

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ ОТЛИВОК

Князев С.В.¹, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного
производства (krookia@mail.ru)

Скопич Д.В.², директор (skdv@mail.ru)

Фатьянова Е.А.², инженер

Усольцев А.А.¹, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного
производства (usa_60@mail.ru)

Куценко А.И.¹, к.т.н., начальник управления научных исследований (aik_mail@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² ООО «Индас Холдинг»
(654000, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Суворова, 2)

Аннотация. Внедрение «Автоматизированной системы пооперационного контроля производства отливок (АС ПКПО)» является основой комплексной автоматизированной системы управления производством (АСУП). Она выполняет три основные задачи: контроля и учета (хода производства, изделий, материалов и пр.), повышения качества литья и оперативного управления технологическими процессами. Решение этих задач было выполнено за счет автоматизации сбора данных в реальном времени по всем производственным операциям, учета материальных потоков, создания оперативных каналов связи, а также централизованного сбора, обработки и представления данных сервером технологической информации. Следующим этапом в построении эффективной АСУП является стабилизация качества продукции при изменении внешних условий, например, качества материалов, и оптимизации производства (изменение технологии с целью снижения себестоимости при неизменном или более высоком качестве продукции). Второй этап основан на математической обработке и анализе данных, поступающих от АС ПКПО, позволяет определить оптимальные диапазоны параметров технологических процессов – «Автоматизированная система оптимизации и анализа хода производства (АС ОАХП)». АС ОАХП состоит из двух подсистем: анализа качества и управления технологией. Первая решает задачи анализа данных и моделирования, вторая – расчета в реальном времени оптимальных параметров процессов и прогнозирования. Задачи этапов конкурируют за доступ к разным аппаратным ресурсам. Наиболее критичным параметром для АС ПКПО является производительность дисковых массивов сервера, для АС ОАХП – производительность процессора. В том и другом случаях масштабирование системы эффективно решается за счет распараллеливания операций по разным серверам, образующим кластер, и по разным процессорам (ядрам) на одном сервере. Для обработки изображений дефектов и получения причинно-следственных характеристик можно воспользоваться программным пакетом OpenCV, который представляет собой библиотеку компьютерного зрения с открытым исходным кодом. В процессе обработки использовались оператор Собеля, фильтр Гаусса и бинаризация. В основе их лежит обработка пикселей с помощью матриц. Операции над пикселями независимы и могут выполняться параллельно. Задача кластеризации сводится к определению экспертным способом или с использованием различных математических алгоритмов принадлежности дефектов по совокупности значений зависимых факторов к определенному кластеру (блоку данных). Таким образом формируются блоки данных по критерию причины дефекта. Вычисление блока данных, к которому принадлежит дефект изделия, может оказаться весьма ресурсоемкой операцией. Для повышения эффективности систем распознавания образов и распараллеливания операций поиска имеет смысл размещение кластеров данных на разных серверах. В итоге возникает необходимость в распределенной базе данных. Это особый класс СУБД, для которого необходимо соответствующее программное обеспечение. Создание АС ОАХП на основе многоузлового кластера с установленной СУБД ApacheCassandra и использование на каждом узле видеокарт компании Nvidia, поддерживающих технологию CUDA, будет являться наиболее дешевым и эффективным решением. Видеокарты выбираются исходя из необходимого количества графических процессоров на узле.

Ключевые слова: отливка, процесс, дефекты, контроль, автоматизация, прогнозирование, моделирование, управление.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-134-140

Достоверный результат оценки состояния производственного процесса литья с точки зрения выявления причин литейно-технологических дефектов и выработки мероприятий, направленных на их устранение, может быть получен при системном анализе качества отливок [1 – 3].

Для сбора данных о поверхностных дефектах отливок разработана формализованная методика, которая существенно упрощает процесс технического контроля и позволяет организовывать ввод результатов в ЭВМ в режиме диалога. При этом решается задача, практически исключая влияние субъективного восприя-

тия оператора-контролера на оценку признаков литейно-технологических дефектов как на качественном, так и на количественном уровнях [1 – 3].

Характер и размеры поверхностных дефектов не позволяют адекватно судить о наличии и размерах внутренних дефектов отливок и тем самым об общем уровне дефектности отливок.

