



ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

«МЕТАЛЛУРГИЯ 4.0»: модуль разливки и модуль ковки

АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

2024

ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ



ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ



Сквозное моделирование технологического процесса

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

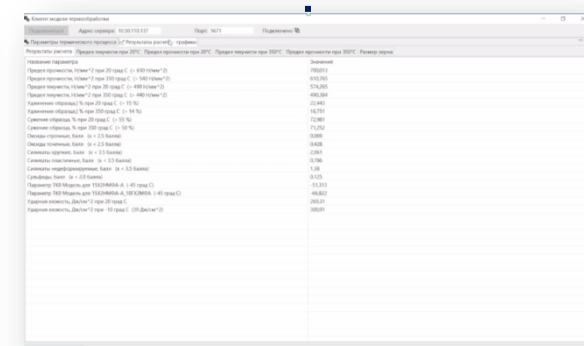
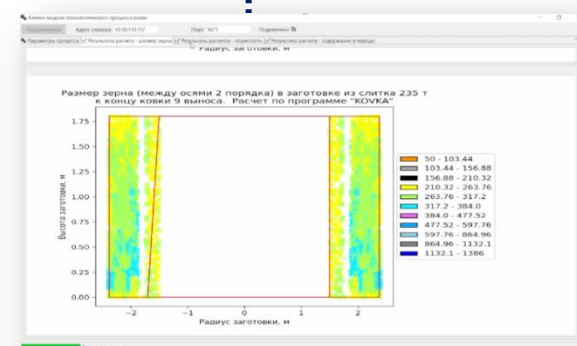
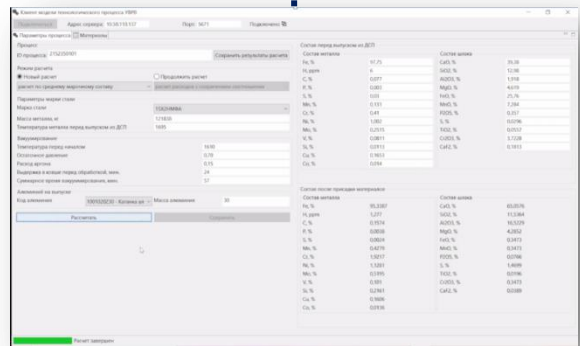
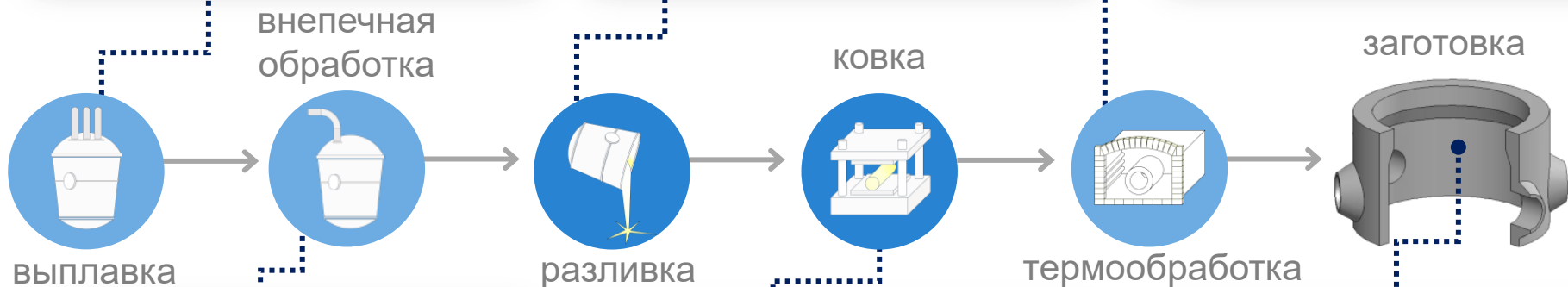
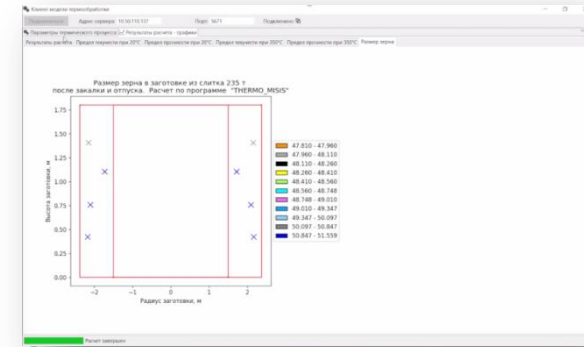
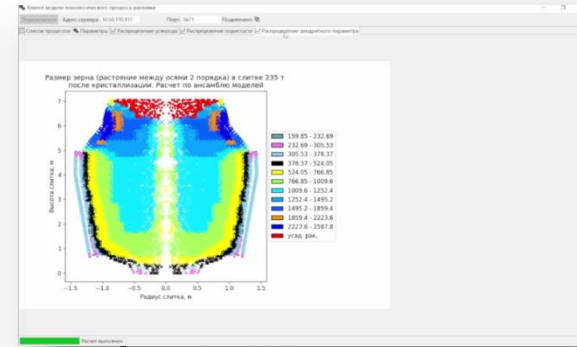
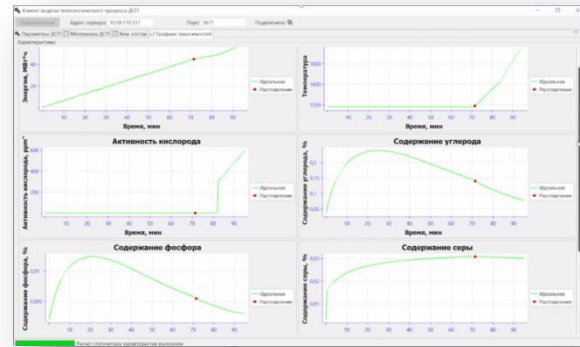
законы, описывающие
термодинамику и кинетику
процессов

