



# Инженерный анализ литейных технологий

---

в PolygonSoft

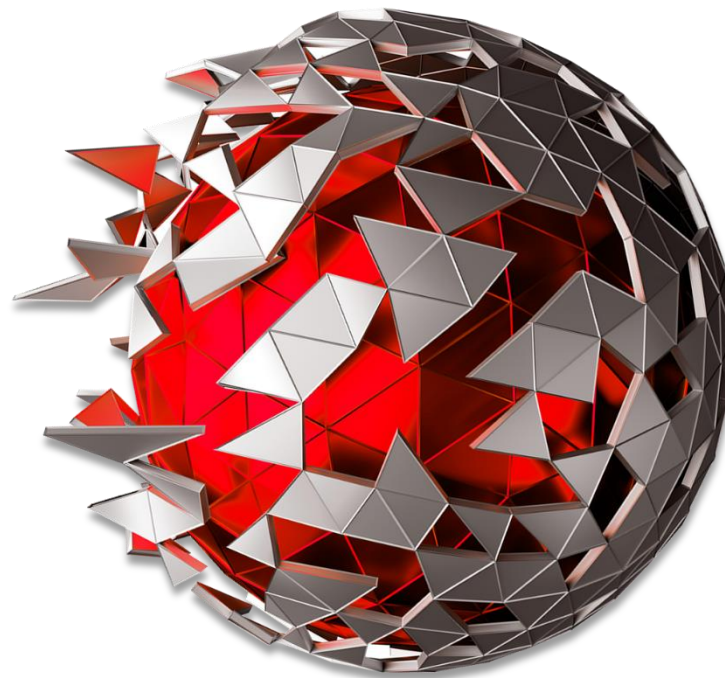
Монастырский Алексей Валерьевич

к.т.н., руководитель отдела разработки

PolygonSoft

[avmon@csoft.ru](mailto:avmon@csoft.ru)

**CSDEV.RU/ +7 (495) 069-44-44**



# СиСофт Девелопмент

**УНИКАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ САПР, ТИМ/ВІМ, PLM, CAE**

**60**

Готовых  
приложений

**1,5 млн**

Выданных  
лицензий

**600 тыс.**

Рабочих мест  
в базе

**35 тыс.**

Предприятий  
клиентов

**30 лет**

Работы на  
рынке САПР

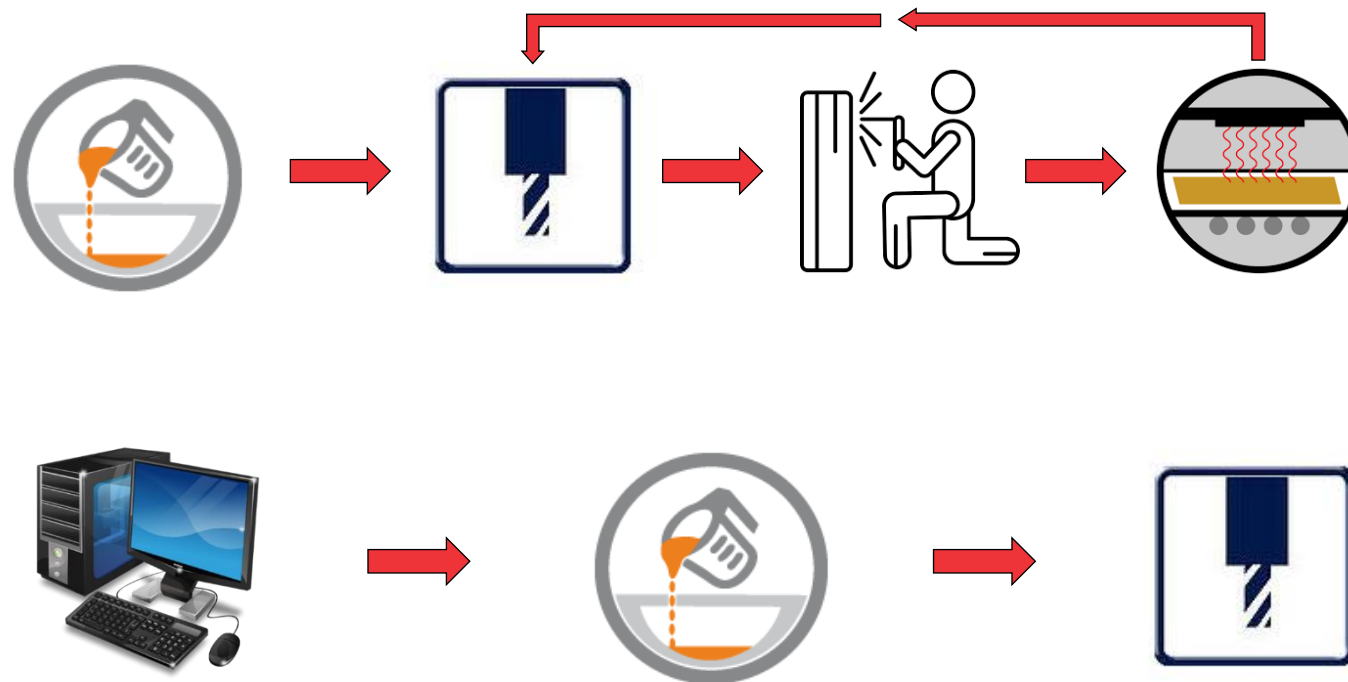


**АО «СиСофт Девелопмент» (CSOft Development) - российский разработчик** инженерного программного обеспечения **САПР** и **ВІМ**, комплексных решений для машиностроения, промышленного и гражданского строительства, архитектурного проектирования, землеустройства, электронного документооборота, обработки сканированных чертежей, векторизации и гибридного редактирования с опытом работы на рынке свыше 30 лет.

# Проблемы технологии в литейном производстве

## КАК ИЗГОТОВИТЬ ГОДНУЮ ОТЛИВКУ?

- Это сложный и длительный процесс
- Нужно много экспериментов
- Потребуется многократный ремонт отливок
- Миф: «Литья без брака не бывает»
- Риск потери времени
- Финансовые риски



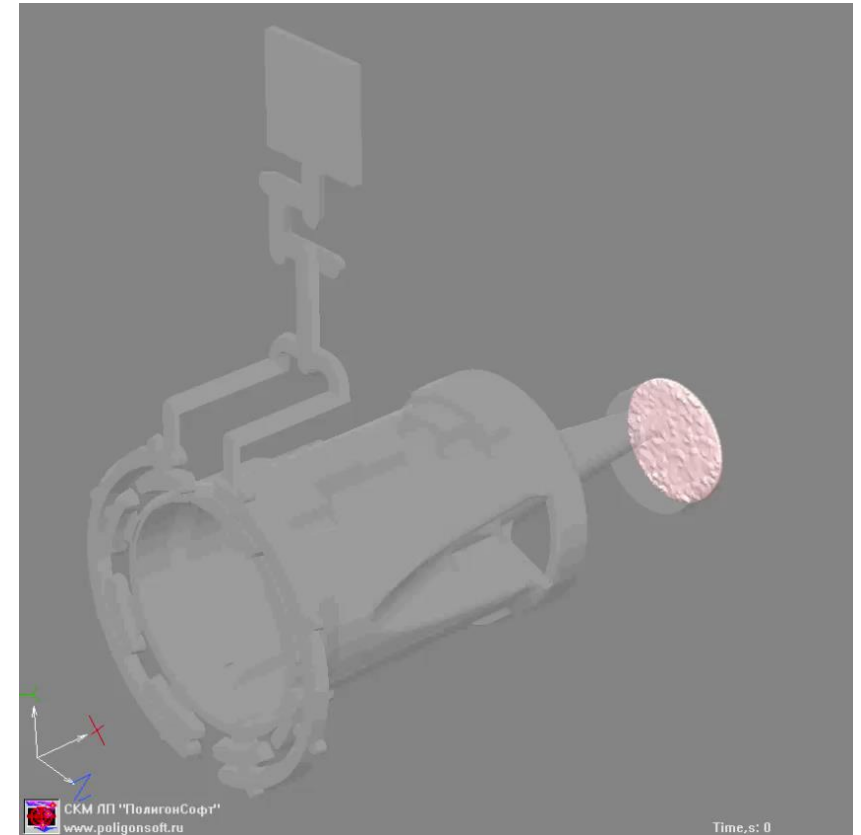
## СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

- Конечно-элементный анализ в литейном производстве
- Ориентирован на инженеров-технологов
- Используется во многих отраслях промышленности: энергетика, транспорт, тяжелое машиностроение, авиация и космос, ВПК, производство полупродукта и т.д.
- Внесен в единый реестр российских программ, рег. номер 3378.
- Более 30 лет на рынке (с 1989 г.)
- Коллектив из специалистов высокого класса  
(д.т.н., к.т.н., к.ф-м.н, технологи литейного производства, программисты)



## МОДЕЛИРУЕМЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- В песчаные формы с любым связующим и без него
- В кокиль (нагреваемый и охлаждаемый)
- Литье по выплавляемым моделям
- Литье в вакууме (в том числе направленная кристаллизация)
- Литье под высоким давлением
- Литье под низким давлением
- Непрерывное и полунепрерывное литье
- Центробежное литье
- Термическая обработка



*Заполнение формы (литье под давлением)*

## РЕШАТЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ EULER

- Свободная поверхность расплава
- Динамика заполнения
- Поле скоростей расплава
- Поле температур расплава и формы
- Затвердевание
- Критерий остановки (непроливы)
- Центробежное литье



Палитра и Шкала X		
Время, с: 44.177108 00:00:44		
Температура, С Жидкая фаза, % Тл=1457 Тс=1445		
1580		<input type="checkbox"/>
1457		<input checked="" type="checkbox"/>
1455.29		<input type="checkbox"/>
1453.57		<input type="checkbox"/>
1451.86		<input type="checkbox"/>
1450.14		<input type="checkbox"/>
1448.43		<input type="checkbox"/>
1446.71		<input type="checkbox"/>
1445		<input checked="" type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>

Заполнение формы (ЛВМ)

## РЕШАТЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ EULER

Верификация момента остановки  
течения расплава на основе  
экспериментальных данных

*(V. E. Bazhenov, A. V. Petrova, and A. V. Koltygin  
Foundry Department, National University of Science  
and Technology (MISiS), Moscow, Russia)*