Для неразрушающего контроля внутренних литейно-технологических дефектов наиболее информативным, на наш взгляд, является радиационный сканирующий интроскоп-томограф [4 – 11].

Путем предварительных экспериментов были подобраны режим и геометрия просвечивания. Приведенные снимки (рис. 1) получены при скорости 1,1 см/с, усреднением 4 и с увеличением примерно в 4 раза. Это увеличение достигалось тем, что расстояние от фокуса до средней плоскости образца равно 780 мм, а от фокуса до линейки 3080 мм. Необходимость увеличения связана с тем, что из-за относительно больших размеров детектора линейка имеет плохое пространственное разрешение. Увеличение фокусного расстояния до линейки в 4 раза приводит к тому, что каждый скантillator «видит» элементарную площадку образца с его размерами, уменьшенными тоже в 4 раза, т.е. 1,0×1,5 мм. Максимальная толщина фрагмента стальной отливки – до 300 мм. На сканирование образца требовалось до 20 с, экспозиция боковой рамы полностью заняла бы 2,0 мин.

Сканирующий радиационный интроскоп-томограф позволяет решить проблему сплошного неразрушающего контроля ответственного пространственно-сложного литья с достижением следующих параметров (для толщин изделий по стали 300 мм): контрастная чувствительность 1 %; разрешающая способность 0,1 мм; скорость сканирования 25 мм/с при обработке изображения в реальном времени.

Контроль сложного литья с помощью радиационных интроскопов сканирующего типа легче других поддается автоматизации. В Томском политехническом университете есть опыт разработки подобного оборудования и программного обеспечения к нему [5 – 11].

Внедрение «Автоматизированной системы пооперационного контроля производства отливок (АС ПКПО)» в Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» показало, что данная система позволила на порядок снизить брак отливок и себестоимость продукции производства крупного вагонного литья. В основном, это было обусловлено полным оперативным контролем хода производства и соблюдения персоналом технологических инструкций, а также снижением влияния человеческого фактора [1, 3].

АС ПКПО является первым этапом и основой комплексной автоматизированной системы управления производством (АСУП). Она выполняет три основные задачи: контроля и учета (хода производства, изделий, материалов и пр.), повышения качества литья и оперативного управления технологическими процессами. Решение этих задач было выполнено за счет автоматизации сбора данных в реальном времени по всем производственным операциям, учета материальных потоков, создания оперативных каналов связи, а также централизованного сбора, обработки и представления данных сервером технологической информации.

Вторым этапом в построении эффективной АСУП решаются задачи стабилизации качества продукции при изменении внешних условий, например, качества материалов, и оптимизации производства (изменение технологии с целью снижения себестоимости при неизменном или более высоком качестве продукции). Второй этап основан на математической обработке и анализе данных, поступающих от АС ПКПО, позволяет определить оптимальные диапазоны параметров технологических процессов – «Автоматизированная система оптимизации и анализа хода производства (АС ОАХП)».

Последняя включает в себя две подсистемы: анализа качества (ПАК) и управления технологией (ПУТ). Первая решает задачи анализа данных и моделирования, вторая – расчета в реальном времени оптимальных параметров процессов и прогнозирования.

Задачи первого и второго этапов конкурируют за доступ к разным аппаратным ресурсам. Наиболее