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

машинное обучение

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Затвердевание: «Полигон Софт», «Крупный слиток»
- Ковка: Qform, DEFORM-3D





Методология построения

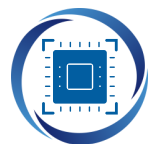


Промышленные данные для моделирования:

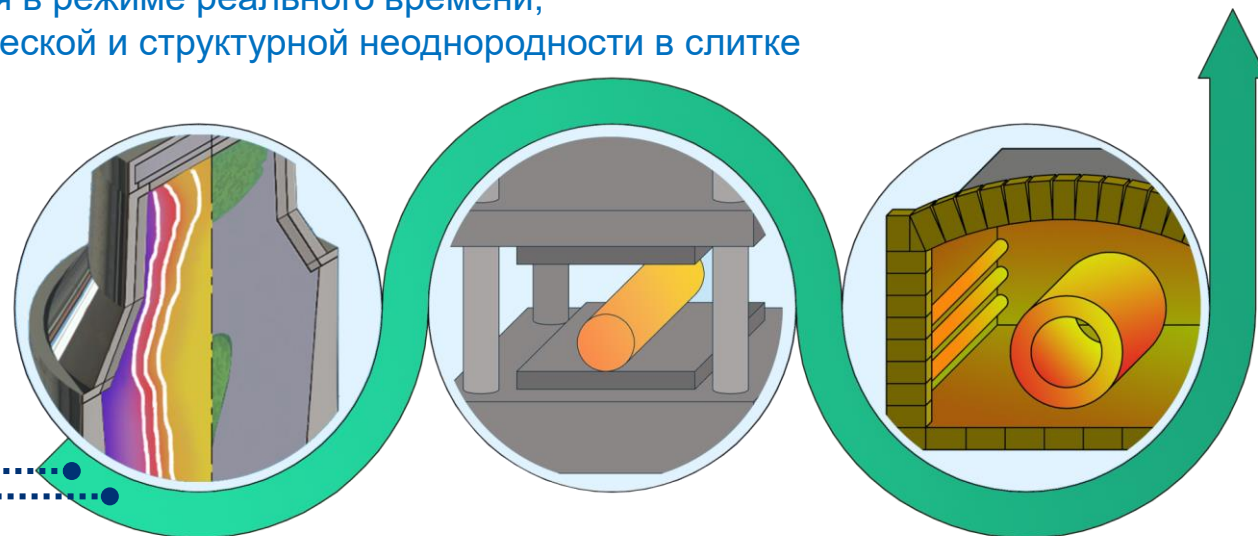
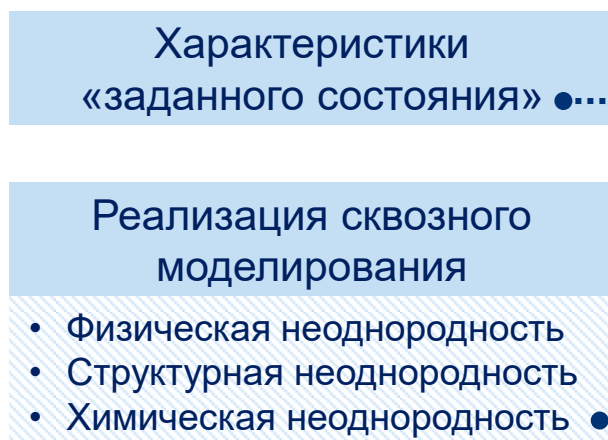
- Стали: типа 15Х2НМФА, 10ГН2МФА, 06Х12Н3Д
- Геометрические параметры и материал оснастки, схема утепления
- Характеристики теплоизоляционных материалов: прибыльная надставка, зеркало металла
- Условия разливки: температура разливки, время разливки, температура оснастки