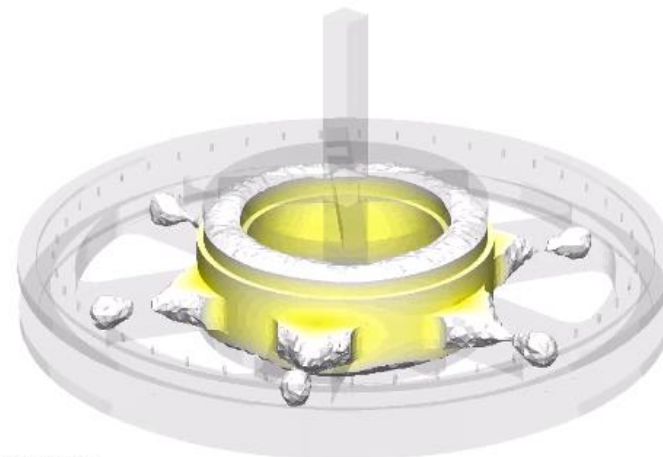
Эксперимент



Моделирование

## РЕШАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУР И ПОРИСТОСТИ FOURIER

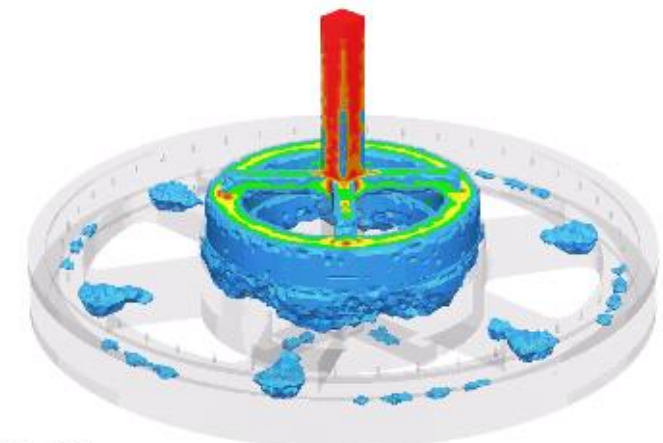
- Температуры отливки и формы
- Затвердевание
- Гидростатическое давление
- Усадочные раковины
- Макро- и микропористость
- Усадка при центробежном литье
- Радиационный теплообмен
- Направленная кристаллизация
- Непрерывное литье



*Тепловые узлы  
(ООО«ДимАл»)*

ОСМ ЛП "ТемперСофт"  
www.poligonsoft.ru

Time: s: 928



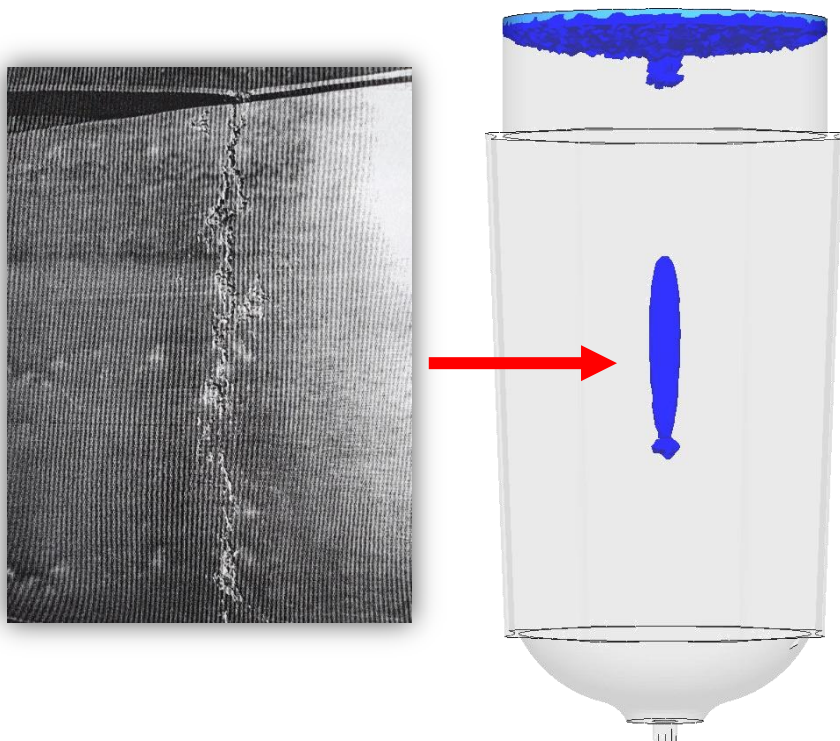
*Раковины и  
пористость  
(ООО«ДимАл»)*

ОСМ ЛП "ТемперСофт"  
www.poligonsoft.ru

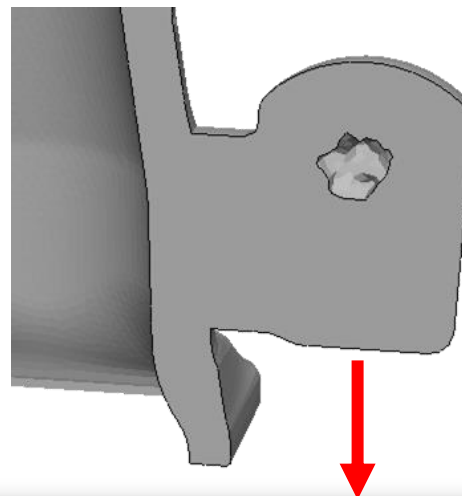
Time: s: 1210



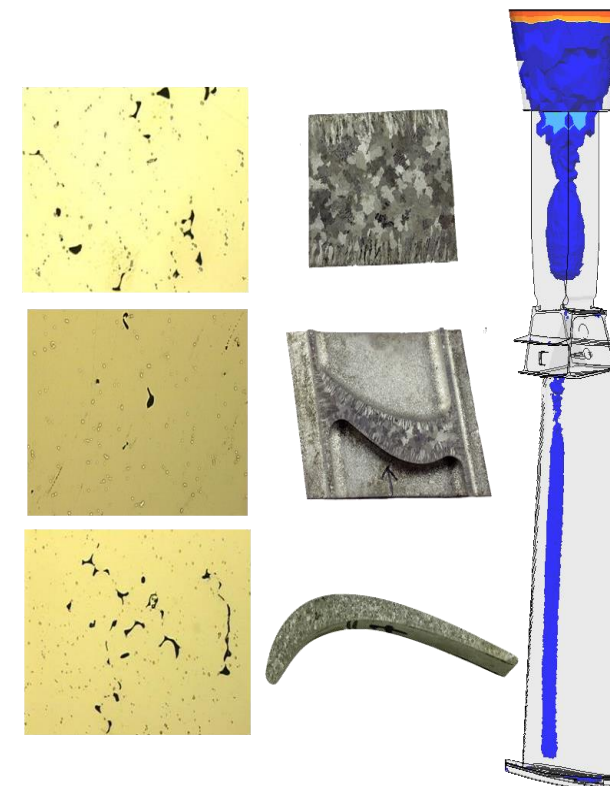
## РЕШАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУР И ПОРИСТОСТИ FOURIER



Осевая пористость в стальном слитке 8 т,  
«стандартная» модель (АО «Русполимет»)

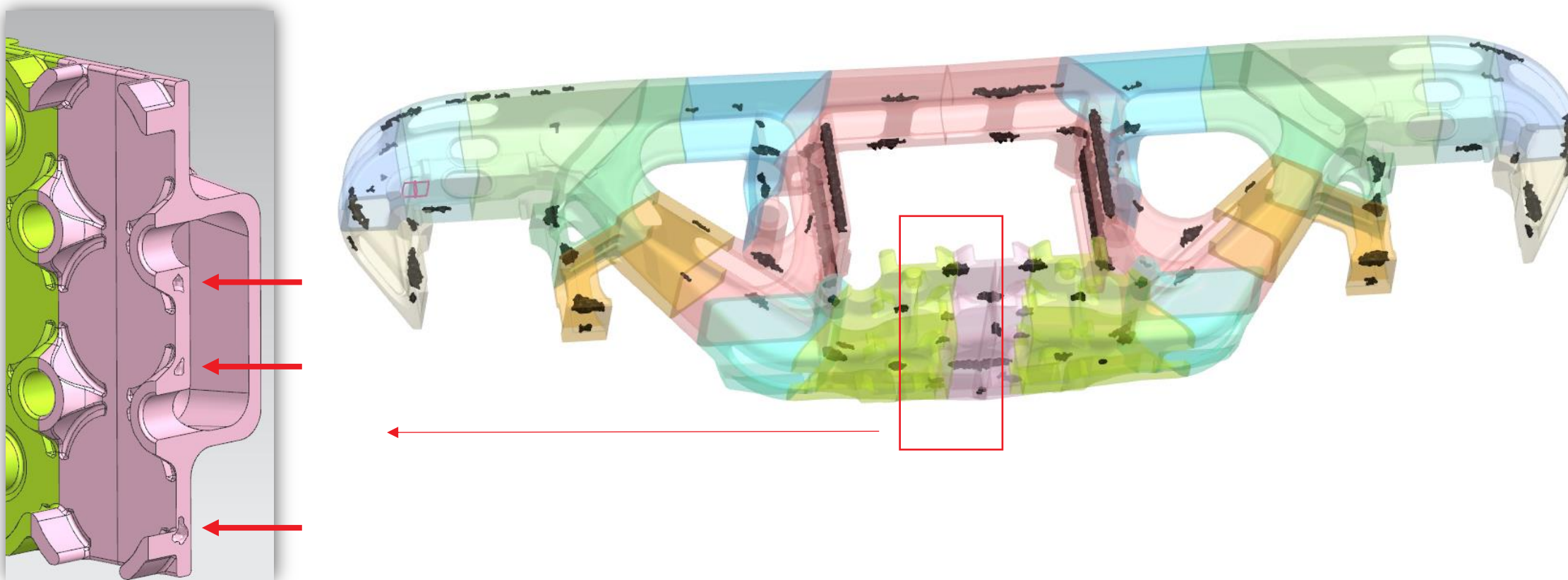


Раковина в стальной отливке,  
«новая» модель (ООО «СМЗ»)



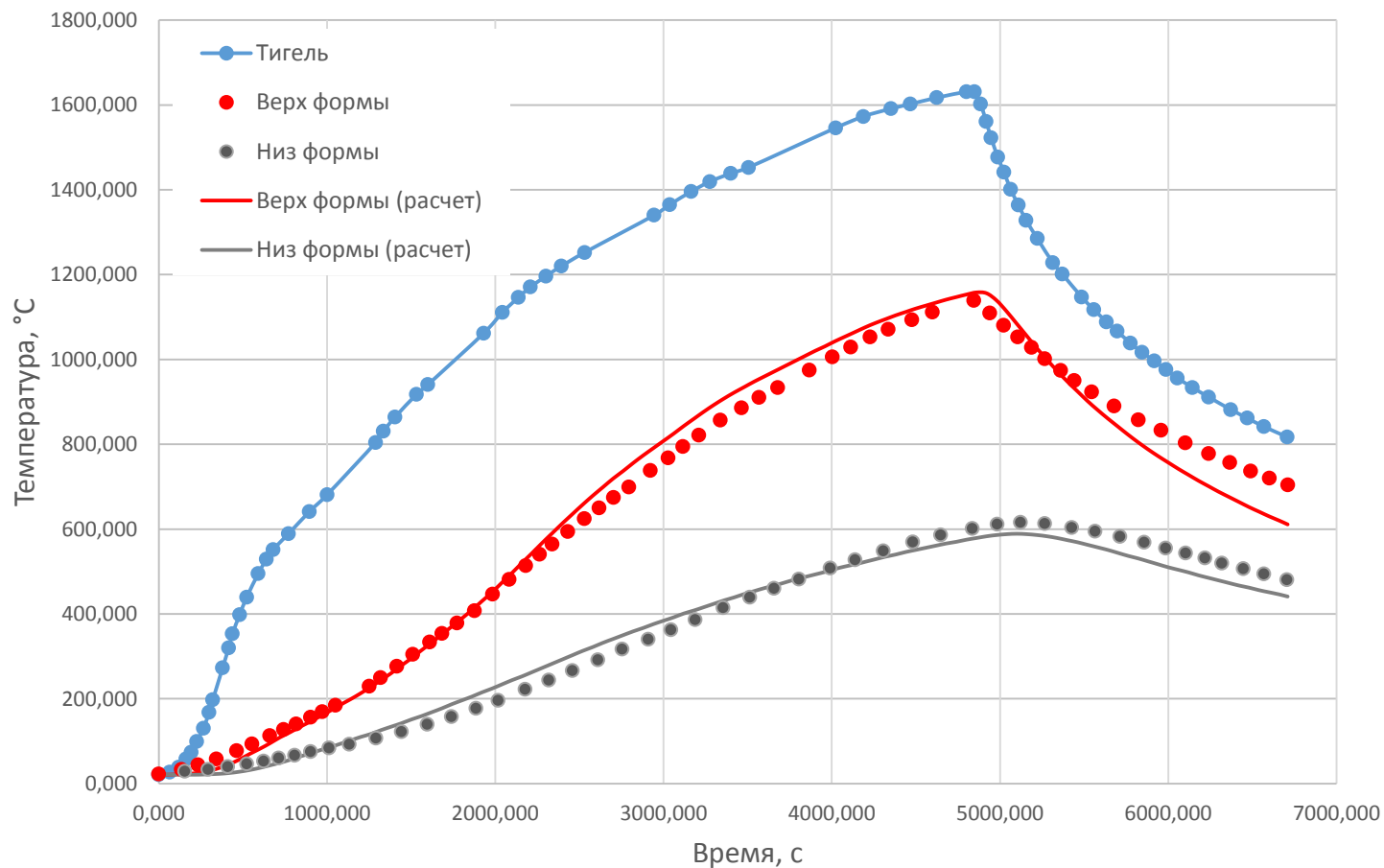
Микропористость в лопатке ГТД  
(ПК «Салют» АО «ОДК»)

## РЕШАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУР И ПОРИСТОСТИ FOURIER

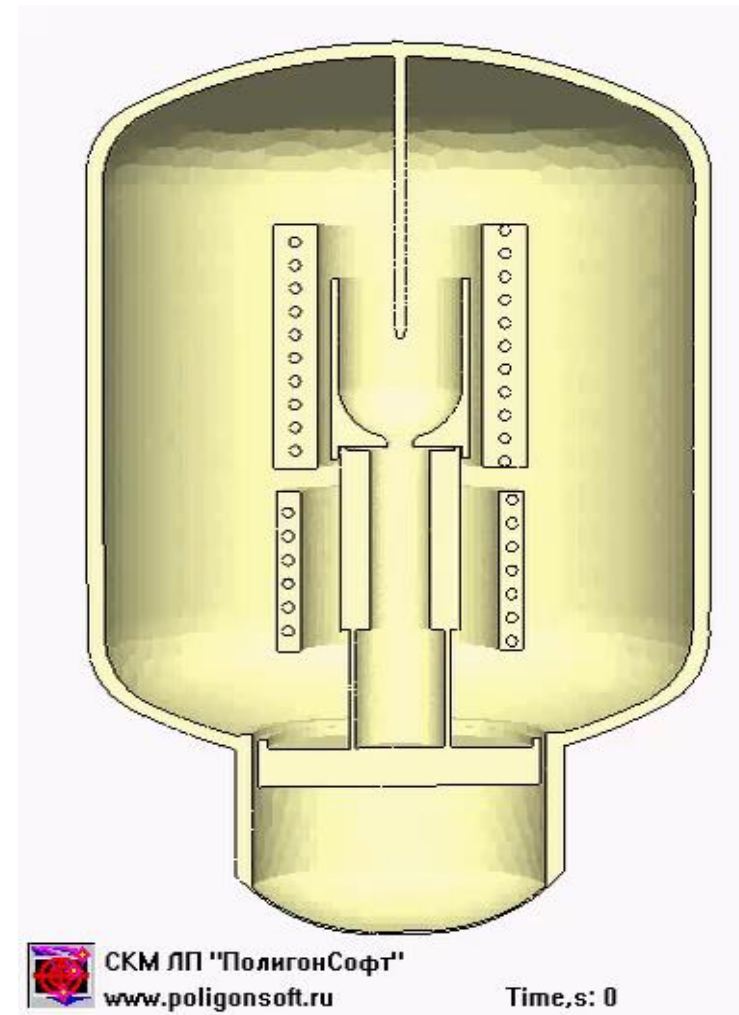


*Экспорт раковин и пористости для анализа в CAD*

## РЕШАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУР И ПОРИСТОСТИ FOURIER

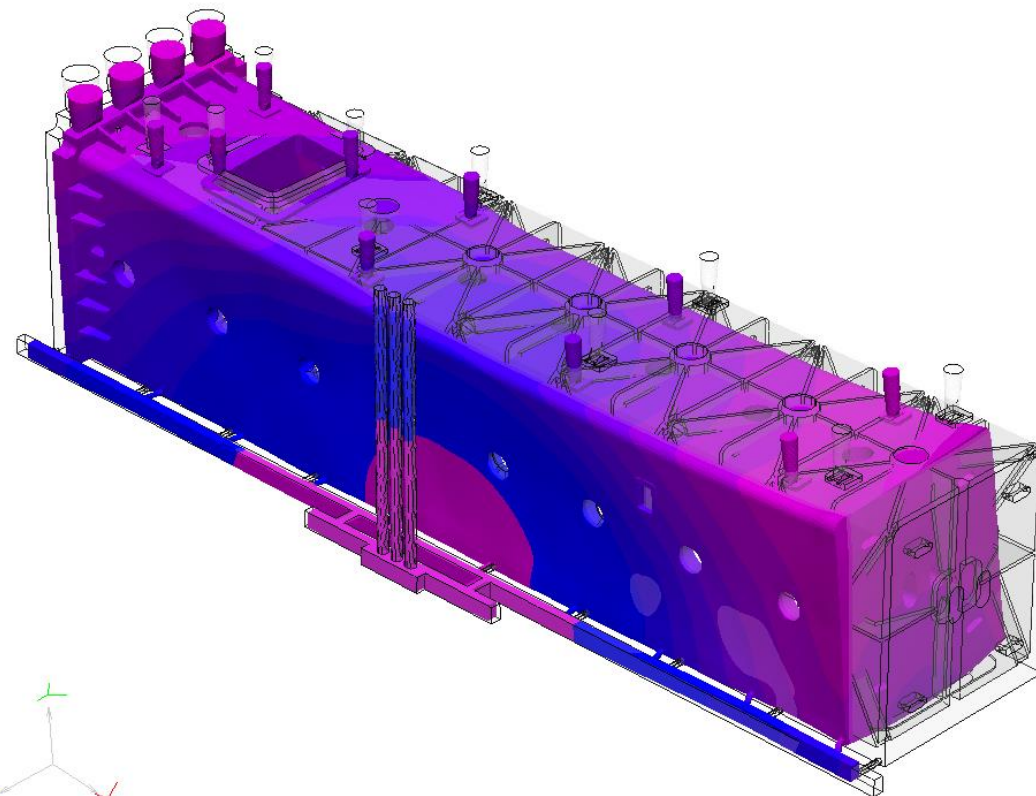


Верификация расчета тепловых полей при радиационном теплообмене в вакууме



## РЕШАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ НООКЕ

- Разные модели для отливки и формы
- Контакт с формой (затрудненная усадка)
- Остаточные напряжения
- Накопленные (пластические) деформации
- Критерий горячих трещин
- Критерии разрушения (холодные трещины)
- Извлечение из формы
- Удаление элементов ЛПС
- Спец. модели для непрерывного литья
- Экспорт в CAD

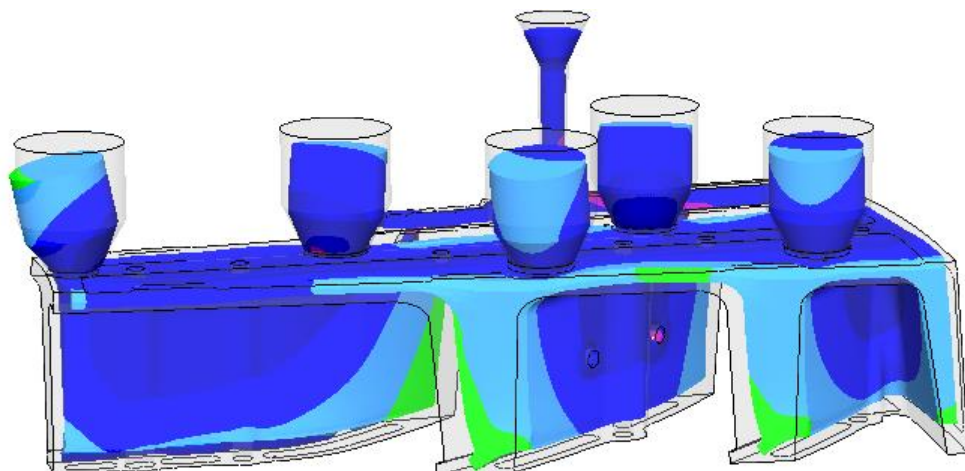


Time, s: 4500

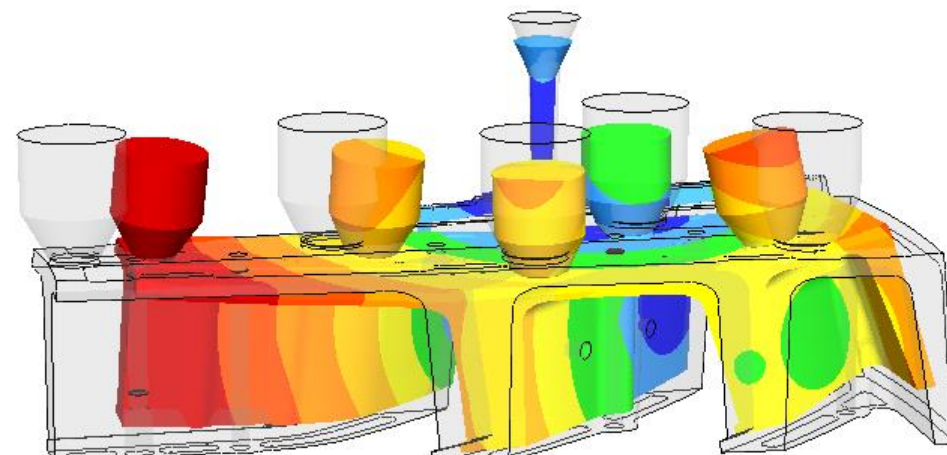
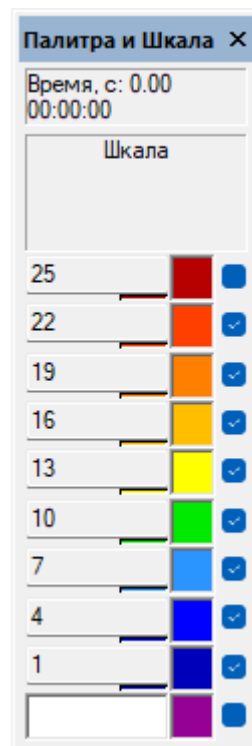
*Деформация отливки  
(ООО «Литейный завод «Петрозаводскмаш»)*



## РЕШАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ НООКЕ

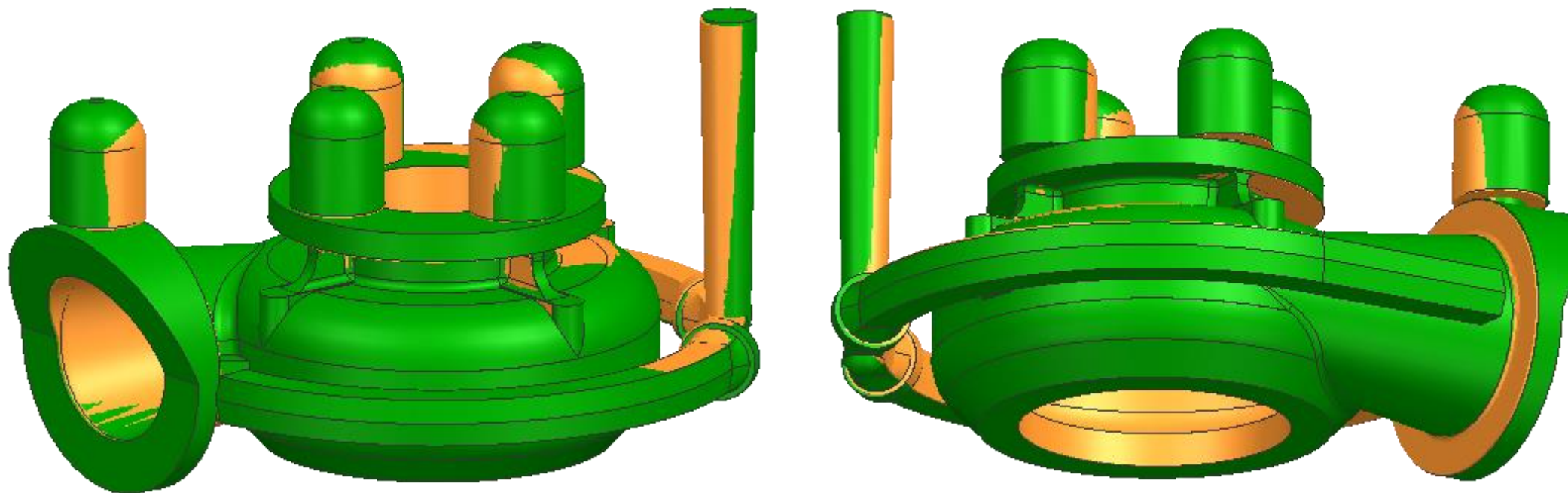


*Расчет корабля с жесткой формой*



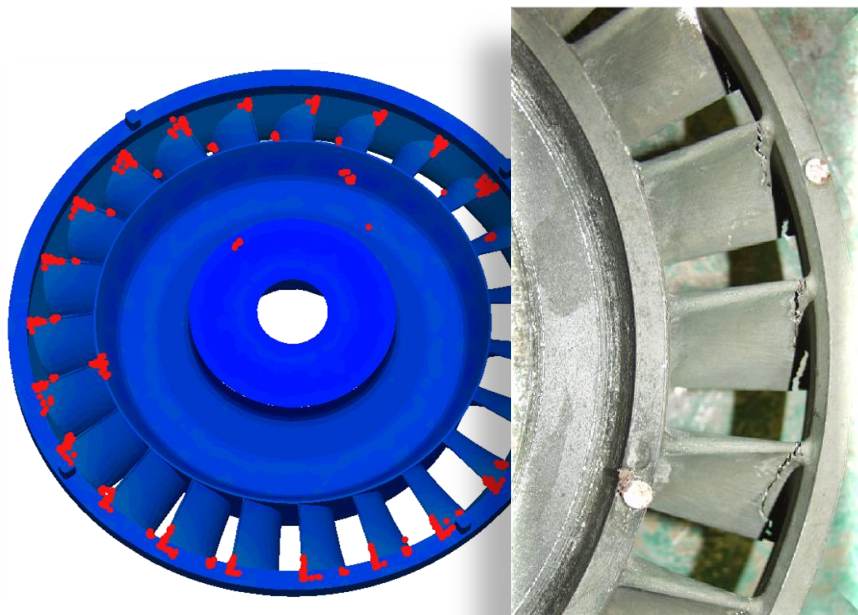
*Расчет корабля с линейно-упругой формой*

## РЕШАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ НООКЕ

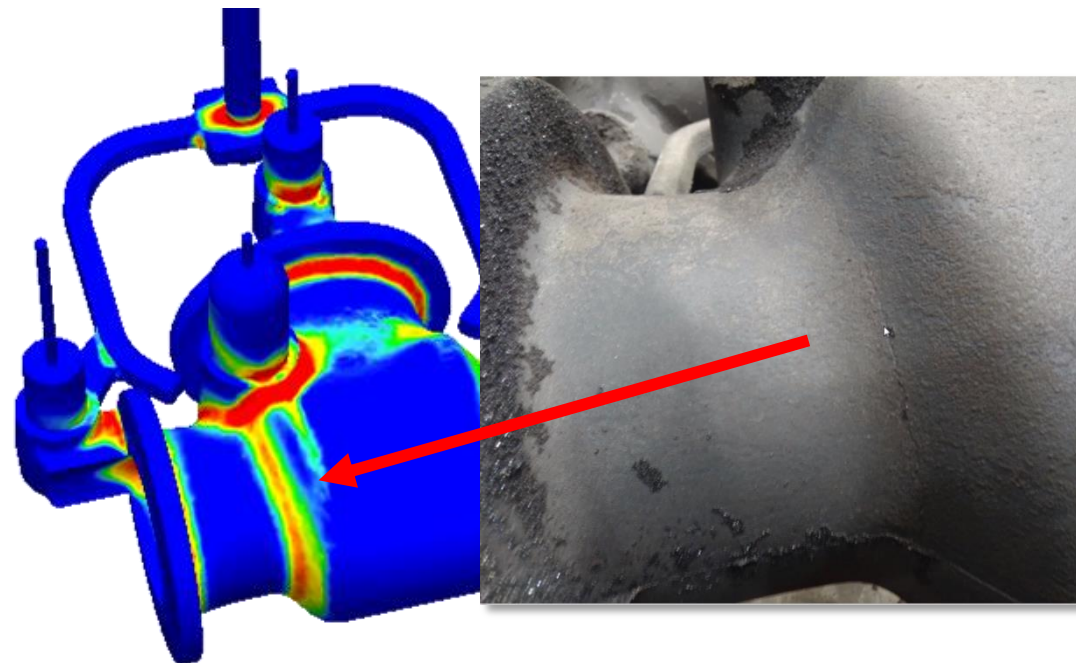


*Импорт деформированной STL-модели в CAD*

## РЕШАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ НООКЕ



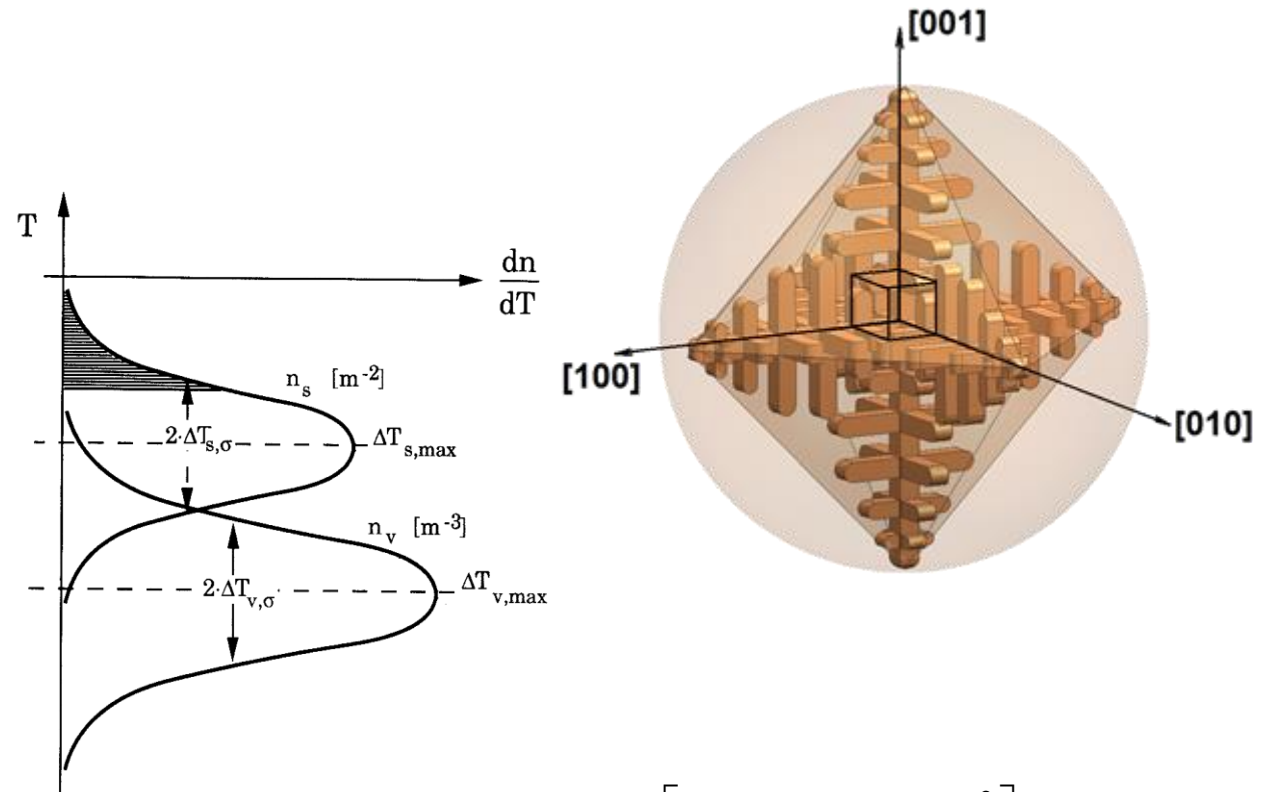
*Прогноз образования холодных трещин  
(ПК «Салют» АО «ОДК»)*



