) \rightarrow \min$, где $(x_k, y_k) \in c_i$. В работе используется определение энергии фигуры $E(v)$, которая складывается из внутренней E_v и внешней E_f составляющих. Внутренняя энергия описывает эластичность кривой и ее способность изгибаться. Посредством аналитического уравнения окружности выводится уравнение ее внутренней энергии в явном виде, из которой следует, что E_v тем выше, чем больше радиус. Внешняя энергия отвечает за то, чтобы кривая смещалась в направлении контрастных границ, т.е. необходима для улучшения аппроксимации окружностью проекции поры. На базе приведенных определений разрабатывается алгоритм итерационного поиска, который преобразует список контуров L_c в список окружностей L_v . Алгоритм сортирует список L_c по длине контуров, выбирает текущий контур c_i , для которого находится начальное решение $v^{(0)}$, и вычисляет энергию $E(v^{(0)})$, которая затем минимизируется методом градиентного спуска. Обратное направление градиента $-\vec{\nabla}E$ выбирается в качестве

направления поиска, т.е. $\vec{d}^{(t)} = -\left(\frac{\partial E}{\partial \hat{x}}, \frac{\partial E}{\partial \hat{y}}, \frac{\partial E}{\partial R}\right)$,

где t – номер итерации. В качестве критерия окончания поиска выступает малое уменьшение энергии при переходе от одной итерации к другой. Далее выполняется процедура легализации, которая проверяет все необработанные контуры в L_c на предмет их принадлежности текущей окружности. Для этой цели вычисляется среднее расстояние ε_d между элементами контура $x_k \in c_i$ и кривой. Если оно меньше, чем максимальная разрешенная дистанция T_d , то считается, что контур c_i принадлежит $v^{(t)}$.

Достоверность результатов, получа-

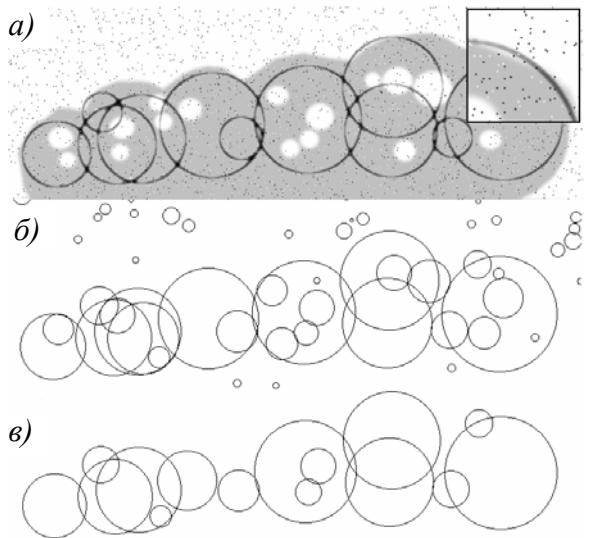


Рис. 6. Распознавание окружностей при наличии пуассоновского шума

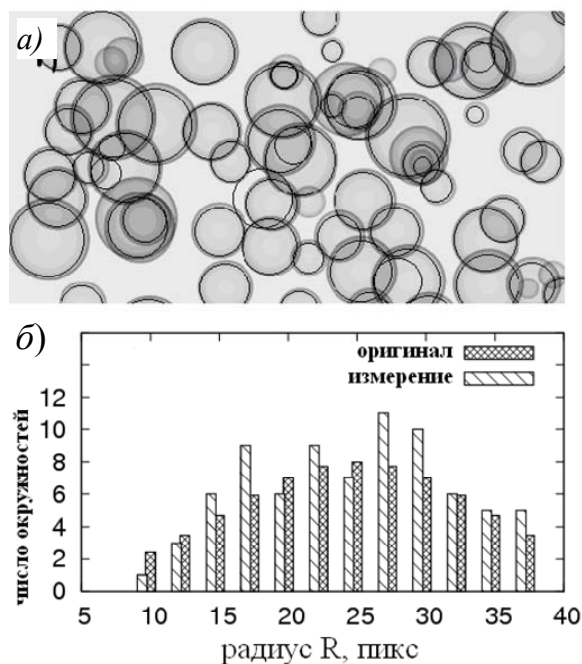


Рис. 7. Статистический анализ синтетической проекции

пузырей. На рис. 7 приведен фрагмент синтетической радиограммы с распознанными окружностями, а также исходные и расчетные распределения их радиусов. На рис. 8 показан результат распознавания проекционных границ на реальном радиографическом изображении пены. Во всех проводимых экспериментах разработанный метод воспроизводит границы пор с высокой точностью (ошибка не превышает несколько пикселей), в особенности для пор большого диаметра.