Компьютерное моделирование:

Слитки: номенклатура применяемых в филиале АО «АЭМ-технологии» «АЭМ-Спецсталь» слитков для производства оборудования АЭУ массой **37...420** т (более 20 типоразмеров) согласно матрице экспериментов



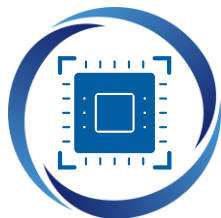
- Моделирование разливки/затвердевания в режиме реального времени;
- Получение данных о физической, химической и структурной неоднородности в слитке



МОДУЛЬ РАЗЛИВКИ

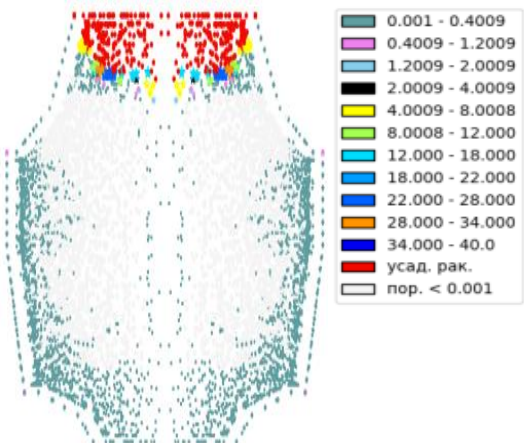


ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

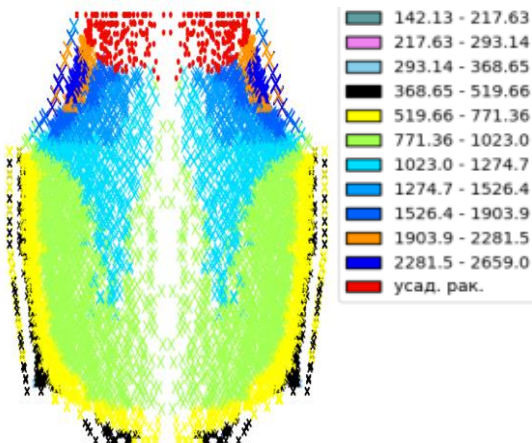


Результат и верификация

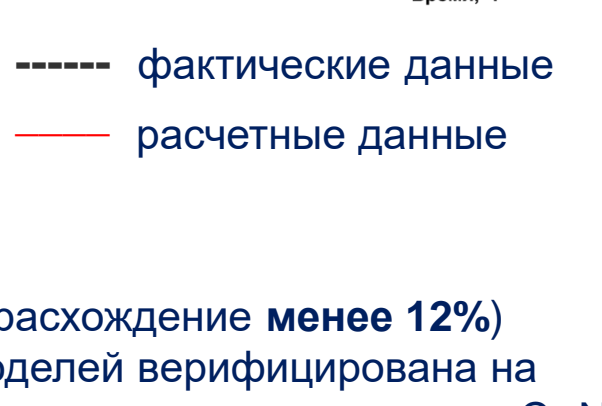
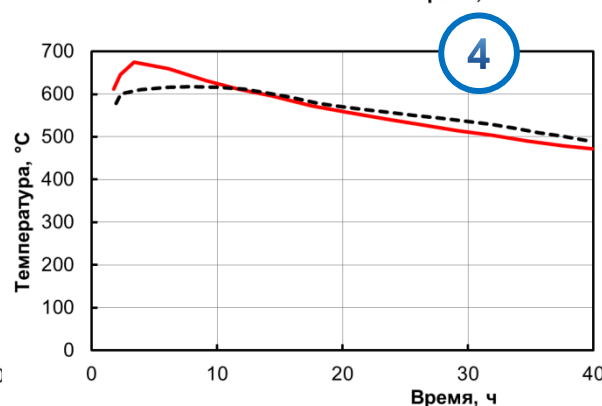
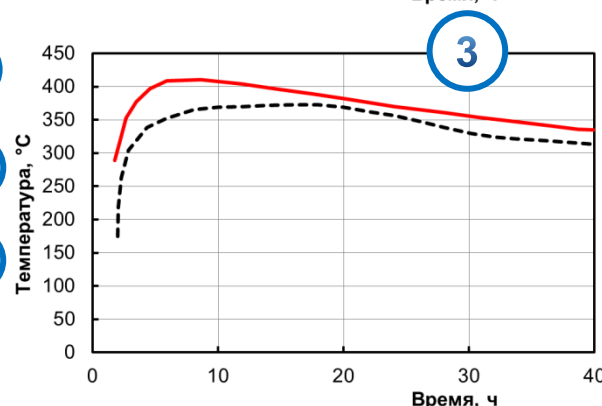
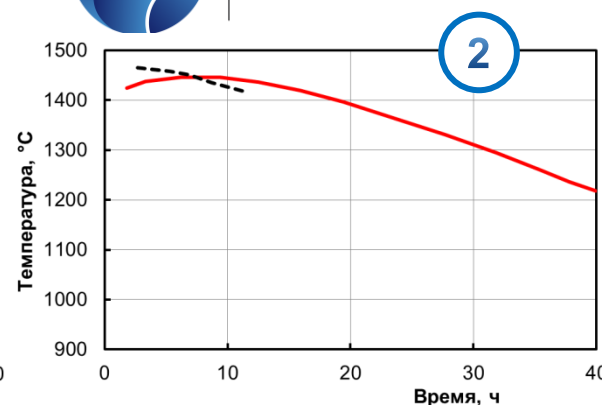
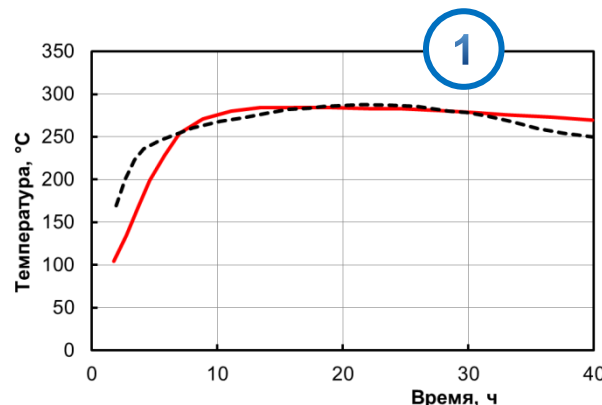
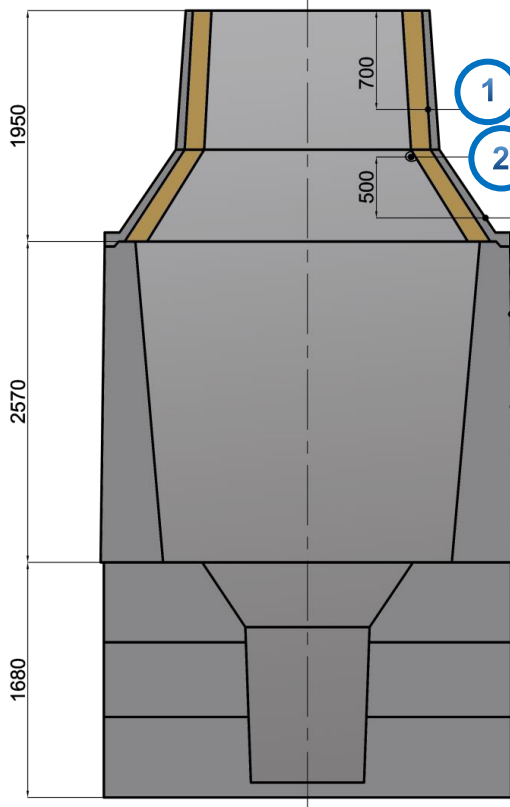
Физическая неоднородность