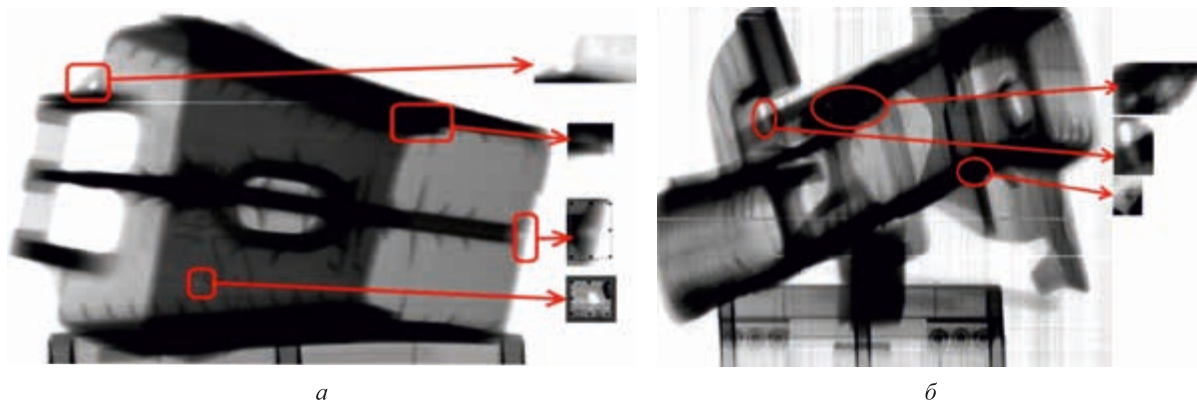


Рис. 1. Фрагменты надрессорной балки (а) и боковой рамы (б)

Fig. 1. Fragments of a bolster (a) and a solebar (b)

критичным параметром для АС ПКПО является производительность дисковых массивов сервера, для АС ОАХП – производительность процессора. В том и другом случаях масштабирование системы эффективно решается за счет распараллеливания операций по разным серверам, образующим кластер, и по разным процессорам (ядрам) на одном сервере.

Построение кластерных систем и выполнение параллельных вычислений требуют соответствующего программного и аппаратного обеспечения, а также особых подходов к обработке и хранению распределенных данных.

Рассмотрим практические расчетные задачи, востребованные в литейном производстве для управления качеством продукции, в частности, анализ дефектности отливок для снижения брака на примере газовой раковины. Анализ выполняется для выявления и устранения причин возникновения дефекта, или определения безопасных диапазонов параметров технологических процессов, влияющих на образование газовой раковины. Данная задача выполняется в модуле ПАК АС ОАХП.

Существует множество факторов дефектности. Например, поверхностное содержание влаги в форме или стержне, повышенное содержание в металле газов и другие факторы. В научной литературе подробно рассмотрены различные типы дефектов и причины их возникновения, представлено дерево анализа дефектов. Выявить причину дефекта можно на основе геометрических размеров газовой раковины и ее положения на изделии [12 – 14]. На практике приходится дополнительно анализировать всю историю изделий одной плавки и их химический состав.

При большом потоке изделий вводить в АС ОАХП данные по каждому дефекту вручную довольно сложно, это может снизить производительность. По возможности необходимо автоматизировать процессы. Для примера покажем, как автоматически по фотографии определить геометрические размеры газовой раковины.

Для обработки изображений дефектов и получения причинно-следственных характеристик можно воспользоваться программным пакетом OpenCV, который представляет собой библиотеку компьютерного зрения

с открытым исходным кодом. Ниже показан пример обработки такого изображения. На рис. 2, *а* представлена черно-белая фотография газовой раковины на поверхности металла.

Выделим границы объектов на изображении с помощью оператора Собеля. Оператор основан на вычислении градиента яркости по разным направлениям в каждой точке изображения и показывает, насколько резко или плавно меняется яркость, а значит вероятность нахождения точки на грани и ориентацию грани. С использованием разности градиентов можно получить изображение с высоким значением горизонтального градиента и низким значением вертикального (рис. 2, *б*), что дает более ровную структуру металла с сохранением границ дефекта.

Следующим шагом избавляемся от высокочастотного шума с помощью фильтра Гаусса (рис. 3, *а*), который дает определенную размытость изображению. Далее проводим бинаризацию пикселей с определенным пороговым значением и получаем образ дефекта на белом фоне (рис. 3, *б*). Далее запускаем процедуру поиска овальных или прямоугольных контуров на полученном изображении. На рис. 4 показан найденный контур, перенесенный на исходное изображение дефекта.

По найденному контуру можно произвести расчет необходимых параметров дефекта. Например, длину граней и диагонали прямоугольной области, по которым можно определить форму и размер газовой раковины. Далее, имея решающее дерево причинно-следственных связей, можно в первом приближении определить причину дефекта.