Далее описывается комбинация методов распознавания образов и детектирования коалесцентных событий для автоматического сбора статистики о критической толщине пенных пленок (т.е. такой, при которой происходит их разрыв). Посредством предложенной методики было показано, что критическая толщина в среднем составляет 65 мкм и на протяжении пенообразования не меняется.

Аппроксимация пор окружностями является надежной, простой, но в то же время не всегда адекватной моделью для реальной пены. В следующем разделе перечислены модификации процедуры распознавания образов, которые позволяют расширить ее возможности для нахождения эллиптических кривых. В данной работе эллипс задается кортежем вида $v = (\hat{x}, \hat{y}, R_x, R_y, \theta)$. Нахождение начального решения также базируется на методе наименьших квадратов. В работе выводится уравнение внутренней энергии эллипса, откуда вытекает, что она зависит от радиусов R_x и R_y .

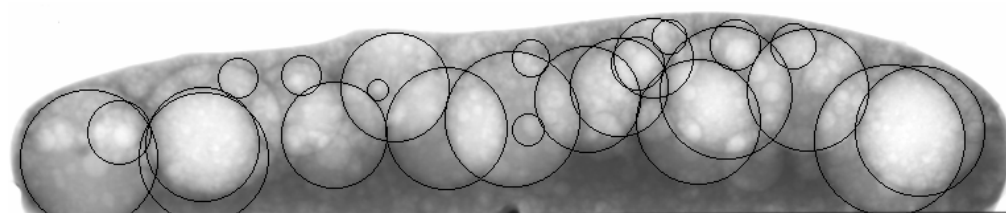


Рис. 8. Распознавание образов в реальной радиограмме

емых разработанным методом, проверялась различными численными экспериментами с использованием синтетических радиограмм. На рис. 6 показаны результаты применения метода на изображении с наложенным пуассоновским шумом ($\lambda=10$). На графике б различимо большое число ложных окружностей. Причина их появления кроется в том, что шумы воспринимаются методом как контрастные границы, которые последовательно преобразуются в окружности. Если изменить входные параметры алгоритма так, чтобы его чувствительность к незначительным вариациям функции яркости уменьшилась, то число ошибок сокращается (рис. 6, в). В следующем эксперименте приводится пример статистического анализа на базе разработанного метода. Для этих целей использовались проекции модели изолированных

Метод градиентного спуска осуществляет поиск минимумов энергии в $(\hat{x}, \hat{y}, R_x, R_y, \theta)$ -пространстве.

Модифицированный метод также применялся как на синтетических, так и на реальных радиограммах. Эксперименты показали, что, несмотря на удовлетворительные результаты, получаемые на синтетических изображениях, границы пор в реальных обнаруживаются недостаточно точно. Ошибки процедуры распознавания объясняются сложностью поиска локальных минимумов в пятимерном пространстве.

Четвертая глава диссертации посвящена методике расчета поля скоростей процесса формирования металлической пены, т.е. так называемой проблеме вычисления оптического потока.

Во вводном разделе приводится описание экспериментальных установок и методов, позволяющих в реальном масштабе времени оценивать кинематические параметры пенообразования. Рассматривается схема лазерного экспандометра, предложенного Дуарте и Банхартом, для динамического измерения объема пены. Далее описывается нейтронная радиоскопия, в которой временные изменения плотности материала оцениваются косвенно по числу нейтронов, пропущенных материалом исследуемого образца. Отмечается, что радиографические методы являются преимущественными для изучения кинематики пенообразования, так как предоставляют более полную информацию о распределении плотности материала.