Расстояние м/у осями второго порядка



термографирование слитка массой 142 т



--- фактические данные
— расчетные данные

Высокая предсказательная (расхождение **менее 12%**) способность построенных моделей верифицирована на промышленном слитке из стали системы легирования Cr-Ni-Mo-V

СПИТОК МАССОЙ 384 Т
ИЗ СТАЛИ 15Х21МФА

МОДУЛЬ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ



ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ



Методология построения

База промышленных данных:

- Стали: типа 15Х2НМФА, 10ГН2МФА, 06Х12Н3Д
- Изделия: днище, фланец, сфера, обечайка, труба
- Период: 7 лет
- Количество: 289

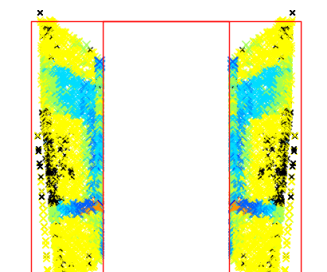
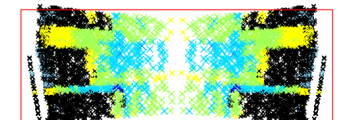
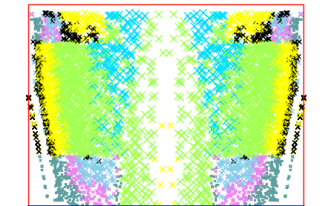
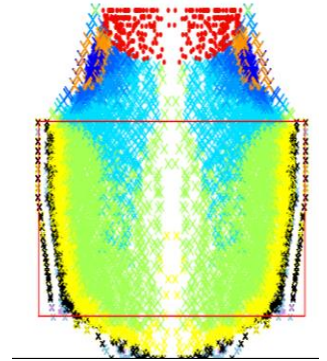
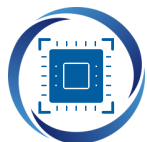


Лабораторные эксперименты:

- изготовление заготовок: выплавка слитков (масса выплавленного металла более 1200 кг) → ковка: прутки, ступенчатые поковки (разная степень укова) → спектр режимов термической обработки во всем диапазоне НТД;
- проведение моделирующих термодеформационных исследований на установке Gleeble 3800;
- исследования и испытания (более 6000 образцов для всех типов исследований)

Компьютерное моделирование:

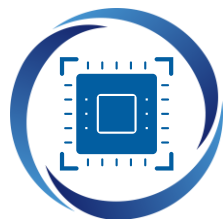
- Слитки: 87, 159, 384 т
- Моделирование деформационной обработки в режиме реального времени (вместо 3...4 месяцев);
- Прослеживаемость данных о физической, химической и структурной неоднородности в поковке и её эволюции;
- Повышение коэффициента использования материала (КИМ), качества и ресурса изделий;
- Оптимизация режимов ковки, корректировка цикла обработки;
- Сокращение длительности термической обработки



БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ ВЫНОСА*



ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

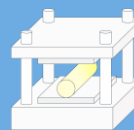


Входные/ выходные данные

«СТАТИКА»

- Геометрические размеры поковки;
- 3D-поля (размер зерна, ликвация элементов);
- Температура

НАГРЕВ КОВКА



«ДИНАМИКА»

- Геометрия
- Температура
- Время выдержки

- Геометрические размеры поковки;
- 3D-поля (размер зерна, ликвация элементов)

МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ПРОЦЕСС

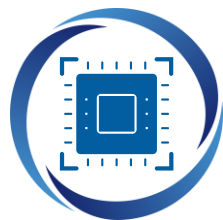
- влияние параметров ковки на размера зерна;
- влияние процесса нагрева на размера зерна;
- распределение после выноса: суммарной накопленной деформации накопительным итогом и дополнительной накопленной деформации за рассматриваемый вынос;
- изменения координат расчетных точек в конце каждого выноса;
- изменения структурной и химической неоднородности в процессе ковки