В процессе обработки использовались оператор Собеля, фильтр Гаусса и бинаризация. В основе их лежит обработка пикселей с помощью матриц. Операции над пикселями независимы и могут выполняться параллельно. Для этого необходимо представить изображение дефекта в виде массива градаций яркости серого цвета и разбить его на определенное количество блоков. Каждый блок обрабатывается одним потоком процессора.

С помощью распределенных вычислений на разных узлах кластера можно снизить нагрузку на сервере

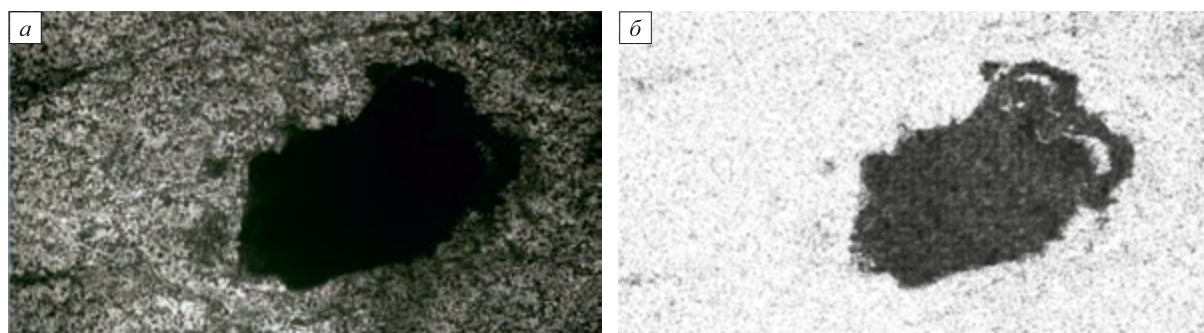


Рис. 2. Исходное изображение дефекта (*а*) и его обработка оператором Собеля (*б*)

Fig. 2. Original image of a defect (*a*) and its processing by Sobel operator (*b*)

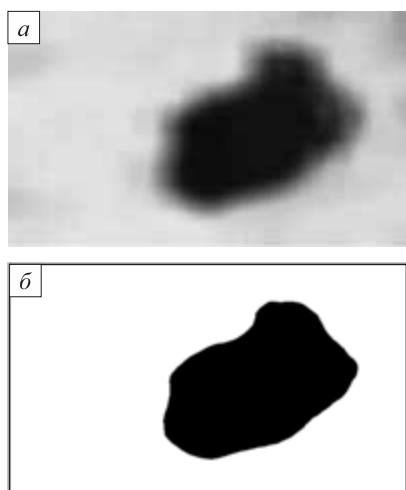


Рис. 3. Наложение фильтра Гаусса (а) и бинаризация изображения (б)

Fig. 3. Gaussian filter application (a) and image binarization (b)

ры, распределив ее по разным компьютерам. При этом эффект увеличения скорости обработки данных можно получить лишь на задачах, связанных с большими вычислениями, в которых время синхронизации данных между узлами кластера незначительно по сравнению с временем самих вычислений. Проблема заключается в пропускной способности каналов связи внутри кластера. Поэтому обработку изображений целесообразно выполнять локально на одном сервере, распределив нагрузку между процессорами и их ядрами. Существует относительно дешевый способ создания многопроцессорных систем – использование графических процессоров видеокарт [15 – 18].

В 2007 г. компания Nvidia представила технологию CUDA для своих видеокарт, позволяющую писать модули программ для выполнения вычислений на графических процессорах. Так, например, видеокарта GeForce GTX 1080 имеет в своем составе 2560 графических процессоров с частотой 1607 МГц и объем памяти 8 Гб. Если оснастить каждый сервер кластера системы такой видеокартой и обеспечить равномерную загрузку узлов кластера обрабатываемыми изображениями, можно получить большой выигрыш в скорости и оптимизировать загрузку центральных процессоров серверов кластера.

На наличие дефектов в структуре отливок может влиять множество различных факторов, которые выявляются на основе статистического анализа данных. АС ПКПО хранит историю, значение таких факторов и дефектность по каждому изделию и группе изделий одной плавки. Одним из способов определения причины дефекта является кластеризация данных АС ПКПО и определение принадлежности дефекта тому или иному кластеру на основе алгоритмов распознавания образов, используя, например, расстояния Евклида.