*Индикатор горячих трещин  
(АО «БАЗ»)*

## РЕШАТЕЛЬ MACROSTRUCTURE

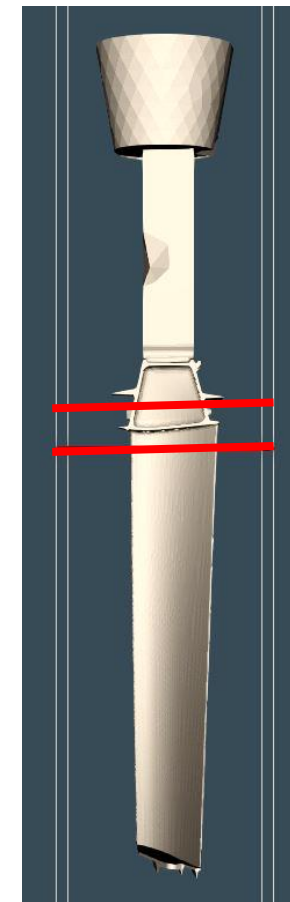
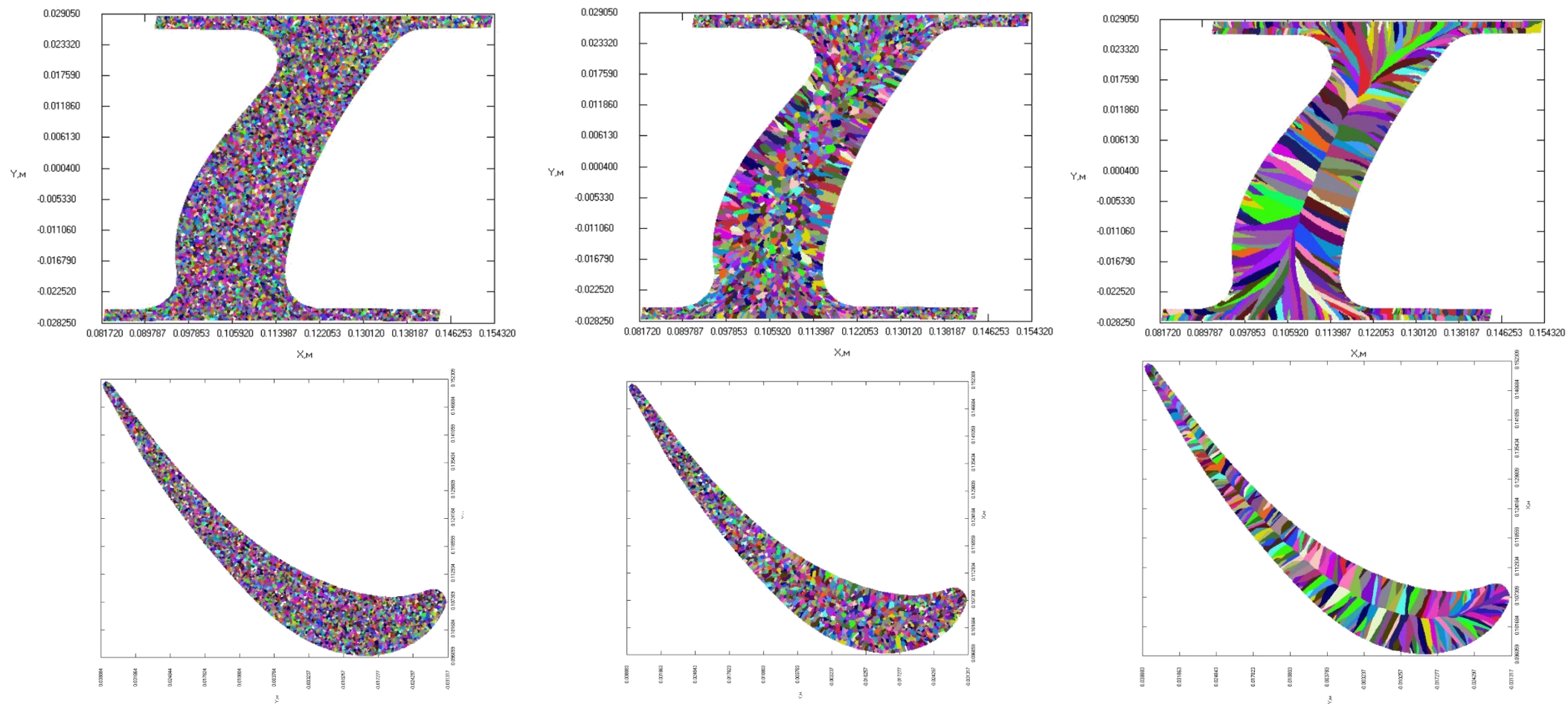
- Моделирование зарождения и роста столбчатых, равноосных структур и монокристаллов
- Переход от столбчатой к равноосной структуре
- Конкурентный рост зерен
- Прогнозирование паразитных кристаллов в монокристаллических деталях
- Равноосное литье (ЛВМ, ПФ, изложницы)
- Направленная кристаллизация
- Монокристалльное литье



$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\Delta T_{\sigma} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta T - \Delta T_{\max}}{\Delta T_{\sigma}} \right)^2 \right]$$



## РЕШАТЕЛЬ «МАКРОСТРУКТУРА»

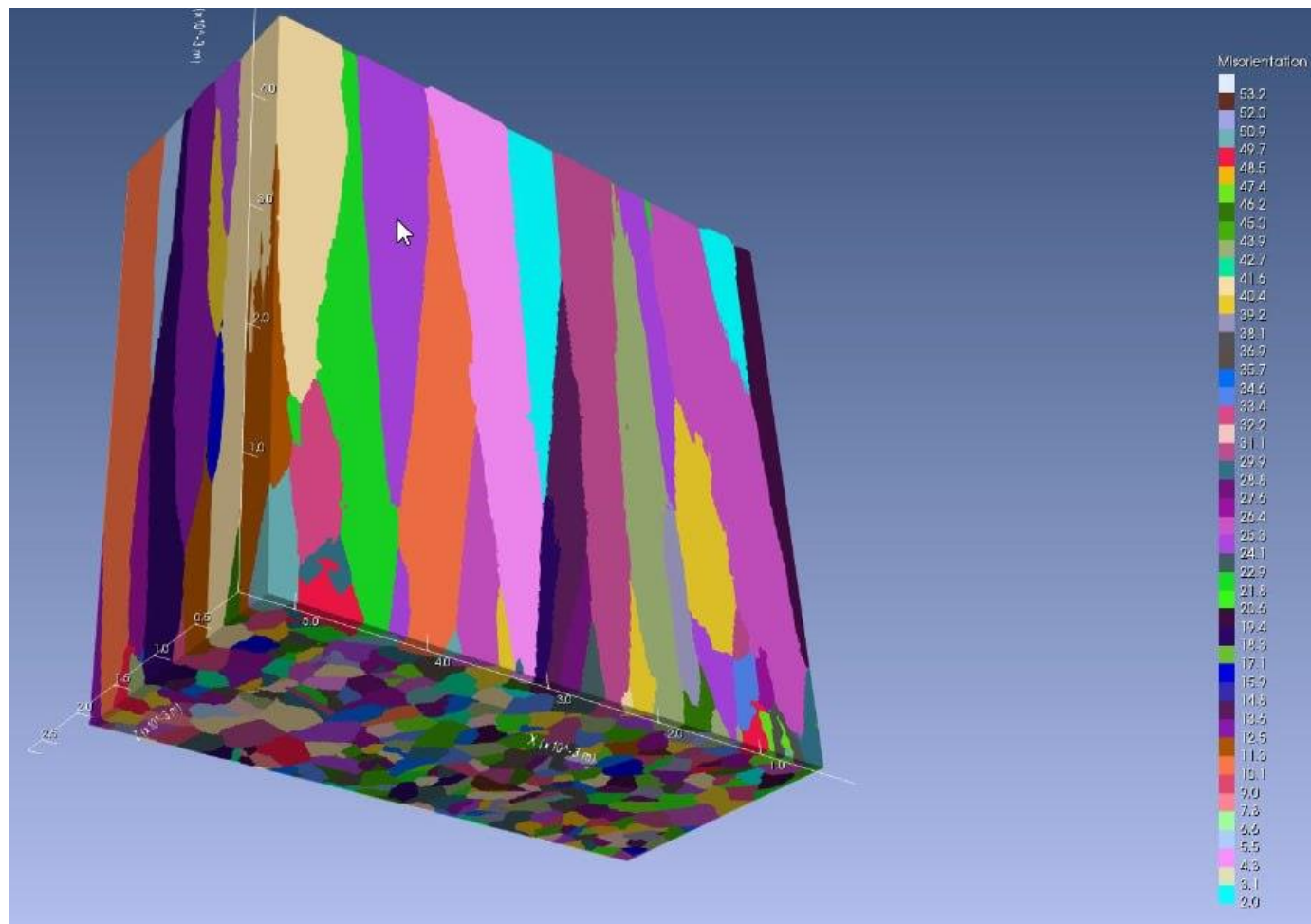


*Макроструктура выбранных сечений лопатки в зависимости от условий затвердевания*

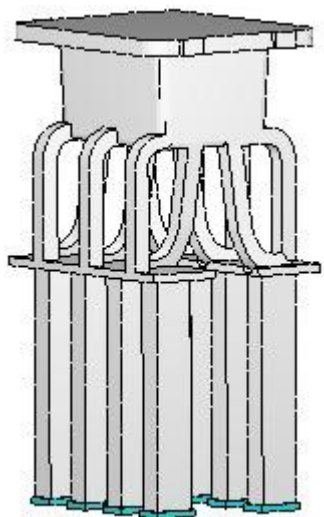
## РЕШАТЕЛЬ «МАКРОСТРУКТУРА»

Начиная с версии 2024.1

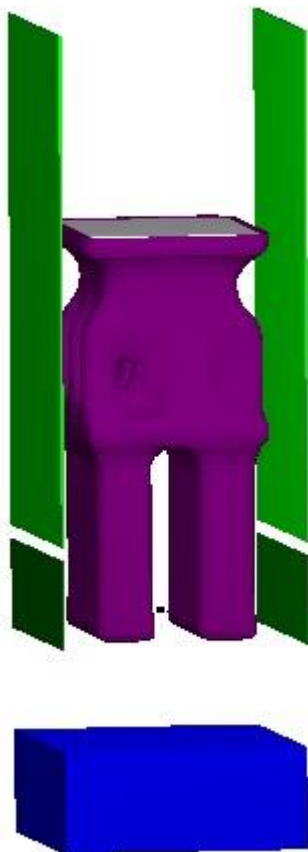
Доступна 3D версия решателя











## РЕШАТЕЛЬ «МАКРОСТРУКТУРА». Применение



Блок образцов

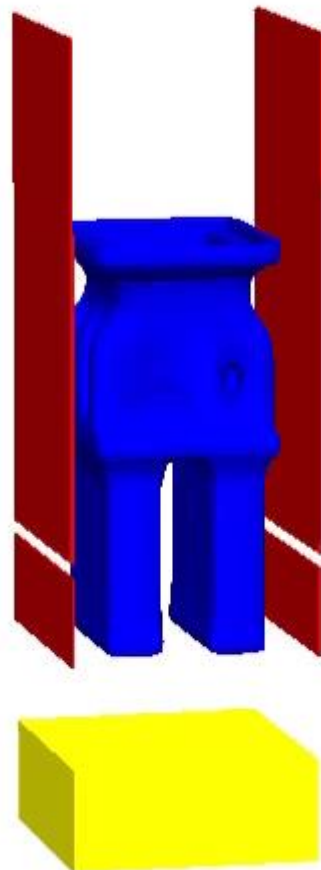


Форма в пространстве ВПУ

Температурные режимы		
<div> <div>Создать</div> <div>Импорт...</div> <div>Экспорт...</div> <div>Применить</div> <div>Заккрыть</div> <div>Фильтры: Все</div> </div>		
ЛВМ в вакууме		
Комментарий		
Имя	Режим	Значение
5  Корпус плавильной установки (нерж. сталь)	Температура от времени	
Температура, °C	 Значение	100
6  Верхние нагреватели (Графит)	Температура от времени	
Температура, °C	 Значение	1560
7  Нижние нагреватели (Графит)	Температура от времени	
Температура, °C	 Значение	1640
9  Al жидкий	Температура от времени	
Температура, °C	 Значение	840

