



МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО  
И МЕТАЛЛУРГИЯ 2017.  
БЕЛАРУСЬ»



УДК 669-1

Поступила 08.09.2017

## ПРЕДИКТИВНЫЙ АССИСТЕНТ КОТРОЛЯ КАЧЕСТВА МНЛЗ PREDICTIVE ASSISTANT FOR QUALITY CONTROL FOR THE CASTING MACHINE

С. ГОРЯЙНОВ, А. КРАСИЛЬНИКОВ, Др. М. РАЙФФЕРШАЙД, Др. Ш. КЛАНКЕ, SMS group GmbH,  
г. Дюссельдорф, Германия. E-mail: sergey.gorainov@sms-group.com

S. GORAINOV, A. KRASILNIKOV, Dr. M. REIFFERSCHIED, Dr. S. KLANKE, SMS group GmbH,  
Duesseldorf, Germany. E-mail: sergey.gorainov@sms-group.com

Ассистент контроля качества продукции МНЛЗ производит автоматизированную оценку установленных параметров разливки на основе собранных данных о протекании процесса литья и качестве заготовки. Разработанный ассистент занимается обработкой визуальных данных измерений инспекционной системы контроля поверхности литой заготовки. Ассистент производит анализ неровностей профиля, топографии поверхности, а также образовавшихся на поверхности заготовки структур. При разработке ассистента использовались методы машинной обработки изображений, статистических оценок, кластерного анализа связанных компонент при определении значимых характеристик описания поверхности литой заготовки и установления взаимосвязей между параметрами технологического процесса, результатами металлографических исследований, а также оценками качества заготовок. В проведенных экспериментах при использовании регрессионного анализа, метода главных компонент и машинного обучения удалось сформулировать предиктивные (предсказательные) характеристики для улучшения контроля качества выпускаемой продукции. Разработанный ассистент позволяет проверить запланированную динамику изменений либо предложить необходимую коррекцию ключевых параметров разливки. В последующих версиях ассистента рассматривается реализация различных веб-служб для автоматизации контроля качества литой заготовки как на МНЛЗ, так и при прокатке, основанные на едином архиве данных о выпущенной продукции. Ассистент позволяет оценить вероятность появления дефектов заготовки в соответствии с установленными требованиями качества разливки и прокатки стального листа.

The quality assurance predictive assistant for the production process of a casting machine performs an automated evaluation of set process parameters over the recorded process and quality data. The assistant is based on the results of a surface inspection system with respect to the surface patterns, the topography and a roughness analysis of the transverse profile. In this paper approaches of image processing, statistical data analysis and cluster recognition are applied for obtaining characteristic parameters for the description of the plate surfaces in order to support the determination of different interrelations between the collected process data, the metallographic examination results and the assessments of quality assurance. The large variation of different constellations of the setting parameters in the casting process can be substantially reduced by means of the subsequent property analysis of the developed training model. In various experiments with the collected data by means of the regression analysis and further algorithms of the machine learning, predicative statements were formulated about the quality-critical characteristics of the modeled data domain. The pre-planned parameter changes can be checked in advance and corrected at run-time using the accompanying assistant.

**Ключевые слова.** Технологический ассистент, МНЛЗ, компьютерное зрение, обработка изображений, машинное обучение, регрессионный анализ, кластерный анализ, облачные сервисы.

**Keywords.** Technological assistance, casting, computer vision, machine learning, regression analysis, cluster analysis cloud-services.

### Задачи предиктивного ассистента

Для обеспечения контроля процесса непрерывной разливки и соответствия критериям качества выпускаемой продукции современные МНЛЗ оснащаются различного вида сенсорами и измерительными системами. В данной работе исследуются результаты измерений лазерно-оптической инспекционной системы контроля поверхности литой заготовки. В дополнение к результатам измерений для определения взаимосвязей с параметрами технологического процесса в работе использовались значения температуры на поверхности литой заготовки, расхода воды, количества отведенного тепла, изменения профиля.

Металлографическая лаборатория производит регулярную экспертизу продукции. Непосредственно до и после проката заготовок производятся проверки качества продукции. Все найденные дефекты разливки и проката заготовок документируются вместе с собранными данными о производственном процессе, установленными параметрами разливки и данными о химическом анализе расплава. Собранные данные поступают для последующей обработки технологическим ассистентом [GOR-16] контроля качества продукции, дополненном алгоритмами машинного обучения для предсказания критических состояний процесса, ведущих к появлению дефектов. С целью улучшения точности оценки влияния различных параметров разливки на качество продукции ассистент получает данные о проведенных металлографических исследованиях взятых проб.

### *Предсказательная аналитика в производственном процессе*

Концепция предиктивного ассистента основана на сопоставлении а posteriori количества и видов найденных дефектов, статистических оценок результатов измерений и истории изменений параметров разливки. Такой подход, вообще говоря, не предполагает сопровождения производственного процесса в реальном времени, однако по мере накопления знаний о результатах проверок качества продукции ассистент может быть включен в набор функций, делегированных системам автоматизации второго уровня с отложенным временем исполнения (1–4 с), являясь тем самым составным элементом системы управления МНЛЗ (рис. 1).



Рис. 1. Схема включения предиктивного ассистента в систему контроля производства второго уровня:  $u$  – корректировка контроллера;  $y$  – наблюдаемые параметры;  $v$  – помехи измерений;  $x$  – состояние процесса

В качестве реализации подключения системы предсказательной аналитики к системе автоматизации технологического процесса был выбран Web-интерфейс, ориентированный на внутренние либо облачные Web-службы с предопределенными параметрами запросов в соответствии с предоставляемыми сервисами, основанными на адаптируемых предсказательных моделях. В случае полной интеграции в систему автоматизации обмен данными о состоянии процесса и результатами аналитической обработки происходит в автоматическом режиме и включает в себя, в том числе ре-трейнинг развернутых моделей.