Задача кластеризации сводится к определению экспертным способом или с использованием различных

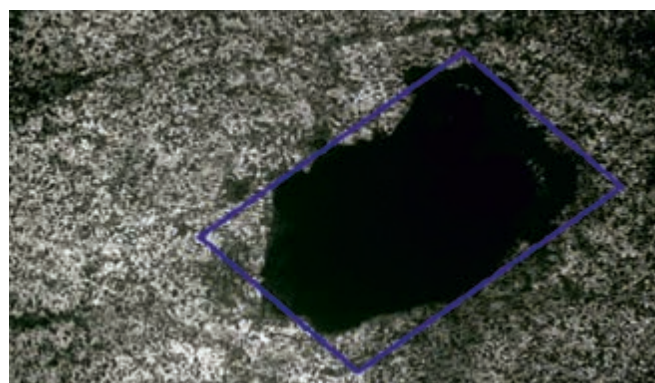


Рис. 4. Наложение контура на дефект

Fig. 4. Contour imposing on the defect

математических алгоритмов принадлежности дефектов по совокупности значений зависимых факторов к определенному кластеру (блоку данных). Таким образом формируются блоки данных по критерию причины дефекта.

Вычисление блока данных, к которому принадлежит дефект изделия, может оказаться весьма ресурсоемкой операцией. Для повышения эффективности систем распознавания образов и распараллеливания операций поиска имеет смысл размещение кластеров данных на разных серверах. В итоге возникает необходимость в распределенной базе данных. Это особый класс СУБД, для которого необходимо соответствующее программное обеспечение. Остановимся на выборе распределенной СУБД.

Для распределенных систем хранения в начале 2000 годов профессором Калифорнийского университета в Беркли Эриком Брюером была сформулирована теорема CAP, в которой утверждается, что для любой реализации распределенных вычислений возможно обеспечить не более двух из трех ее свойств:

- согласованность данных (consistency, C) – данные на разных узлах в один момент времени не противоречат друг другу (другими словами – «целостность данных»);

- доступность (availability, A) – любой запрос к распределенной системе (к любому узлу) завершается корректным образом;

- устойчивость к разделению (partitiontolerance, P) – разделение распределенной системы на несколько изолированных секций не приводит к некорректности отклика от каждой секции (другими словами – система должна корректно обрабатывать асинхронные запросы).

Современные сети связи основаны на асинхронных запросах, поэтому остается выбирать между согласованностью и доступностью данных из так называемых систем CP и AP. И по большому счету это выбор между реляционными и NoSQL СУБД. Популярность NoSQL-решений растет. Основное преимущество таких систем заключается в более высокой скорости и гибкости рабо-

ты с данными за счет обхода механизма согласованности и SQL синтаксиса.

Существует несколько разновидностей NoSQL систем:

- хранилище «ключ–значение» – простейший вид хранилища данных, использующий ключ для доступа к значению;

- хранилище семейств колонок–данные хранятся в виде разряженной матрицы, строки и столбцы которой используются в качестве ключей;

- документно-ориентированная СУБД, используемая для хранения структур данных, доступных по ключу;

- базы данных на основе графов, применяемые в задачах с большим количеством связей между данными.

К числу систем NoSQL с семейством колонок относится база данных Apache Cassandra. Она разрабатывалась в Facebook до 2008 г., затем была выпущена в качестве open-source проекта, в 2009 г. стала одним из проектов Apache Software Foundation. В настоящее время используется в системах компаний Cisco, IBM, Apple, Twitter и др. Известны реализации кластерных систем, включающих 400 и более узлов СУБД Cassandra.

Cassandra – высоко доступная СУБД, обладающая рядом свойств, которые выгодно отличают ее от своих конкурентов:

- узлы кластера равноправны и легко настраиваются;
- данные кэшируются в памяти, обеспечивая высокую скорость записи (соизмеримой с чтением) и чтения данных;

- обеспечивается линейная масштабируемость (скорость операций чтения/записи) от количества узлов кластера;

- имеется SQL-подобный язык запросов;
- есть возможность устанавливать уровень согласованности и время жизни данных;

- написана на Java;

- является open-source проектом.