## РЕШАТЕЛЬ «МАКРОСТРУКТУРА». Применение

Температура, С	Жидкая фаза, %
1560 С	<input checked="" type="checkbox"/>
1367.5 С	<input checked="" type="checkbox"/>
1175 С	<input checked="" type="checkbox"/>
982.5 С	<input checked="" type="checkbox"/>
790 С	<input checked="" type="checkbox"/>
597.5 С	<input checked="" type="checkbox"/>
405 С	<input checked="" type="checkbox"/>
212.5 С	<input checked="" type="checkbox"/>
20 С	<input checked="" type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>



СКМ ЛП "ПолигонСофт"  
www.poligonsoft.ru

Параметры и запуск расчёта

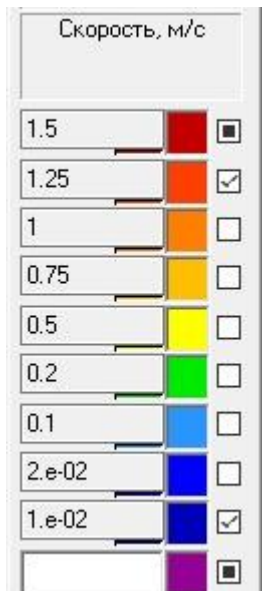
Общие Течение **Затвердевание** Пористость Напряжения Термообработка Непрерывное литье

Параметр	Значение
<input checked="" type="checkbox"/> Использовать модель затвердевания	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Запись файла результатов отливки	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Запись файла результатов формы	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Шаг расчёта, с	50
<input checked="" type="checkbox"/> Шаг записи, с	50
<input type="checkbox"/> Окончание расчёта	Время
<input checked="" type="checkbox"/> Время, с	12600
<input checked="" type="checkbox"/> Температура, °С	1450
<input checked="" type="checkbox"/> ... температуры из результатов расчёта течения	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Радиационный теплообмен	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Файл начальных температур отливки	
<input type="checkbox"/> Файл начальных температур формы	
<input type="checkbox"/> Файл тепловых потоков	
<input type="checkbox"/> Файл электро-свойств	
<input type="checkbox"/> Файл перемещений/лучеиспускания	...oligon\DATA\ЛБМ в вакууме.mve

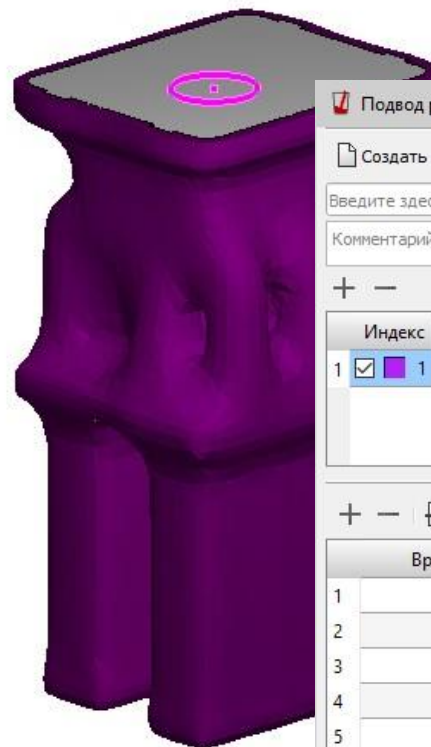
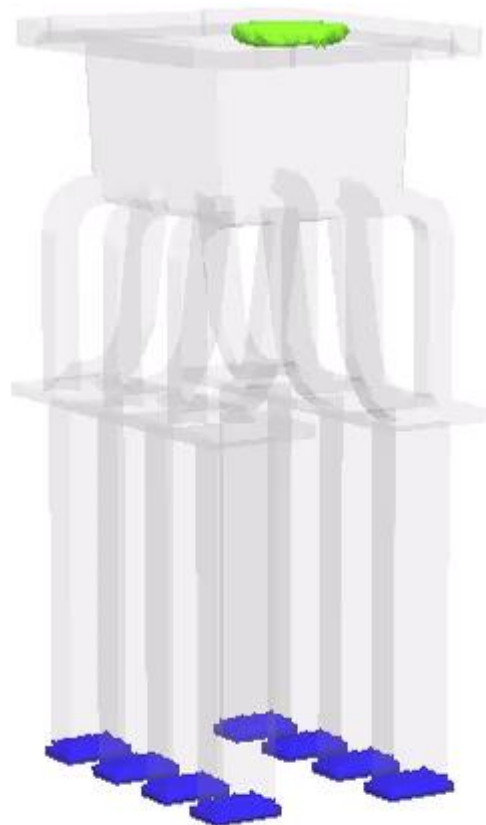
☒ Продолжить расчёт ☒ Расчёт



## РЕШАТЕЛЬ «МАКРОСТРУКТУРА». Применение



Заполнение формы  
расплавом



СКМ ЛП "ПолигонСофт"  
[www.poligonsoft.ru](http://www.poligonsoft.ru)

Подвод расплава

Создать

Импорт...

Экспорт...

Применить

Закреть

Фильтры: Все

Введите здесь имя набора данных

Комментарий

+

-

Привязать к узлу сетки

Индекс	Тип	Ø, мм	Режим скорости	Скорость, м/с	Включение	Отключение
1	Подвод	40	Кривая	0.324 - 0.324	Время: 0с	Заполнено: 100%

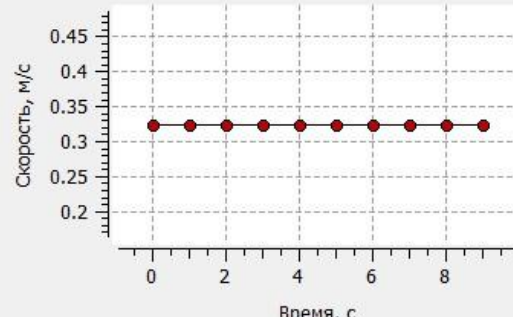
Время, с

Скорость, м/с

1	0	0.324
2	1	0.324
3	2	0.324
4	3	0.324
5	4	0.324
6	5	0.324
7	6	0.324

Скорость, м/с

Время, с



Остановка расчёта течения

Время, с

0











Отключение подвода

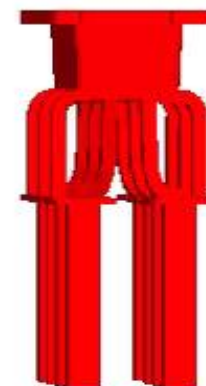
1

и пауза, с

0

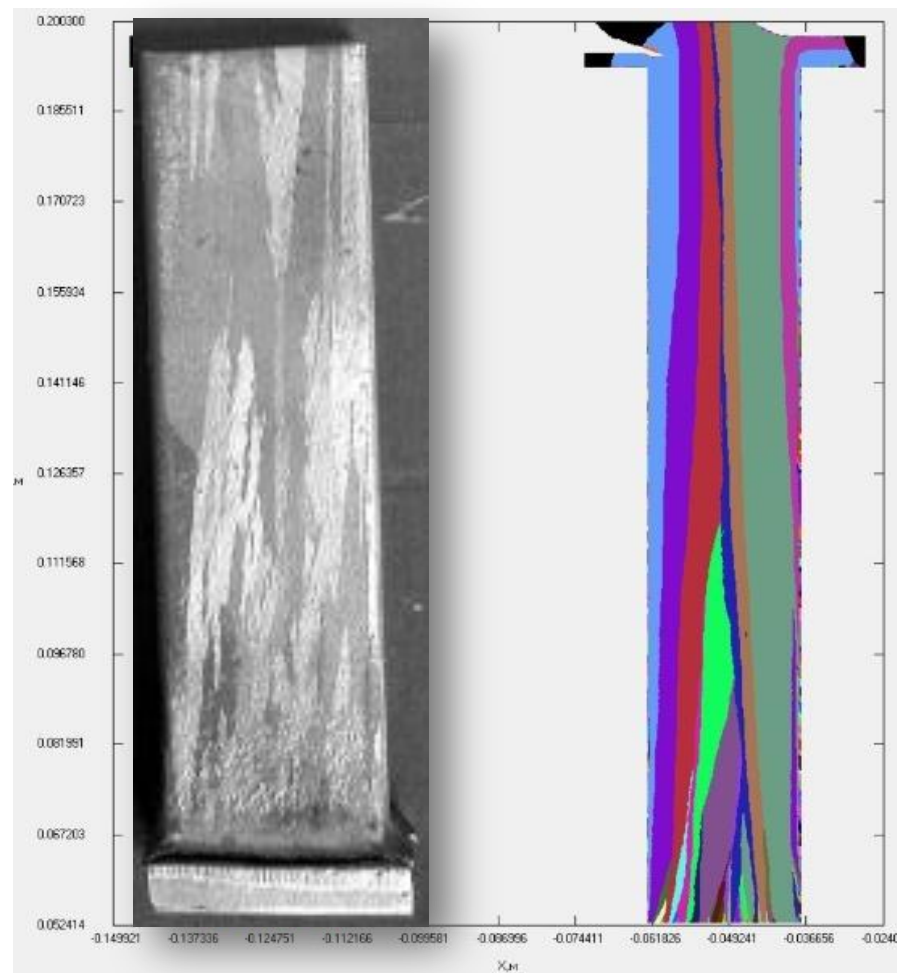
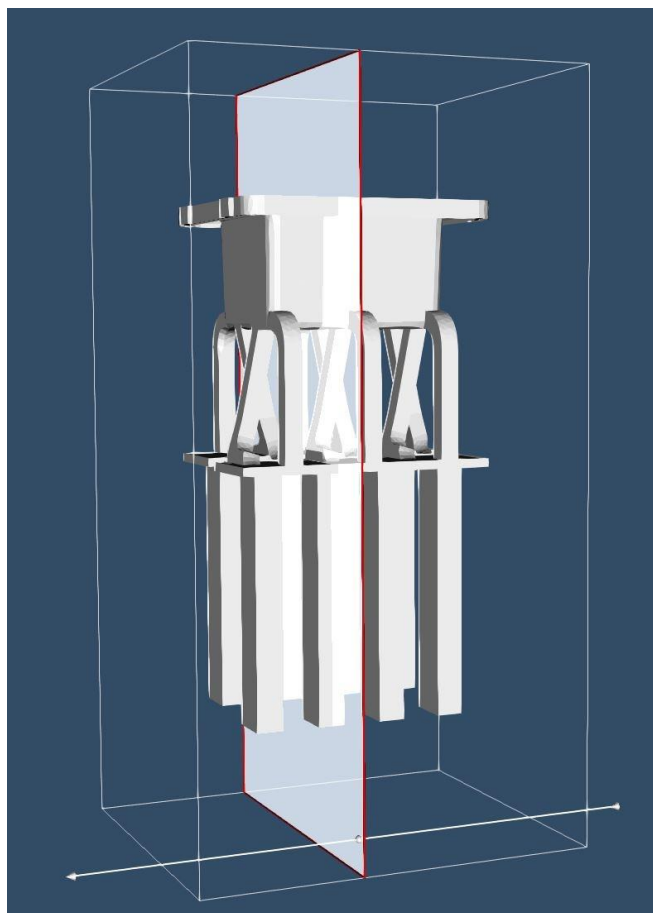
## РЕШАТЕЛЬ «МАКРОСТРУКТУРА». Применение