### *Технологическая поддержка систем Condition Monitoring*

Разрабатываемые в настоящее время системы контроля за техническим состоянием оборудования предполагают использование предсказательной аналитики с целью предоставления персоналу краткосрочных и долгосрочных прогнозов работоспособности заменяемых агрегатов на основе статистических показателей износа оборудования и результатов измерений развернутых сенсорных сетей для отслеживания изменений в работе каждого отдельно взятого агрегата и узла.

В основе концепции встроенной технологической поддержки такого рода систем за счет включения в цепочку обработки данных математических моделей технологического процесса лежит использование статистических данных результатов измерений систем контроля качества продукции, а также результатов металлографических исследований проб заготовок.

Ориентированный в первую очередь на соблюдение технологических свойств и параметров выпускаемой продукции предиктивный ассистент производит поиск критических состояний процесса разливки на основе собранных данных, актуальной программы разливки, а также данных, отражающих текущее состояние оборудования.



Рис. 2. Развертывание системы технологической поддержки процесса

Реализация технологической поддержки систем технического обслуживания МНЛЗ развертывается на трех уровнях (рис. 2):

1. Локальный, предполагает наличие инспекционной / измерительной системы отслеживания наблюдаемых свойств литой заготовки (изменения уровня расплава в кристаллизаторе, подвисание, изменения температур на поверхности кристаллизатора, температур на поверхности заготовки, изменение геометрии формата либо поверхности заготовки, выпячивание либо провисание корки заготовки).

2. Сервер приложений обеспечивает обработку полученных данных измерительных систем, сопровождая процесс разливки в мягком режиме реального времени. Приложения обработки результатов измерений второго уровня предоставляют подготовленные данные о процессе разливки и выявленных дефектах литой заготовки для систем предсказательной аналитики.

3. Сервер интеллектуальной обработки статистических результатов измерений обеспечивает дальнейшую обработку информации с целью выявления критических состояний процесса разливки, а также прогнозирования результатов контроля качества в зависимости от установленных параметров процесса разливки.

Предложенная архитектура системы поддержки может быть расширена горизонтально (с точки зрения увеличения расчетной мощности при анализе больших объемов статистических данных) и вертикально (с точки зрения модульности приложений обработки данных полученных измерений, также при установке новых измерительных систем и добавления новых служб предсказательной аналитики).

В перечень основных запросов для предиктивной поддержки процесса разливки на МНЛЗ относятся: оценка, оптимизация и мониторинг изменения параметров разливки, проверка гипотез возникновения дефектов, классификация, обнаружение критических состояний процесса, оценка, классификация качественных свойств заготовок.

### Инспекционная система контроля качества поверхности заготовки

В данной работе рассматриваются результаты обработки измерений лазерно-оптической системы контроля поверхности литой заготовки, установленной на МНЛЗ. Исследования проводили, основываясь на полученных 2D- и 3D-фотоизображениях поверхности. 3D-изображения представляют собой карту распределения по поверхности отклонений высоты профиля от нулевого референтного значения. При помощи коротковолнового лазера измеряется точное расстояние до поверхности слитка. На основе этих измерений вычисляются параметры фокусировки камеры и источника освещения. Система камер производит фотосъемку освещенной зоны с точным распределением высот по поверхности слитка [S.-06]. Результатом фотосъемки выступает 3D-карта распределения высот, каждый пиксель которой представляет собой одно значение высоты профиля в этой точке. Разрешение картинки – 2048×5000 пикселей на один погонный метр поверхности заготовки. Суммарный объем памяти, необходимый для хранения информации об одной разливке, составляет в среднем 25–30 GB.

### Методы компьютерного зрения для обработки изображений

При подготовке данных на основе изображений поверхности заготовки для последующего статистического анализа пройденных состояний и вариаций параметров процесса разливки была поставлена

цель – сформулировать признаки качественных изменений структуры поверхности различного рода, т. е. не обязательно связанных между собой. Так, появление выделяющихся глубоких впадин или выступов на профиле поверхности вообще говоря не является причиной изменения частоты или глубины неровностей на линии профиля и лишь ограниченно свидетельствует о появлении крупных либо мелких образований, их распределении и ориентации на плоскости литой заготовки.

Следующей целью компьютерного анализа изображений являлось выделение признаков и формулирование гипотез о причинах возникновения обнаруженных изменений на основе собранных данных о протекании процесса разлива в целом, нахождении «безопасных» зон варьирования параметров, не приводящих к резким переходам в изменении структуры поверхности заготовки.

### Оценки шероховатости и волнистости профиля заготовки

В методике измерений волнистости и шероховатости профиля поверхности сформулированы определения шести порядков возможных отклонений от заданного идеального профиля. В данном исследовании рассматривались первые три вида: отклонения от формы, волнистость, а также локальная шероховатость профиля. Целью исследований являлось определение показательных свойств для описания равномерности, геометрической правильности, волнистости поверхности, а также качественное и количественное описание образовавшихся на поверхности структур.

В качестве предварительной обработки снятых изображений применяли одномерные (при оценке профиля) и двумерные (топография, кластеризация) фильтры для исключения ошибок измерений. В случаях топографического и кластерного анализов поверхности применяли сглаживающий фильтр вариации высоты профиля поверхности. При помощи алгоритма локальной полиномиальной регрессии [CLE-88] профиль локальных неровностей и шероховатости был отделен от волновой составляющей. При исследовании характеристик шероховатости выделенный профиль рассматривался как асимметрическая и апериодическая функция с базовой длиной, равной 5/6 общей ширины исследуемого профиля. Такое допущение подтверждается статистическими данными исследуемых профилей в соответствии с методом определения базовой длины для асимметрического профиля.