Ранние исследования радиографических последовательностей ограничивались оценками скоростей верхнего фронта пены. Формулируется задача, которая заключается в разработке метода автоматического измерения скоростей материала по всей площади кадра. Соответствующий алгоритм принимает в качестве входа последовательность двумерных изображений и рассчитывает поле скоростей $\vec{u}(x, y, t) = (u_x, u_y)(x, y, t)$. В работе приводится классическое уравнение оптического потока: $-f_t = \nabla f_{2D} \cdot \vec{u}$, где $\nabla f_{2D} = (f_x, f_y)$ – пространственный градиент, f_t – производная f по t , \vec{u} – неизвестный вектор скорости. Отмечается, что уравнение не имеет единственного решения, и для определения скоростей необходимо вводить дополнительные ограничения.

В следующем разделе приводится обзор алгоритмов вычисления оптического потока, которые условно разделяются на две группы: дифференциальные и методы блочного сравнения. Анализ показал, что первые позволяют восстановить векторное поле скоростей с большей точностью. Вторые, как правило, выигрывают по скорости обработки изображений. За основу решения уравнения оптического потока в работе выбирается тензорный метод, относящийся к дифференциальным методам. Главными его достоинствами являются точность определения векторов скоростей, небольшие вычислительные затраты и возможность классификации типов движений.

Ключевая идея тензорного метода заключается в следующем. Пусть вектор ориентации $\vec{r} = (r_x, r_y, r_t)$ в точке $\mathbf{x} = (x, y, t)$ направлен в сторону постоянного значения функции яркости f . При $r_t \neq 0$ искомый вектор скорости рассчитывается как $\vec{u} = (r_x/r_t, r_y/r_t)$. Так как градиент $\vec{\nabla} f = (f_x, f_y, f_t)$ направлен в сторону максимального изменения f , выполняется отношение $\vec{r} \perp \vec{\nabla} f$, и поиск неизвестного вектора \vec{r} можно сформулировать как проблему минимизации:

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') (\vec{r} \cdot \vec{\nabla} f^T(\mathbf{x}'))^2 d\mathbf{x}' \rightarrow \min,$$

где $W(\mathbf{x})$ – оконная функция, определяющая веса сглаживания в окрестности точки \mathbf{x} . Данное выражение можно представить в матричном виде:

$$\vec{r} \left[\int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \nabla f^T(\mathbf{x}') \nabla f(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \right] \vec{r}^T = \vec{r} \mathbf{J} \vec{r}^T \rightarrow \min \text{ и } \mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xt} \\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yt} \\ J_{tx} & J_{ty} & J_{tt} \end{bmatrix},$$

где \mathbf{J} – трехмерный структурный тензор, элементы которого вычисляются как

$$J_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') f_p(\mathbf{x}') f_q(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \text{ для } p, q \in \{x, y, t\}.$$

Пусть $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ – собственные вектора тензора \mathbf{J} (без потери общности $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$), тогда \vec{r} коллинеарен \vec{v}_3 , и расчет оптического потока сводится к определению собственных векторов тензора \mathbf{J} .

Анализ ранга тензора \mathbf{J} показывает, что вектор скорости \vec{u} возможно определить только при $\text{rank}(\mathbf{J}) = 0$ и $\text{rank}(\mathbf{J}) = 2$. Как следствие, в расчетном векторном поле присутствуют области, значения скоростей в которых будут неизвестны (рис. 9, а). Для восстановления векторного поля на всей площади кадра в работе предлагается использовать интерполяцию окном Гаусса, которая записывается следующим выражением:

$$\langle \vec{u} \rangle(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\forall \mathbf{x}' \in U : \exists \vec{u}(\mathbf{x}')} \vec{u}(\mathbf{x}') G_{\sigma}(\mathbf{x}' - \mathbf{x})}{\sum_{\forall \mathbf{x}' \in U : \exists \vec{u}(\mathbf{x}')} G_{\sigma}(\mathbf{x}' - \mathbf{x})},$$

где G_{σ} – трехмерная функция Гаусса, определяющая веса интерполяции, $U \subset \mathbf{R}^3$ – область интерполяции. Количество и значения весов интерполяции непосредственно зависят от исходного поля $\vec{u}(\mathbf{x})$, поэтому в название методики добавлена характеристика «адаптивная». Пример расчетного поля $\langle \vec{u} \rangle(\mathbf{x})$ приведен на рис. 9, б.