Конкретное значение, хранимое в Apache Cassandra, идентифицируется ключом, определяемым:

- пространством ключей – идентифицирующим приложение (схему, базу);

- колоночным семейством – аналог таблицы в реляционных СУБД;

- именем колонки – блок данных в семействе;

- ключом – идентифицирует узел кластера.

СУБД Apache Cassandra позволяет определять стратегию распределения данных по узлам кластера на основе ключей. Первая стратегия распределения – случайный разметчик – распределяет данные на основе хэш-значения ключа; вторая – порядковый разметчик – распределяет данные по диапазонам битовых значений ключа. Таким образом, можно гибко распределять различные блоки данных по узлам кластера системы, обеспечивая высокую их доступность [19 – 21].

Выводы. Создание АС ОАХП на основе многоузлового кластера с установленной СУБД Apache Cassandra

и использование на каждом узле видеокарт компании Nvidia, поддерживающих технологию CUDA, будет являться наиболее дешевым и эффективным решением. Видеокарты выбираются исходя из необходимого количества графических процессоров на узле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V., Fatyanova E.A., Dolgoplov A.E. Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1 – 5 (012039).
2. Antipenko V.I., Knyazev S.V. Diagnostics of steel castings production with the aid of technological pilot samples. Soviet Castings Technology (English Translation of Liteinoe Proizvodstvo). 1987. No. 7. P. 34.
3. Князев С.В., Скопич Д.В., Фатьянова Е.А., Усольцев А.А., Куценко А.И. Ключевые показатели качества стали литых изделий для железнодорожного транспорта // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. № 2. С. 128 – 132.
4. Cheprasov A.I., Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Dolgoplov A.E., Mamedov R.O. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1 – 5 (012026).
5. Штейн А.М., Чепрасов А.И., Клименов В.А. и др. Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства // Изв. вуз. Физика. 2013. Т. 56. № 1-2. С. 267 – 270.
6. Волченков Н., Моисеенков В., Сургаева Е. Стальное литье и методы повышения качества // ИЦМ «Исследовательский центр Модификатор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.modifikator.ru/articles/volchenkov.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 08.02.19 г.).
7. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Проблемы обеспечения качества литых деталей грузовых вагонов // Техника железных дорог. 2010. № 3. С. 70 – 75.
8. Москалев В.А., Чахлов В.Л. Бетатроны. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 267 с.
9. Клименов В.А., Алхимов Ю.В., Штейн А.М., Касьянов С.В., Бабиков С.А., Батрагин А.В., Осипов С.П. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции // Контроль. Диагностика. 2013. № 13. С. 31 – 42.
10. Klimentov V., Osipov S., Shtein A., Ovchinnikov A., Ustinov A., Danilov A. Investigations and non-destructive testing in new building design // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 671. No. 1. P. 012 – 027.
11. Копаница Д.Г., Тамразян А.Г., Усеинов Э.С., Рыбак Я. Экспериментальные исследования стыков железобетонных конструкций на обжимных муфтах неразрушающими методами контроля // Изв. вуз. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 332 – 337.
12. Чернышов Е.А., Евстигнеев А.И., Евлампиев А.А. Литейные дефекты. Причины образования. Способы предупреждения и исправления. – М.: Машиностроение, 2008. – 282 с.
13. Воронин Ю.Ф., Воронин С.Ю. О повышении качества и надежности железнодорожной отливки рама боковая // Литейное производство. 2012. № 5. С. 13 – 15.
14. Voronin Y.F., Kamaev V.A., Matokhina A.V., Karpov S.A. Computer-aided determination of defects, causes of their origination and elimination method // Foundry. 2004. No 7. P. 17 – 24.
15. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен / Пер. с англ. Г.Г. Вайнштейна, А.М. Васильковского. – М.: Мир, 1976. С. 271, 272.
16. Dawson-Howe K. A Practical Introduction to Computer Vision with OpenCV (Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology). – Wiley, 2014. – 234 p.