Для каждого полученного изображения проводили селекцию профилей изменения высоты по всей ширине заготовки с отступлением 1/12 от каждого края для уменьшения влияния приграничных регионов поверхности. Для каждого исследуемого профиля были рассчитаны арифметическое среднее шероховатости, максимальная величина вариаций профиля, средняя глубина гладкости, средняя ширина канавок, распределение материала по поверхности. Усредненные значения полученных свойств каждого отдельного профиля привязывались к номеру отлитой заготовки для сопоставления с собранными данными процесса разлива, а также сравнения результатов измерений других систем контроля качества заготовки.

Характеристические свойства шероховатости профиля заготовки приведены на рис. 3:

- $R_a$  – арифметическое среднее значений отклонений профиля в пределах базовой длины;
- $R_{max}$  – наибольшая высота профиля;

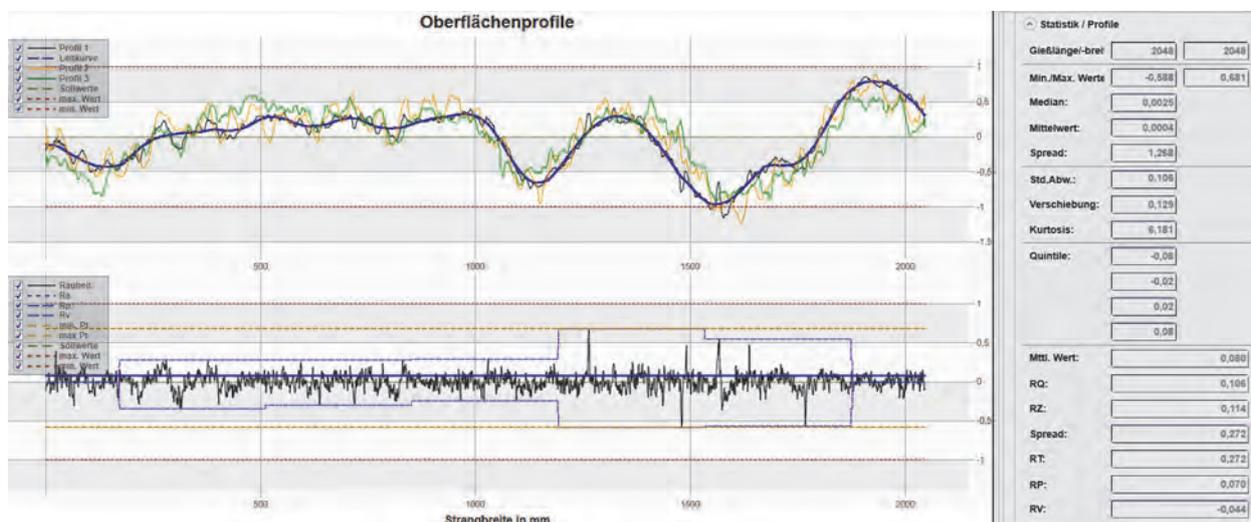


Рис. 3. Определение свойств шероховатости профиля поверхности заготовки

- $R_z$  – сумма средних значений высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины;
- $P_t$  – итоговая величина разброса значений шероховатости профиля;
- $W_t$  – наибольшая амплитуда волны профиля.

### Топография поверхности заготовки

Рассмотренные в экспериментах поверхности заготовок имеют, как правило, регулярную структуру, определяемую параметрами разлива и химическим составом стали. Структура поверхности несколько искривлена. Величина искривления обусловлена размерами и ориентацией крупных впадин и выступов, образовавшихся за короткий отрезок времени затвердевания корки заготовки. Поверхность является комбинацией шероховатости и волнистости, изменяющейся при аperiodичном образовании макроструктур (рис. 4).

Для оценки величины ошибок измерений проводили анализ распределения значений по заданным классам толерантности:

- I. Нижняя граница ошибки измерений.
- II. Нижняя граница толерантности.
- III. Интервал допустимых значений.
- IV. Верхняя граница толерантности.
- V. Верхняя граница ошибки измерений.

В соответствии с нормальным распределением отклонений подавляющая часть всех полученных данных принадлежит II, III, IV классам. Процентная составляющая количества полученных величин, по-