Демонстрация методики выполнялась на примере анализа последовательностей кадров формирования пены в литейной форме и двустадийного пенообразования.

В первом случае подготовленный образец помещался в L-образную литейную форму. После подведения тепла наблюдался стремительный старт пенообразования. В данном эксперименте пена росла, главным образом, в вертикальном направлении до тех пор, пока нижняя полость на левой стороне не заполнялась материалом. Газообразующий реагент продолжал испускать водород, что приводило к выдавливанию расплавленного металла из полости. На

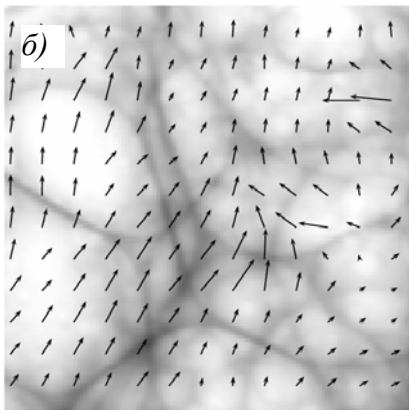
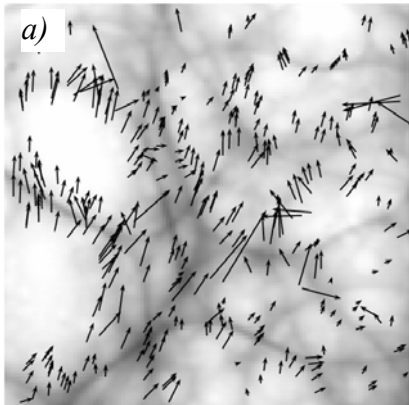


Рис. 9. Расчетные поля скоростей, полученные тензорным методом (а) и интерполяцией адаптивным окном Гаусса (б)

дальнейших кадрах видно, что потоки металла движутся вдоль полости вправо, а затем вверх. Расчетное векторное поле (рис. 10) совпадает с визуальными оценками наблюдаемого процесса и предоставляет количественную информацию о скоростях пенообразования.

Дополнительно к полю скоростей был выполнен расчет распределения коалесцентных событий в образце посредством процедуры, представленной во второй главе. Для каждого пикселя радиограммы определялось число событий, обнаруженных в последовательности кадров. Двумерное распределение выявило наличие областей с высокой частотой коалесцентных событий. Больше число пенных разрывов наблюдается в средней, левой и правой частях литейной формы. Первичной интерпретацией данного явления может быть появление значительных сил трения между пеной и формой, что провоцирует большое число пленочных разрывов. Важность данного наблюдения заключается в том, что уже на момент производства облегченных компонентов становится возможным локализовать потенциальные места отслоения пены от стенок литейной формы.

Во втором примере исследуемый образец после прохождения температуры плавления быстро расширялся и приобретал пеннообразную структуру. После достижения некоторого объема пена стабилизировалась на короткое время и затем продолжала расти, но уже с меньшей скоростью. В качестве характеристики темпов роста принималась средняя вертикальная скорость:

$$\bar{u}_y(y,t) = \frac{\sum_{x=1}^M u_y(x,y,t)}{M}, \quad \text{где } u_y - \text{вертикальный}$$

компонент вектора \vec{u} , M – ширина изображения, измеренная в пикселях. Расчетное распределение $\bar{u}_y(y,t)$ представлено на рис. 11, а. Вертикальный профиль скорости на 80 секунде (б) показывает, что верхние слои пены двигаются с более высокой скоростью ($\sim 0,15$ мм/с) в сравнении с нижними ($\sim 0,03$ мм/с). Данный эффект объясняется тем, что они выталкиваются вверх нижними слоями и при этом расширяются сами. На горизонтальном профиле (рис. 11, в) отчетливо различимы две стадии роста пены как пики скорости на 45 и 90 секундах. Возникновение двустадийного роста металлической пены согласуется с ранее полученными результатами исследований распада газообразующего реагента.