17. Learning Image Processing with OpenCV / Bueno Garcia G., Suarez O.D., Espinosa Aranda J. L., Salido Tercero J., Serrano Gracia I. – Packt Publishing, 2015. – 232 p.
18. Howse J. OpenCV for Secret Agents. – Packt Publishing, 2015. – 302 p.
19. Brewer Eric A. A certain freedom: Thoughts on the CAP Theorem // Proceeding of the XXIX ACM SIGACT-SIGOPS symposium on Principles of distributed computing. – N.Y.: ACM, 2010. Iss. 29. No. 1. P. 335, 336.
20. Rys Michael. Scalable SQL. How do large-scale sites and applications remain SQL-based?// Communications of the ACM. 2011. Vol. 54. No. 6. P. 48 – 53.
21. Карпентер Дж., Хевит Э. Cassandra. Полное руководство = Cassandra: The Definitive Guide. – ДМК-Пресс, 2016. – 400 с.

Поступила в редакцию 2 февраля 2018 г.

После доработки 21 февраля 2018 г.

Принята к публикации 26 марта 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 2, pp. 134–140.

SOFTWARE AND HARDWARE AUTOMATED SYSTEM OF CASTS DEFECTS NON-DESTRUCTIVE MONITORING

*S.V. Knyazev¹, D.V. Skopich², E.A. Fat'yanova²,
A.A. Usol'tsev¹, A.I. Kutsenko¹*

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² INDUS Holding LLC, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Keywords: cast, process, defects, control, automation, prediction, modeling, management.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-134-140

REFERENCES

- Abstract.** Introduction of the “Automated system for operational control of casts production (OCCP AS)” makes the basis of an integrated automated production control system (APCS). It performs three main tasks: control and recording (production, products, materials, etc.), improving quality of casts and operational management of technological processes. Solution of these tasks was accomplished through automating data collection in real time for all production operations, recording material flows, creating operational communication channels, as well as centralized collection, processing and representation of data by the process information server. The next step in building an effective automated control system is to stabilize product quality in changing external conditions, for example, quality of materials, and to optimize production (technology change in order to reduce costs for constant or higher product quality). The second stage is based on mathematical processing and analysis of data coming from OCCP AS, it allows to determine optimal ranges of parameters of technological processes – “Automated system for optimization and analysis of production progress (OAPP AS)”. OAPP AS consists of two subsystems: quality analysis and technology management. The first solves the problem of data analysis and modeling, the second – calculation of real-time optimal process parameters and real time prediction. The stages tasks compete for access to different hardware resources. The most critical parameter for OCCP AS is performance of server disk arrays, for OAPP AS it is processor performance. In either case, system scaling is effectively solved by parallelizing operations across different servers, forming a cluster, and across different processors (cores) on the same server. To process defect images and to obtain cause-and-effect characteristics, you can use OpenCV software package, which is an open source computer vision library. In course of processing, Sobel operator, Gauss filter and binarization were used. They are based on processing pixels using matrices. Operations on pixels are independent and can be performed in parallel. The task of clustering is reduced to definition of an expert method or using various mathematical algorithms for defects belonging to a specific cluster (data block) through a set of values of dependent factors. Thus, data blocks are formed by the criterion of the defect cause. Calculation of a data block to which a product defect belongs can be very resource-intensive operation. To increase efficiency of image recognition systems and parallelization of search operations, it makes sense to place data clusters on different servers. As a result, there is a need for a distributed database. This is a special class of DBMS, which requires appropriate software. Generation of OAPP AS based on a multi-node cluster with ApacheCassandra DBMS installed and using Nvidia video cards supporting CUDA technology on each node will be the cheapest and most effective solution. Video card is selected based on required number of graphics processors on the node.
1. Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V., Fatyanova E.A., Dolgoplov A.E. Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 1–5 (012039).
 2. Antipenko V.I., Knyazev S.V. Diagnostics of steel castings production with the aid of technological pilot samples. *Soviet Castings Technology* (English Translation of Liteinoye Proizvodstvo). 1987, no. 7, pp. 34.
 3. Knyazev S.V., Skopich D.V., Fat'yanova E.A., Usol'tsev A.A., Kutsenko A.I. Key indicators of steel quality of cast products for railway transport. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, no. 2, pp. 128–132. (In Russ.).
 4. Cheprasov A.I., Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Dolgoplov A.E., Mamedov R.O. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 1–5 (012026).
 5. Shtein A.M., Cheprasov A.I., Klimentov V.A. etc. Continuous monitoring of large-size foundry products. *Izv. vuz. Fizika*. 2013, vol. 56, no. 1-2, pp. 267–270. (In Russ.).
 6. Steel casting and quality improvement methods. *Issledovatel'skii tsentr Modifikator*. Electronic resource. Available at URL: <http://www.modifikator.ru/articles/volchenkov.html>. – Title from the screen.
 7. Voronin Yu.F., Kamaev V.A. Problems of quality assurance of freight railcars cast parts. *Tekhnika zheleznykh dorog*. 2010, no. 3, pp. 70–75. (In Russ.).
 8. Moskalev V.A., Chakhlov V.L. *Betatrony* [Betatrons]. Tomsk: Izdvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009, 267 p. (In Russ.).
 9. Klimentov V.A., Alkhimov Yu.V., Shtein A.M., Kas'yanov S.V., Babikov S.A., Batranin A.V., Osipov S.P. Application and development of digital radiography methods for technical diagnostics in non-destructive testing and inspection. *Kontrol'. Diagnostika*. 2013, no. 13, pp. 31–42. (In Russ.).
 10. Klimentov V., Osipov S., Shtein A., Ovchinnikov A., Ustinov A., Danilov A. Investigations and non-destructive testing in new building design. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016, vol. 671, no. 1, pp. 012–027.
 11. Kopanitsa D.G., Tamrazyan A.G., Useinov E.S., Rybak Ya. Experimental studies of joints of reinforced concrete structures on crimp couplings by non-destructive control methods. *Izv. vuz. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2017, no. 4 (370), pp. 332–337. (In Russ.).