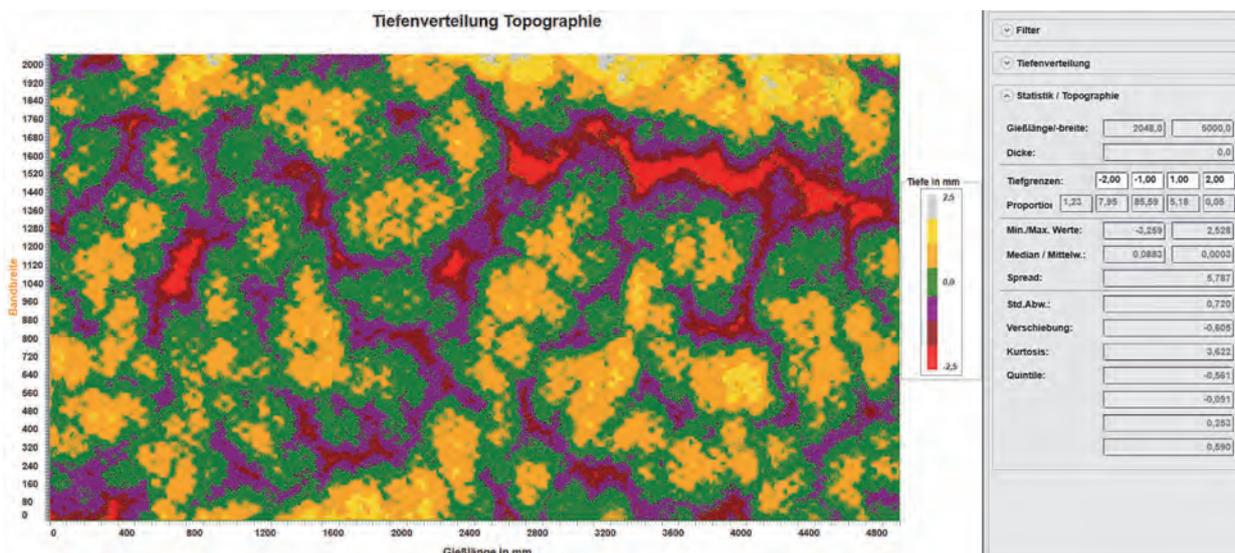


Рис. 4. Карта распределения высот профиля заготовки и уровни толерантности величин

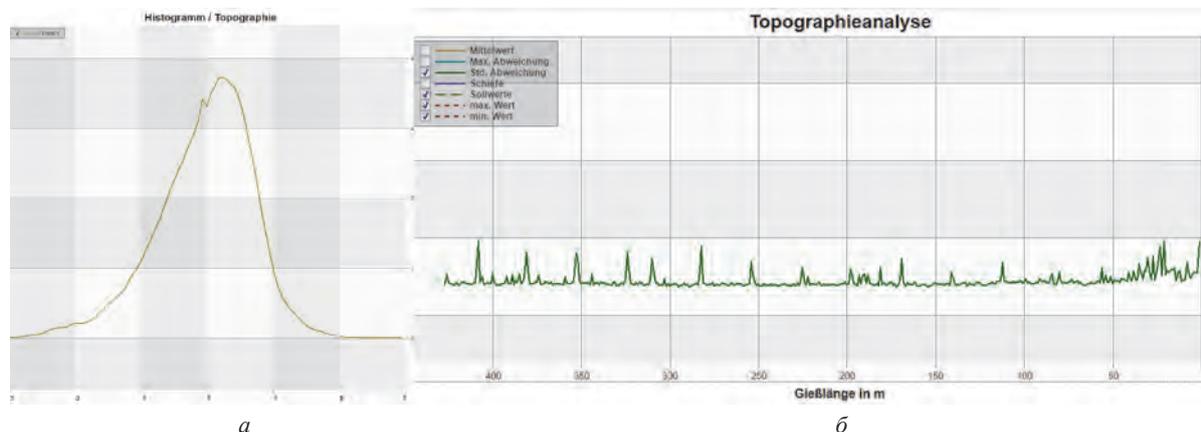


Рис. 5. Гистограмма распределения значений высот профиля (а), изменение средних значений отклонений высоты профиля по длине отливой заготовки (б)

павших в I и V классы, характеризует качество проведенной съемки для каждой отдельно взятой единицы продукции.

Для составления характеристик поверхности по всей плоскости заготовки рассматривали следующие статистические величины: вариация, стандартное отклонение, сдвиг, куртозис. Значения вычисляли для каждого изображения отдельно. Для оценки распределения по всей поверхности заготовки использовали усредненные значения полученных результатов. По результатам составленных гистограмм и рассчитанных квинтилей значений для каждого погонного метра заготовки исследовали случаи неравномерности распределения высоты профиля (рис. 5).

### *Кластерный анализ структуры поверхности заготовки*

Из результатов исследований внутренних дефектов заготовки известно об образовании скоплений дефектов различного рода под поверхностью заготовки в местах крупных глубоких впадин. Образование крупного кластерного рисунка зачастую усугубляется появлением устойчивых полос или борозд, распределенных по всей длине заготовки. Целью исследования макроструктур являлось составление набора признаков, отражающих следующие свойства поверхности (рис. 6):

- 1) наличие мелкого кластерного рисунка, равномерно распределенного по всей поверхности заготовки, либо преобладание на поверхности крупных нерегулярных областей различной формы и высоты профиля;
- 2) наличие на поверхности глубоких и крупных впадин;
- 3) наличие крупных борозд (полос), ориентированных в направлении разливки, превышающих заданную длину  $L$ .

Для оценки образовавшихся на поверхности слитка макроструктур был разработан параметризуемый метод нахождения связанных компонент с нечеткой границей. Метод относится к смешанным алгоритмам нахождения кластеров, использующих иерархическую и плотностную модель. При определении характера кластерного рисунка поверхности множество точек трехмерного скалярного поля распределения высот профиля разбивается на связанные компоненты высоких и низких кластеров (выступов и впадин). Если величина относительной площади поверхности кластеров для выступов и впадин распределена не равномерно, наблюдается образование крупных конгломератов связанных кластеров, хорошо узнаваемых на поверхности заготовки (рис. 7).