***Вынос** – операция при термомеханической обработке, включающая в себя нагрев в печи и ковку

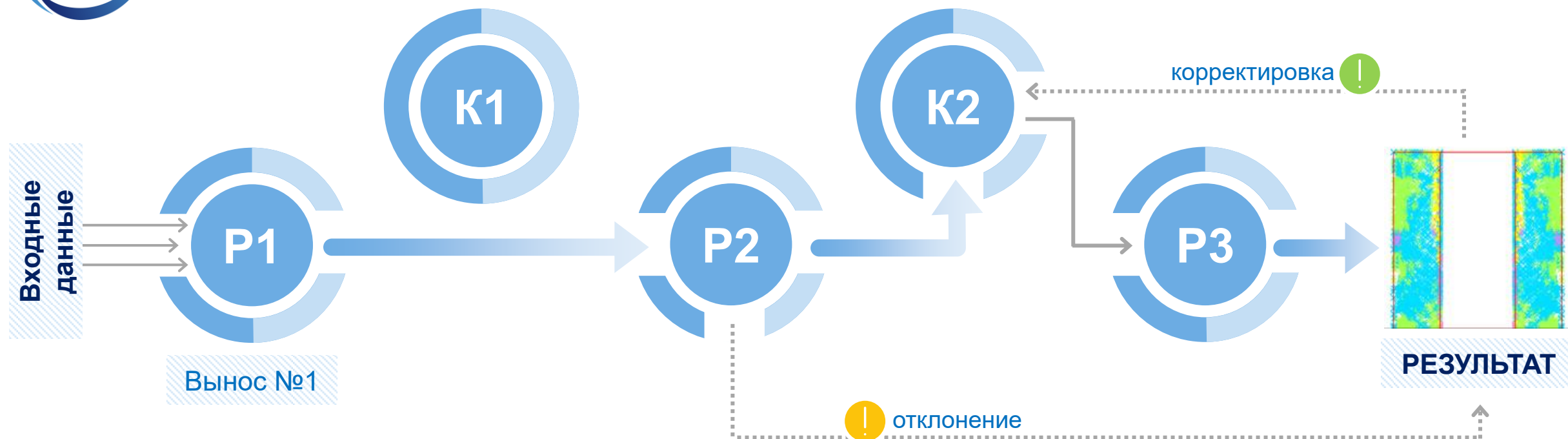
СХЕМА РАБОТЫ МОДУЛЯ



ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ



Последовательность моделирования



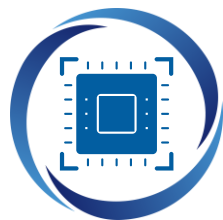
P1...P3 – реальный процесс

K1...K2 – корректирующие действия в случае отклонения

МОДУЛЬ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

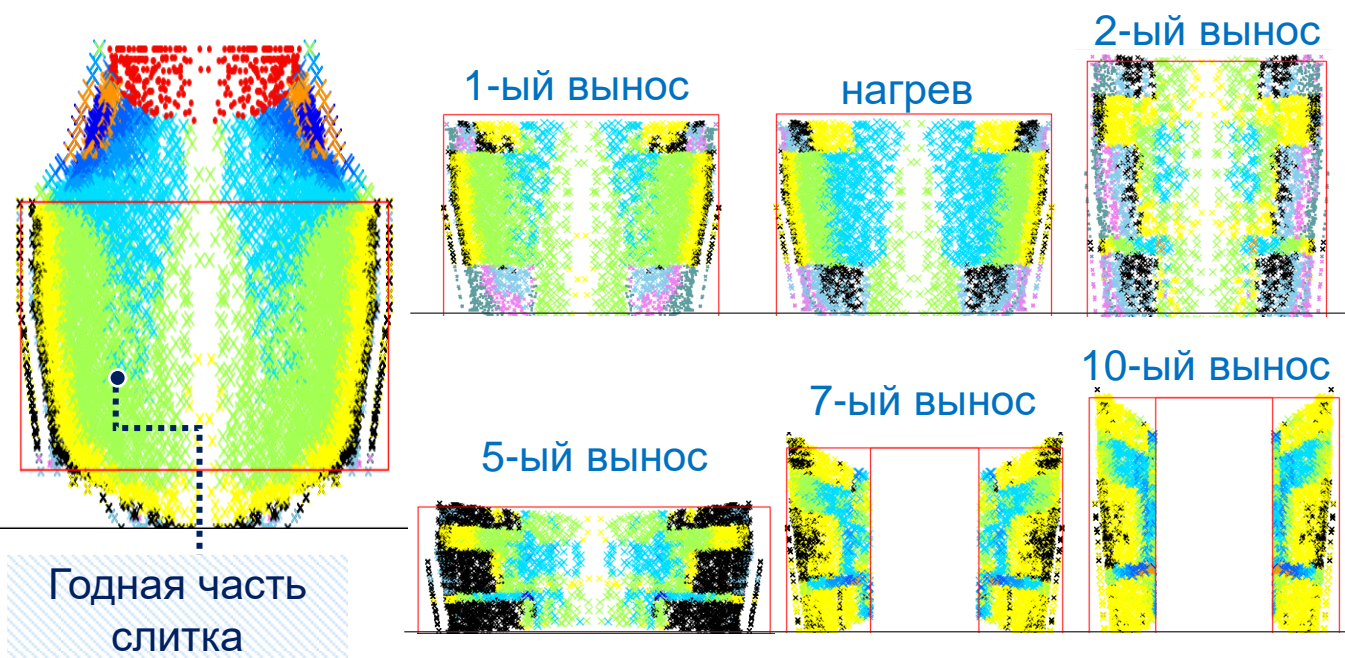


ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

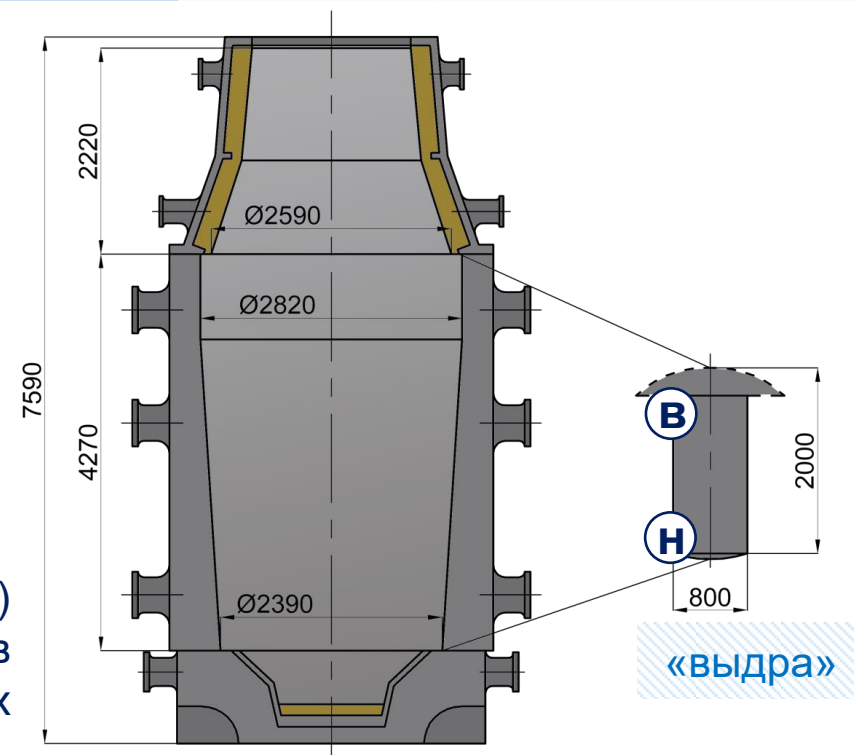


Результаты и верификация

Расчетные и экспериментальные значения размера зерна в верхней (В) и нижней (Н) частях «выдры», отобранной из **слитка 235 т**



Участок	Расчетное значение		Экспериментальное значение	
	Размер зерна, мкм	Балл зерна	Размер зерна, мкм	Балл зерна
В	110	G3	125±15	G3
Н	205	G2	190±21	G2



Высокая предсказательная (расхождение **менее 10%**) способность построенных моделей верифицирована в промышленных условиях