В заключении приведены основные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в рамках выполненной работы.

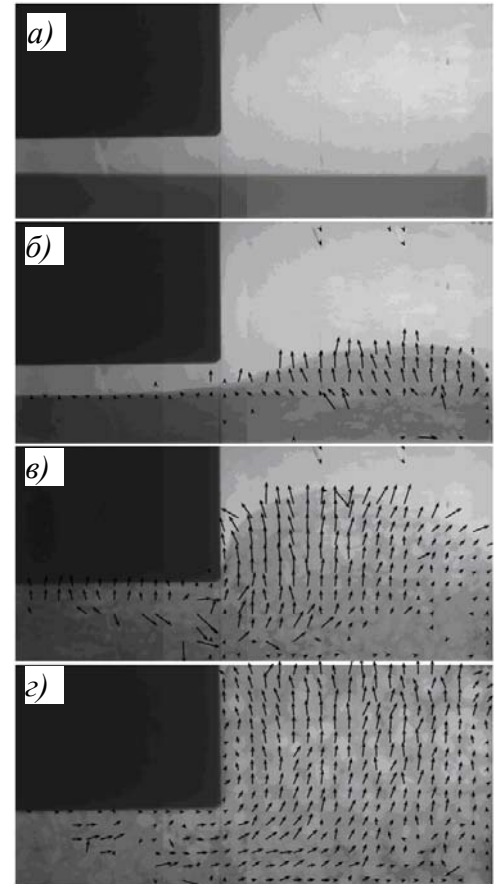


Рис. 10. Поле скоростей процесса пенообразования в стальной литейной форме: а – 0 с; б – 25 с; в – 37 с; г – 60 с

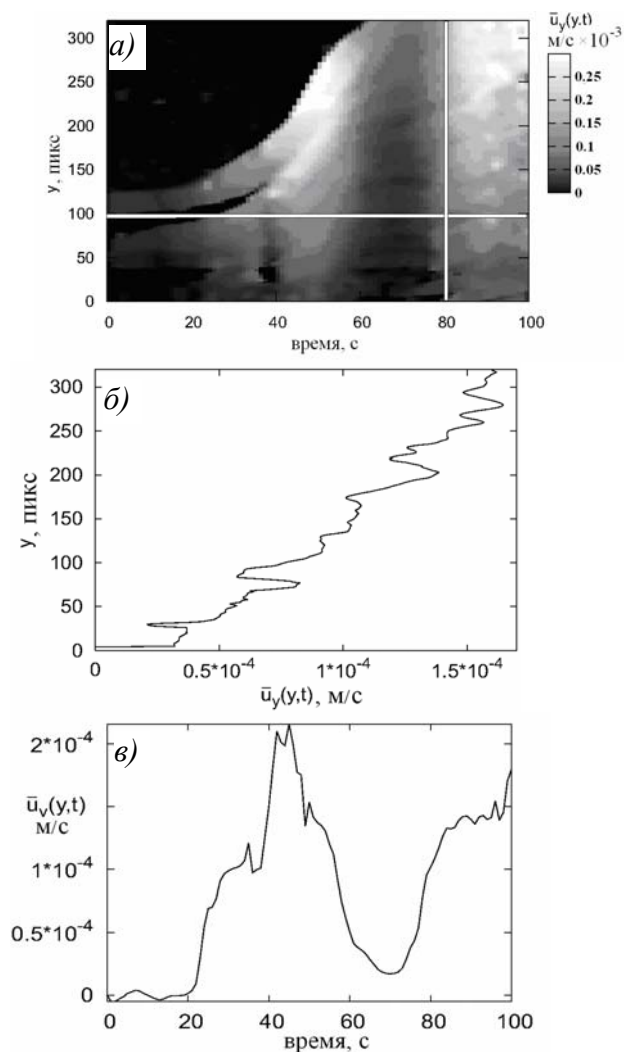


Рис.11. а – распределение средней вертикальной скорости $\bar{u}_y(y,t)$; б, в – профили скорости

числу пленочных разрывов.