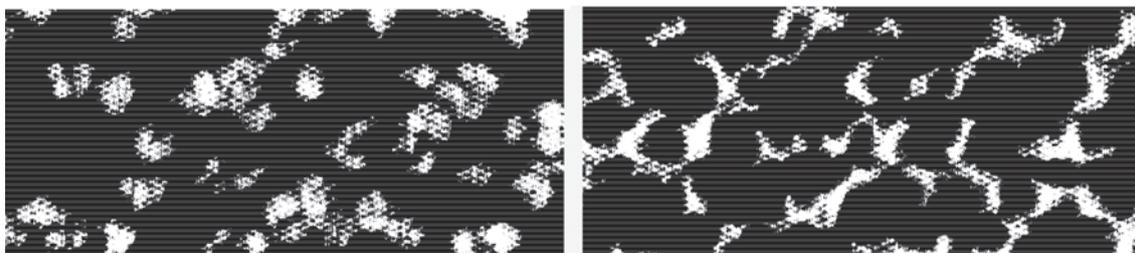


Рис. 6. Программное представление распознанных структур на поверхности заготовки

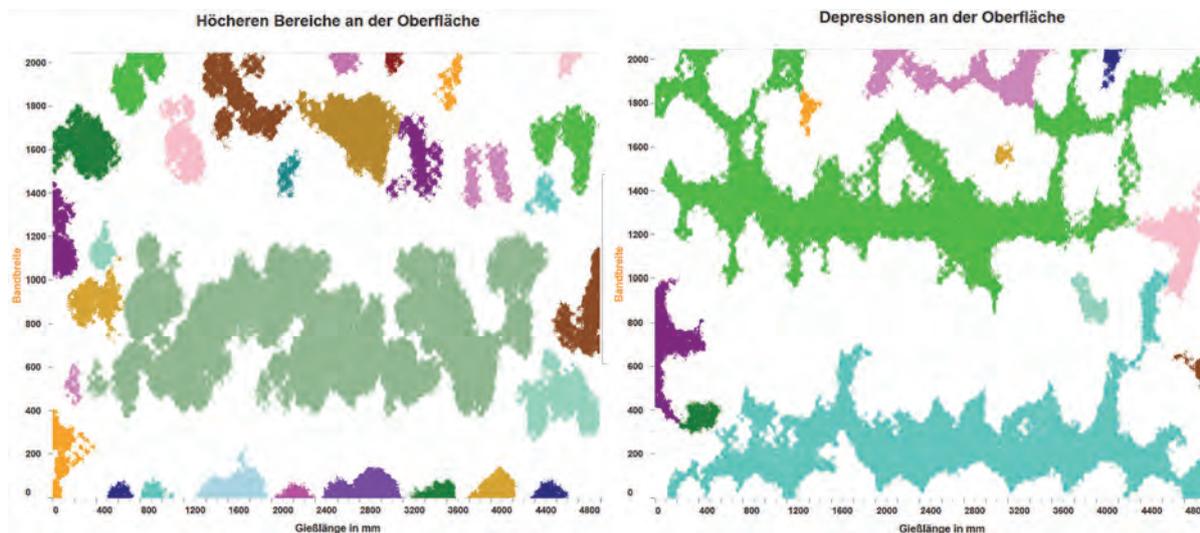


Рис. 7. Образование крупных структур (цепочек выступов и борозд) на поверхности заготовки

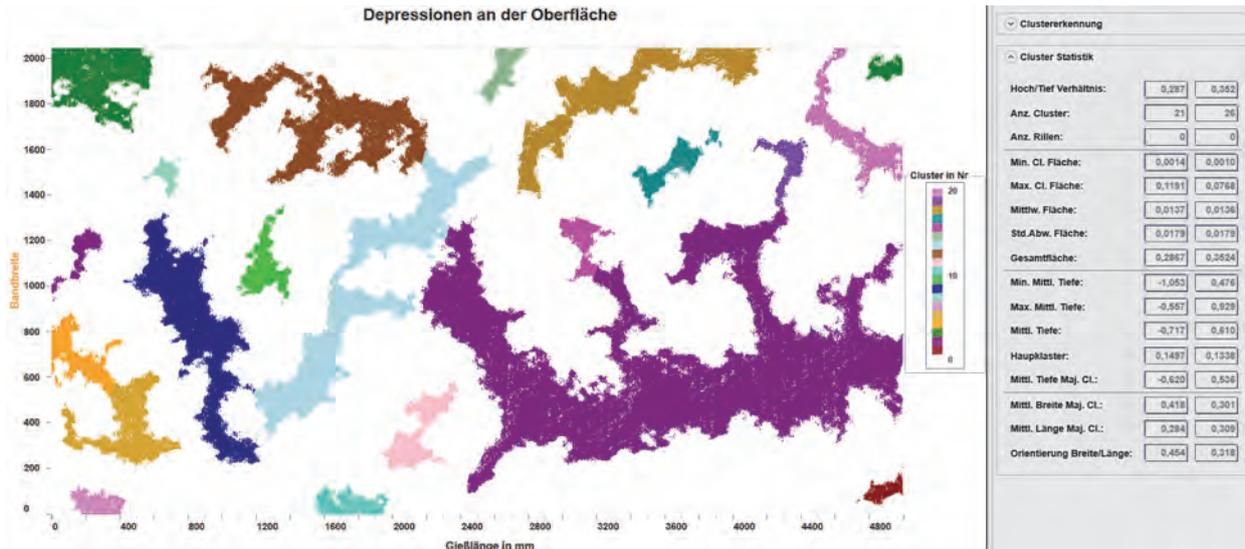


Рис. 8. Впадины на поверхности заготовки и результаты статистики

В качестве характеристики кластерного рисунка рассматривается соотношение сумм площадей от трех до пяти наибольших кластеров к общей площади поверхности, рассчитанное для впадин и выступов по отдельности (далее RAMC – Relative Area of the Major Cluster). Граница значений для предложенной характеристики крупной и мелкой структур поверхности определяется статистической оценкой появления борозд на поверхности заготовки, но может быть задана и в качестве параметра, например, для сравнения результатов различных разливок.