12. Chernyshov E.A., Evstigneev A.I., Evlampiev A.A. *Liteinye defekty. Prichiny obrazovaniya. Sposoby preduprezhdeniya i ispravleniya* [Foundry defects. The reasons of origin. Prevention and correction]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 282 p. (In Russ.).
13. Voronin Yu.F., Voronin S.Yu. On improving quality and reliability of solebar rail cast. *Liteinoe proizvodstvo*. 2012, no. 5, pp. 13–15. (In Russ.).
14. Voronin Y.F., Kamaev V.A., Matokhina A.V., Karpov S.A. Computer-aided determination of defects, causes of their origination and elimination metod. *Foundry*. 2004, no 7, pp. 17–24.
15. Duda Richard O., Hart Peter E. *Pattern classification and scene analysis*. New York: Wiley, 1973, 512 p. (Russ.ed.: Duda R., Hart P. *Raspoznavanie obrazov i analiz stsen*. Moscow: Mir, 1976, pp. 271, 272).
16. Dawson-Howe K. *A practical introduction to computer vision with OpenCV* (Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology). Wiley, 2014, 234 p.
17. Bueno Garcia G., Suarez O.D., Espinosa Aranda J.L., Salido Tercero J., Serrano Gracia I. *Learning image processing with OpenCV*. Packt Publishing, 2015, 232 p.
18. Howse J. *OpenCV for Secret Agents*. Packt Publishing, 2015, 302 p.
19. Brewer Eric A. A certain freedom: Thoughts on the CAP Theorem. *Proceeding of the XXIX ACM SIGACT-SIGOPS symposium on Principles of distributed computing*. N.Y.: ACM, 2010, Issue 29, no. 1, pp. 335, 336.
20. Rys M. Scalable SQL. *Communications of the ACM*. 2011, vol. 54, no. 6, pp. 48 – 53.
21. Karpenter Dzh., Khevit E. *Cassandra. Polnoe rukovodstvo* [Cassandra: The definitive guide]. DMK-Press, 2016, 400 p. (In Russ.)

Information about the authors:

S.V. Knyazev, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production”* (krookia@mail.ru)

D.V. Skopich, *Director* (skdv@mail.ru)

E.A. Fat'yanova, *Engineer*

A.A. Usol'tsev, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production”* (usa_60@mail.ru)

A.I. Kutsenko, *Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Scientific Researches Management* (aik_mail@mail.ru)

Received February 2, 2018

Revised February 21, 2018

Accepted March 26, 2018