2. Разработан метод, позволяющий оценить морфологические параметры пористого материала путем распознавания геометрических примитивов в проекционных изображениях. Метод включает сегментацию контрастных границ с субпиксельной точностью, пиксельное связывание и построение геометрических фигур – окружностей или эллипсов. Численные эксперименты на синтетических радиограммах показали, что ошибка определения координат центра и радиуса окружностей не превышает несколько пикселей. Предложена методика автоматического сбора статистики о критической толщине пенных пленок. Посредством численных экспериментов с реальными радиографическими изображениями было установлено, что критическая толщина на протяжении всего пенообразования не изменяется.
3. Реализован тензорный метод, дополненный интерполяцией векторного поля, для оценки скоростей процесса пенообразования. Достоинством предложенной методики является возможность вычисления скорости на всей

1. Разработан метод автоматического детектирования коалесцентных событий и измерения темпов коалесценции, который базируется на амплитудном анализе и рекурсивном разбиении плоскости изображений. Предложены формальные определения коалесцентного события и темпов коалесценции. Выполнены эксперименты на синтетических изображениях, которые показали, что, в сравнении с разностным, предложенный метод производит точные оценки даже при наличии значительного смещения проекционных структур в последовательных кадрах. Разработанный метод применялся для анализа радиографических последовательностей образования металлических пен, в исходный материал которых примешивались тугоплавкие кремниево-углеродные частицы различных диаметров. Измеренные темпы коалесценции подтвердили, что частицы, размер которых соизмерим с толщиной пенной пленки, уменьшают ее стабильность и приводят к большему

площади кадра. Проведен анализ стабильности пены и потоков материала в стальных литейных формах различного вида. Рассчитано поле скоростей образца, имеющего несколько активных стадий пенообразования. Измеренные характеристики позволяют количественно оценить кинематические параметры формирования пены.

4. Разработанные методы были реализованы несколькими консольными приложениями с использованием языка программирования Си++. Данные программы были введены в практическое использование в Институте синхротронного излучения Исследовательского центра г. Карлсруэ (Германия) и на экспериментальной станции ID19 Европейского центра синхротронного излучения (Гренобль, Франция).

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Мяготин А. В. Расчет векторного поля скоростей формирования металлической пены в радиографических видеопоследовательностях // Автометрия. – 2009. – № 5. – С. 54–58.
2. Мяготин А. В. Тензорный метод как средство анализа процессов пенообразования в проекционных изображениях // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 12. – С. 30–34.
3. Myagotin A., Helfen L., and Baumbach T. Coalescence measurements for evolving foams monitored by real-time projection imaging // Measurement Science and Technology. – 2009. – V. 20, № 5. – P. 055703–055711.

в монографии:

4. Myagotin A. Image processing for radiographic sequences of foaming processes. – Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2009. – 136 p.

в других журналах и изданиях:

5. Köhler B., Baumbach T., and Myagotin A. Verfahren zur zerstörungsfreien Fehlerdiagnose an Verbundbauteilen mit einem Kern aus einem Metall- oder Keramiksschaum. Патентное свидетельство № DE 10 2004 011 566 B3. – 2004.
6. Myagotin A., Helfen L., Banhart J., and Baumbach T. In situ radiography of the metal foaming process: a quantitative analysis. // 3rd Workshop NDT in progress. Proceedings. – Prague: Brno University of Technology, 2005. – P. 223–233.
7. Myagotin A., Helfen L., and Baumbach T. Automated methods for analysis of radiographic image sequences applied to foaming metals // The Korea-Russia Joint Workshop on Signal Transmission, Sensor and Monitoring Systems. Proceedings. – Khabarovsk: PNU, 2006. – P. 76–81.
8. Myagotin A., Helfen L., and Baumbach T. Quantitative inspection of evolving metal foams by X-ray imaging methods // The Joint Russia-China Workshop on Modern Materials and Technologies. Proceedings. V. 2. – Khabarovsk: PNU, 2007. – P. 7–14.
9. Мяготин А. В. Методы цифрового анализа последовательностей проекционных радиографических изображений процесса пенообразования // Информационные и управляющие системы: сб. науч. тр. – Хабаровск: ТОГУ. – 2008. – С. 123–133.