Дополнив решение функциями оценки формы и ориентации кластеров на поверхности из множества найденных крупных впадин, можно выделить искомые борозды, превышающие заданную длину. Борозды обладают стабильной структурой на относительно длинных участках непрерывной заготовки. Зачастую наблюдается появление одной пары борозд, смещенных к краям заготовки. В зависимости от глубины борозд наблюдается появление длинных цепочек нерегулярных выступов переменной высоты профиля в центре поверхности заготовки. Под поверхностью заготовки по линиям борозд наблюдается образование различного рода дефектов [JOC-06].

Полученные из результатов кластерного анализа снимков данные о количестве, размерах и ориентации обнаруженных впадин (рис. 8), выступов и борозд пересчитываются в значения указанных характеристик уже для каждой отдельной заготовки для проведения дальнейшего анализа причин на множестве собранных данных о протекании процесса разлива.

#### *Методы машинного обучения для анализа данных процесса*

Оценка шероховатости профиля, топография поверхности, кластерный анализ макроструктур составляют три независимые группы различных величин. Величины оценки шероховатости профиля отражают локальные отклонения профиля от волновой линии в самых малых значениях ( $10^{-6}$  м). Топография описывает статистические изменения и общее распределение высот в больших по модулю величинах ( $10^{-4}$  м). Кластерный анализ исследует структурные изменения поверхности с помощью разнообразных характеристик в самом высоком интервале значений величин ( $10^{-2}$  м). Каждый рассматриваемый интервал значений выбранных величин, различные виды реализованных оценок привносят немаловажный вклад для подтверждения одной из ключевых характеристик итоговой модели предиктивного ассистента, а именно наблюдаемости (observability) проблемного домена. При расширении предиктивного ассистента функциями корректировки параметров процесса либо интеграции в систему автоматизации второго уровня необходимо также рассмотреть аспект регулируемости (controllability) системы моделью ассистента.

#### *Сравнительный анализ статистических величин*

В результате проведенного статистического анализа данных, описанными выше методами, удалось выделить и просчитать более 60 величин, описывающих шероховатость, топографию и макроструктуры поверхности заготовки. Возможности использования некоторых из них при составлении различных при-

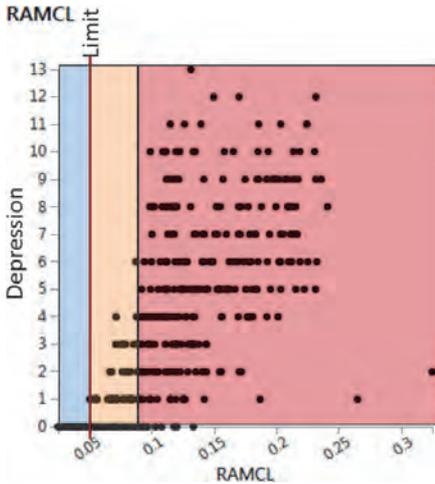


Рис. 9. Распределение значений коэффициента RAMC и количества распознанных борозд

знаков образования дефектов на поверхности либо внутри заготовки оценивали в дальнейшем алгоритмами машинного обучения. На основе собранных данных о протекании процесса разлива необходимо было выделить параметры, имеющие непосредственное влияние на распределение значений статистических оценок. Для этого из всего набора оценок были селектированы те величины, изменения которых могли быть подтверждены вариациями параметров в имеющихся в распоряжении наборах аквизированных данных.

Наличие борозд или полос на поверхности классифицируется как внешний дефект при оценке качества заготовки. Разработанный ассистент распознает и подсчитывает количество борозд автоматически. Используя описанную выше характеристику структуры кластерного рисунка RAMC, можно определить интервал значений либо граничное значение отношения площадей крупных кластеров (впадин) ко всей площади поверхности заготовки, начиная с которого на поверхностях слитков были обнаружены устойчивые борозды. На рис. 9 показано граничное значение коэффициента RAMC: 0.06 (6%), начиная с которого на поверхностях заготовок обнаруживались одна

и более, до 13 борозд, а также интервал 0.05–0.1, в границах которого наличие дефекта на поверхности предсказывалось неоднозначно. При переходе за верхнюю границу интервала борозды были найдены как минимум на одном из снимков исследуемых поверхностей заготовок. При дальнейшем увеличении значений коэффициента наблюдается пропорциональный рост количества обнаруженных борозд (рис. 9).

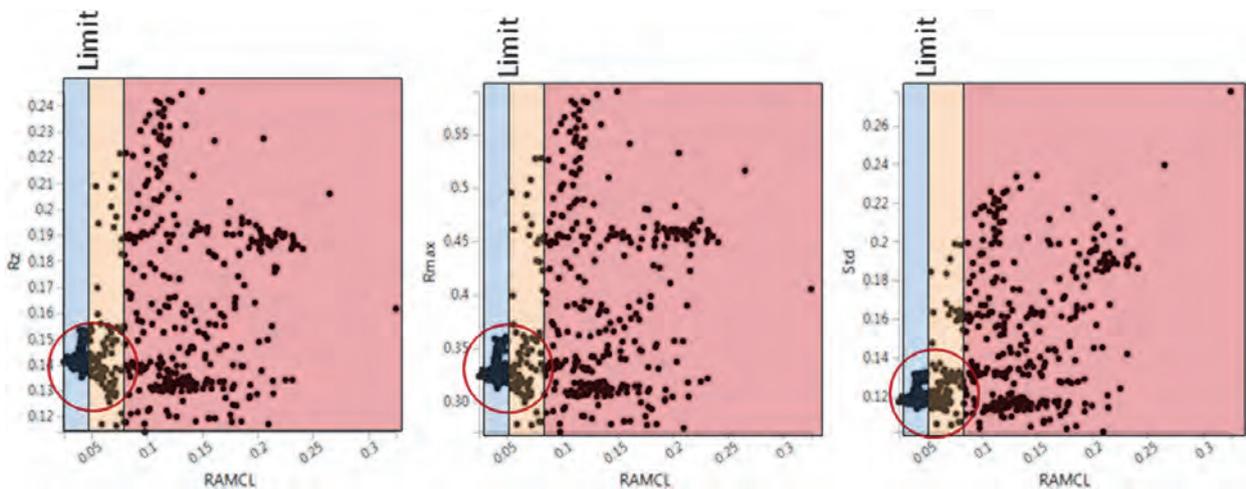


Рис. 10. Распределение значений характеристик шероховатости поверхности с увеличением относительной площади крупных впадин на поверхности заготовки

При рассмотрении полученных значений для характеристик шероховатости поверхности наблюдались области низких значений для стандартного отклонения, максимальной высоты профиля, а также суммы средних значений высот профиля заготовки в интервале значений, не превышающих рассмотренную ранее границу в 6% для коэффициента RAMC. На приведенных диаграммах (рис. 10) наблюдаются увеличение и разброс значений рассматриваемых характеристик за пределами интервала 0.0–0.06, что свидетельствует о нерегулярности свойств шероховатости поверхностей, в том числе о нерегулярности значений мелких локальных отклонений от волновой составляющей профиля.

Результаты сопоставления полученных значений для величин двумерного анализа распределения высот на поверхности заготовки (топографии) свидетельствуют в свою очередь о пропорциональном увеличении максимальных амплитуд колебаний высот для значений коэффициента RAMC, превышающих границу 0.06 (6%) (рис. 11).

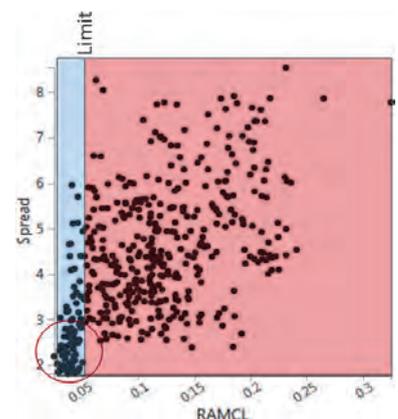


Рис. 11. Распределение значений смещения и спреда для топографии по значениям коэффициента RAMC

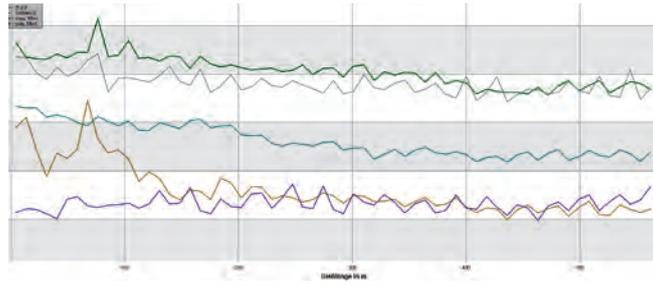


Рис. 12. История измерений параметров группы  $B_n$  по всей длине заготовки

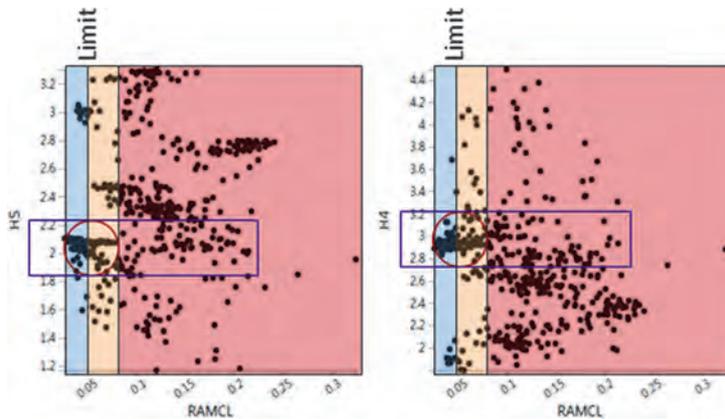


Рис. 13. Наблюдаемый интервал 0.0–0.06 коэффициента RAMC в распределениях значений параметров процесса группы  $\{H_k\}$

### Сравнительный анализ параметров процесса разливки

Для слежения за протеканием процесса разливки МНЛЗ оснащена стандартной сенсорикой для измерения температурного поля на поверхности заготовки, расхода воды и т. д. Из результатов измерений для различных разливок сталей одной группы с помощью корреляционного анализа и метода главных компонент можно попытаться на примере распределения полученных значений выбранной группы параметров отследить возникновение описанных выше дефектов поверхности заготовки [DIR-09].

Для проведения экспериментов на множестве собранных данных были выбраны группы параметров (рис. 12), соответствующие группам установленных на машине сенсоров и видам измерений:  $\{T_k\}$ ,  $\{W_1\}$ ,  $\{H_m\}$ ,  $\{B_n\}$ ,  $\{D_p\}$ .

На примере распределений значений параметров группы  $\{H_m\}$  в сравнении с распределением значений описанного выше коэффициента RAMC для наблюдаемых на поверхности заготовки крупных впадин (рис. 13) можно заметить некоторую кластеризацию данных измерений в области, соответствующей низким значениям коэффициента RAMC 0.0–0.06, соответствующим выявленному ранее интервалу равномерной мелкокластерной структуры поверхности.

Для того чтобы оценить зависимость изменений характеристики структуры поверхности от каждой группы параметров в целом, использовали метод главных компонент, при котором группы параметров  $\{T_k\}$ ,  $\{W_1\}$ ,  $\{H_m\}$ ,  $\{B_n\}$ ,  $\{D_p\}$  были объединены в переменные T, W, H, B, D.

### Определение влияния параметров процесса

На различных стадиях контроля качества продукции собирается информация о выявленных дефектах для каждой отдельной заготовки. Чтобы установить величину влияния изменений отдельных параметров на появление одного конкретного дефекта, проводится анализ значимости свойств для выбранных параметров на множестве доступных данных о процессе разливки. Ниже приведена таблица распределения значимости выбранных параметров для статистической оценки коэффициента RAMC для впадин на поверхности заготовки.

RAMCL	W	Vc	H	B	T	Ceq	D
1	0.320655	0.317026	0.27336	0.156336	0.096275	0.050531	0.038781

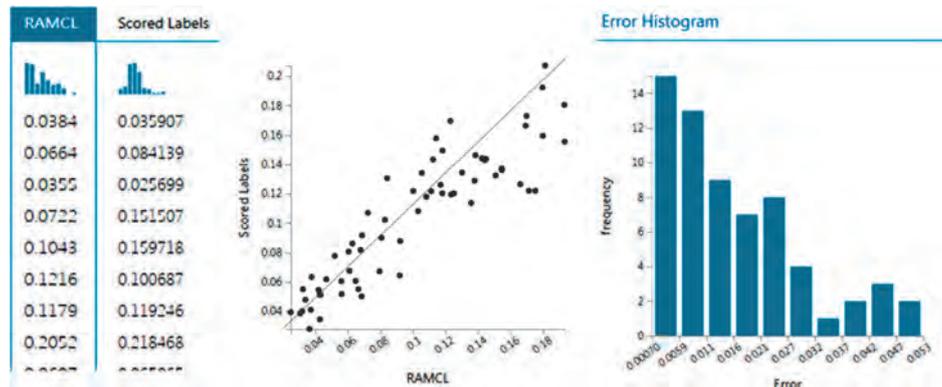


Рис. 14. Результаты расчетов модели предиктивной оценки характеристики структуры поверхности появления борозд на поверхности непрерывной заготовки

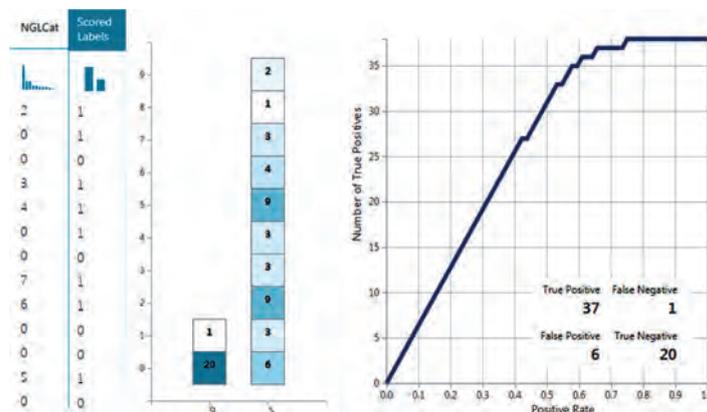


Рис. 15. Классификация сочетаний параметров разливки при оценке вероятности появления борозд на поверхности литой заготовки

### Предиктивная модель появления возможных дефектов

На основе собранных данных о параметрах процесса, результатов измерений и рассчитанных статистических характеристик можно сделать предположения о вероятности появления дефектов определенного вида. Основной задачей предложенной предиктивной модели является предупреждение случаев сочетаний параметров процесса, приводящих к появлению дефектов на поверхности либо внутри заготовки. На рис. 14 показаны результаты расчетов модели предиктивной оценки появления борозд на поверхности непрерывной заготовки.

В качестве альтернативы для расчетов характеристики структуры кластерного рисунка поверхности заготовки на представленном наборе данных определяются бинарная классификация сочетаний параметров разливки в отношении появления борозд, а также вероятность их появления (рис. 15).

### Выводы

В настоящем проекте были разработаны и применены различные алгоритмы статистического анализа и интеллектуальной обработки данных, в том числе алгоритмы локальной аппроксимации, компьютерного зрения, кластеризации, метода связанных компонент, метода главных компонент, определения значимости свойств, линейной и логистической регрессии. Предложенная последовательность обработки информации была реализована в форме предиктивного ассистента для производства и контроля качества продукции МНЛЗ.

На основе результатов измерений инспекционной системы были сформулированы признаки появления борозд, крупных впадин и выступов на поверхности непрерывной заготовки; сформулированы статистические оценки различных характеристик профиля, топографии и структуры исследуемых поверхностей; исследованы взаимосвязи между выявленными дефектами, параметрами процесса и значениями статистических оценок.

При разработке описанного ассистента было опробовано применение облачных технологий для интеллектуальной обработки данных в качестве технологической поддержки персонала МНЛЗ.

В перспективе рассматривается предоставление различных проблемно-ориентированных облачных сервисов в рамках одной платформы поддержки производства, контроля качества и технического обслуживания МНЛЗ.

#### Literaturverzeichnis

[CLE-88] Cleveland, William S.; Devlin, Susan J.: *Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting*. In: Journal of the American Statistical Association (83) H. 403, S. 596.

[DIR-09] Dirk Lieftucht u. a.: *Improved Diagnosis of Sensor Faults Using Multivariate Statistics* (2009).

[GOR-16] Gorainov; SMS group GmbH (Sergey): *Technologische Assistenten für automatisierte Diagnostik des Zustandes der Aggregate der Stranggießanlage V3* (2016).

[JOC-06] Jochen Wans: *Oberflächenqualität peritektisch erstarrender Kohlenstoffstähle – Vergleich zwischen Strangguss und Bandguss* (2006).

[S. -06] S. Jung: *Oberflächenbeurteilung. docx* (2006).