Температура, С		
Жидкая фаза, %		
Тл=1401 Тс=1258		
100 %		<input type="checkbox"/>
80 %		<input checked="" type="checkbox"/>
70 %		<input checked="" type="checkbox"/>
60 %		<input checked="" type="checkbox"/>
50 %		<input checked="" type="checkbox"/>
40 %		<input checked="" type="checkbox"/>
25 %		<input checked="" type="checkbox"/>
10 %		<input checked="" type="checkbox"/>
1 %		<input checked="" type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>



*Затвердевание*

## РЕШАТЕЛЬ «МАКРОСТРУКТУРА». Применение



0	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34
35	36	37	38	39	40	41
42	43	44	45			

## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

- Для сталей по ГОСТ 1050-2013, 19281-2014, 21357-87, 4543-2016, 977-88
- Стали для отливок и деформируемые стали
- Закалка
- Нормализация
- Отжиг
- Отпуск
- Микроструктура (феррит, перлит, бейнит, мартенсит)
- Твердость
- Предел текучести
- Временное сопротивление
- Относительное удлинение

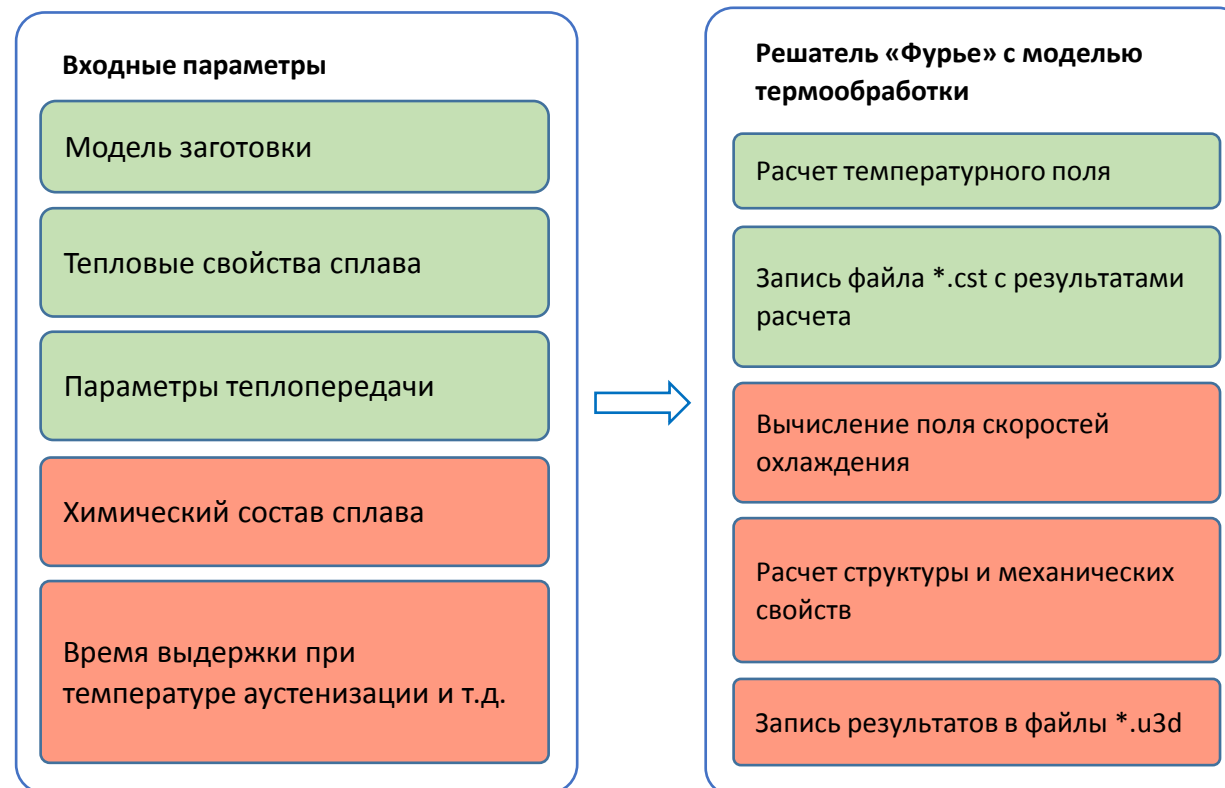


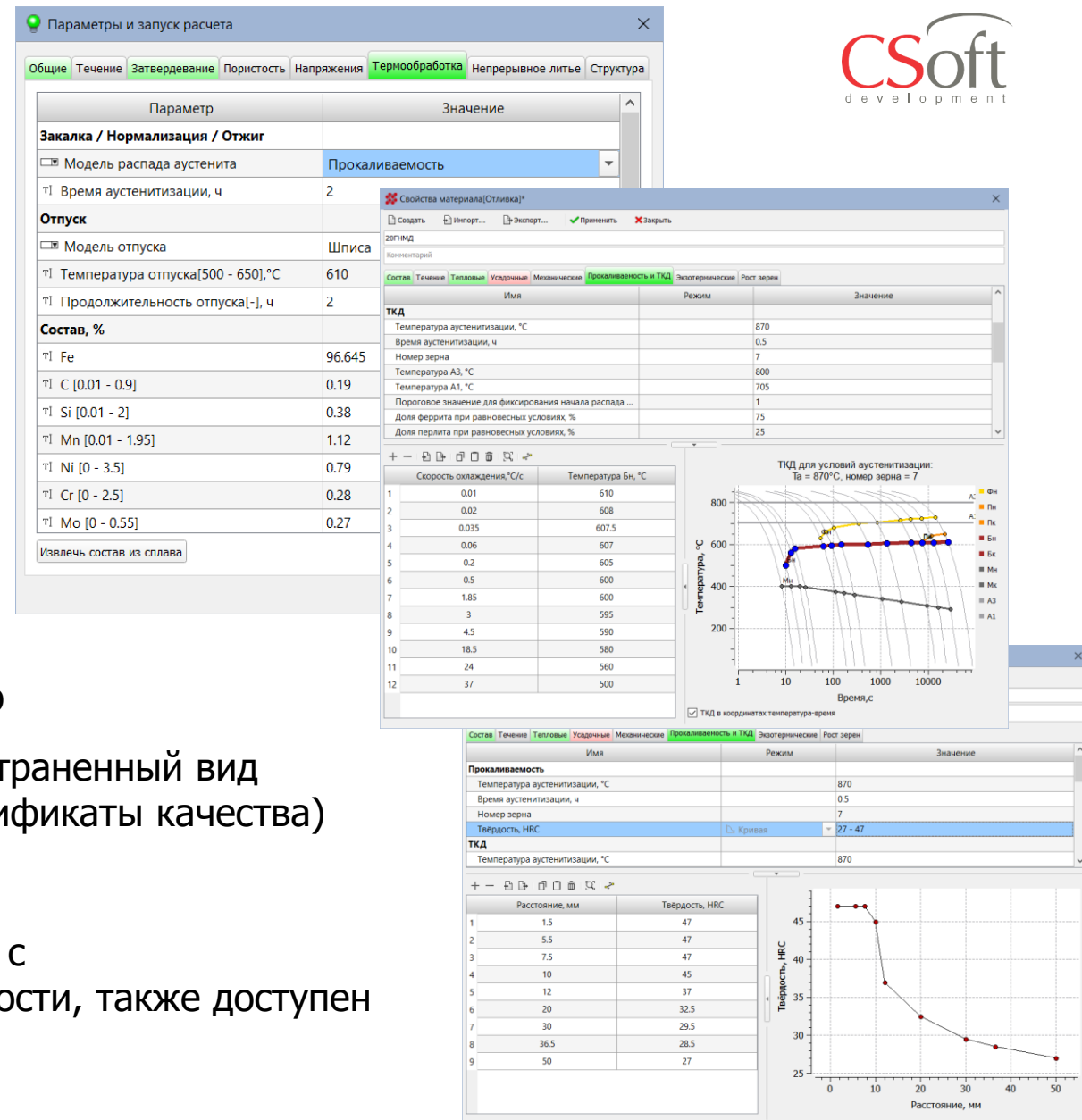
Схема интеграции модели ТО в состав решателя Fourier



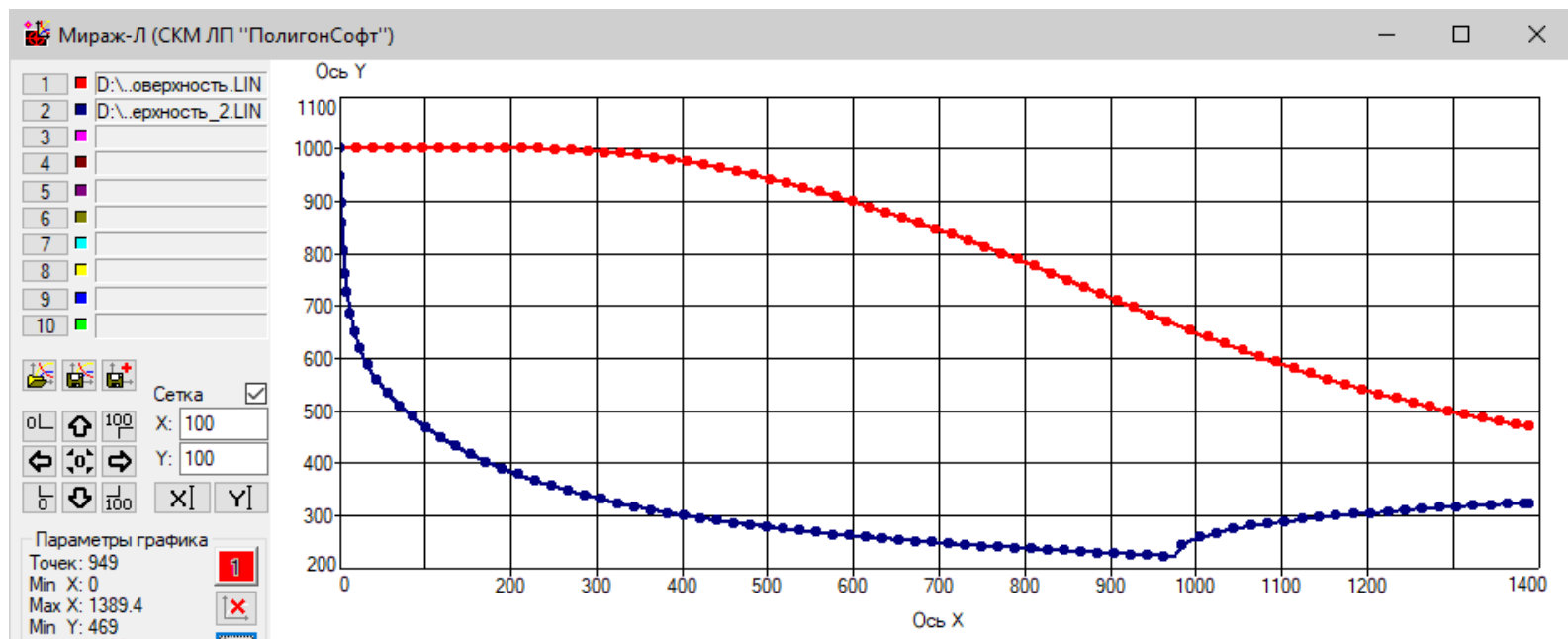
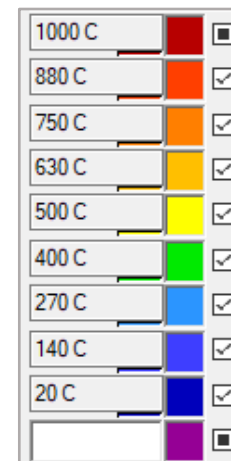
## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

Начиная с версии 2024.1 доступны статистические и физически обоснованные модели:

- Группа физически обоснованных моделей на базе:
  - уравнение Джейсона-Мела-Аврами-Колмогорова для диффузионных превращений
  - правило аддитивности Шейла-Кана
  - уравнение Койстинена-Марбургера для мартенситного превращения
- Статистические модели на основе методики Крезю-Луар
- На основе данных о прокаливаемости (широко распространенный вид испытаний, данные которых в том числе включают в сертификаты качества)
- Модели отпуска по Крезю-Луар, Шпису, Юсту
- В составе POLIGONSOFT поставляется база материалов с термокинетическими диаграммами и кривым прокаливаемости, также доступен ввод данных пользователя.



## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

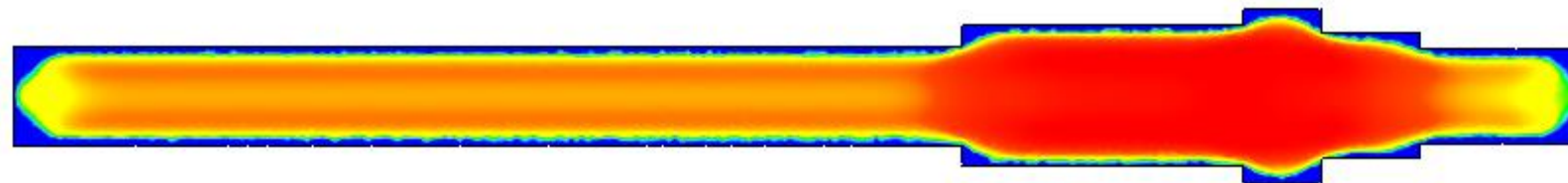


## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

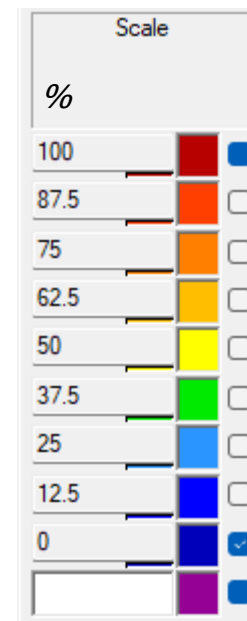
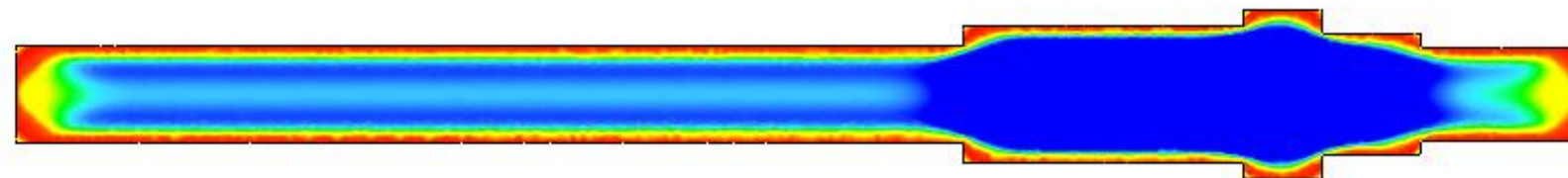
*Мартенсит*



*Феррито-  
перлитная смесь*



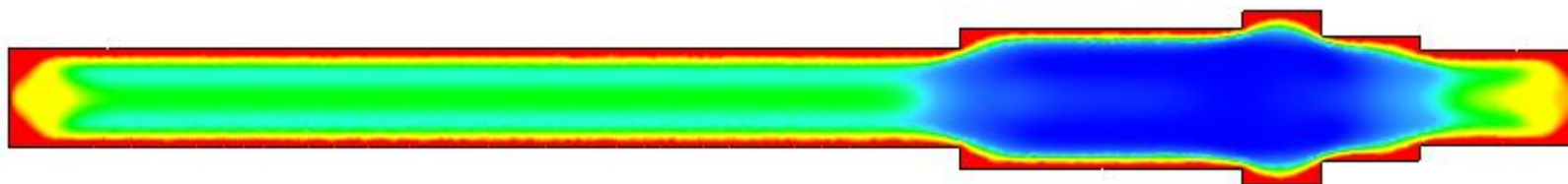
*Бейнит*



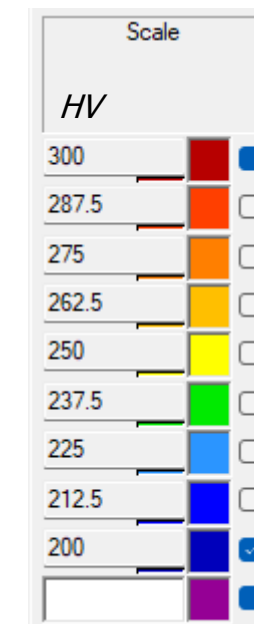
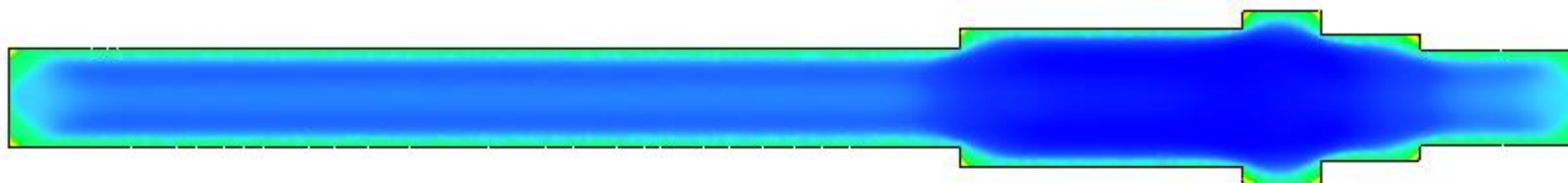
Микроструктура вала из стали 40Х после термической обработки

## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

*После закалки*



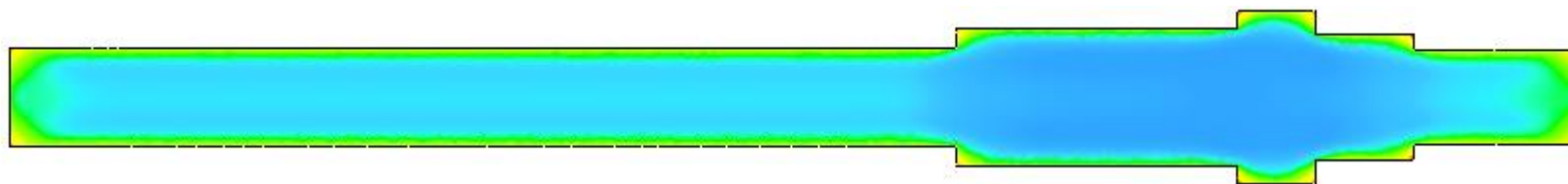
*После отпуска*



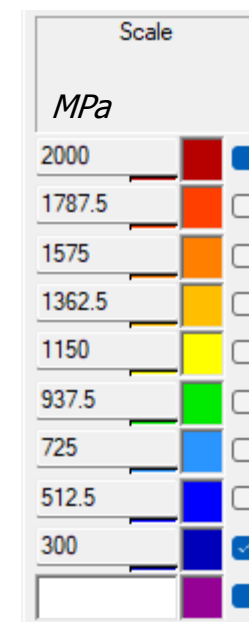
*Твердость по Виккерсу*

## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

*После закалки*



*После отпуска*



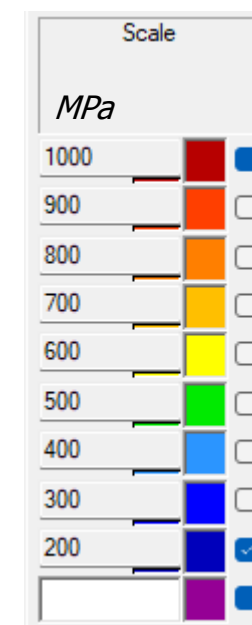
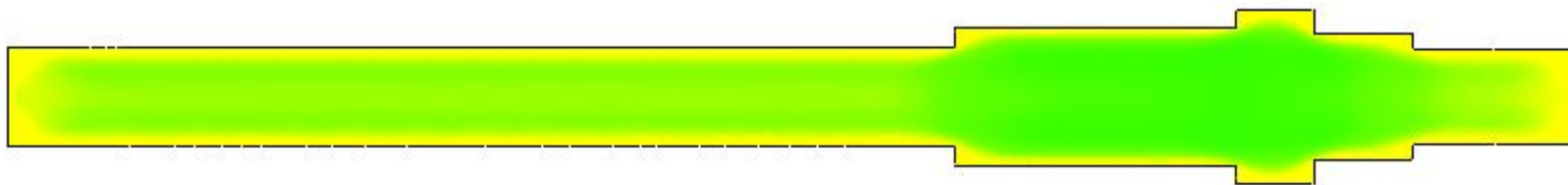
*Временное сопротивление*

## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

*После закалки*



*После отпуска*



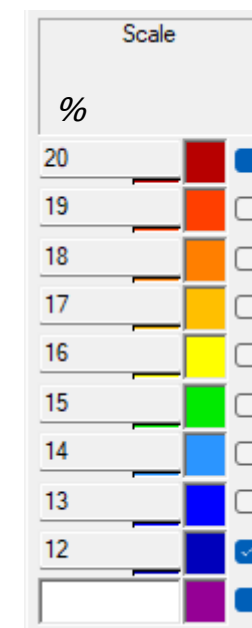
*Предел текучести*

## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

*После закалки*



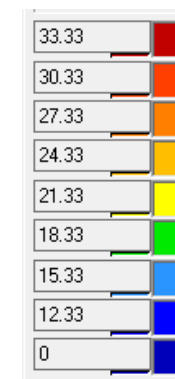
*После отпуска*



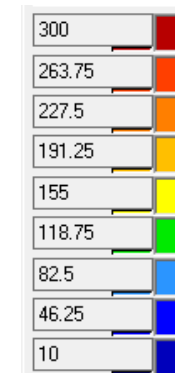
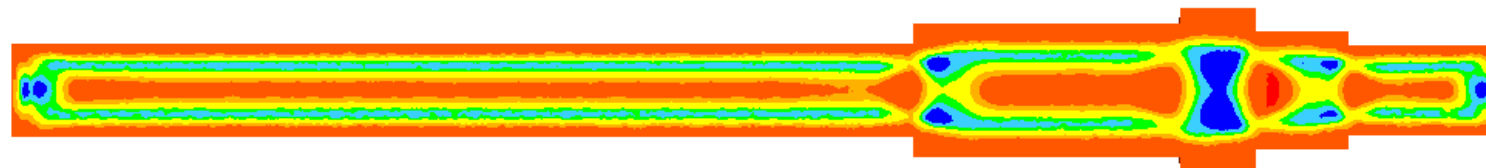
Относительное удлинение

## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

*Изменение размеров,  
мм (масштаб 10:1)*



*Интенсивность  
напряжений, МПа*



*Остаточные напряжения после закалки*



## РЕШАТЕЛЬ «ТЕРМООБРАБОТКА»

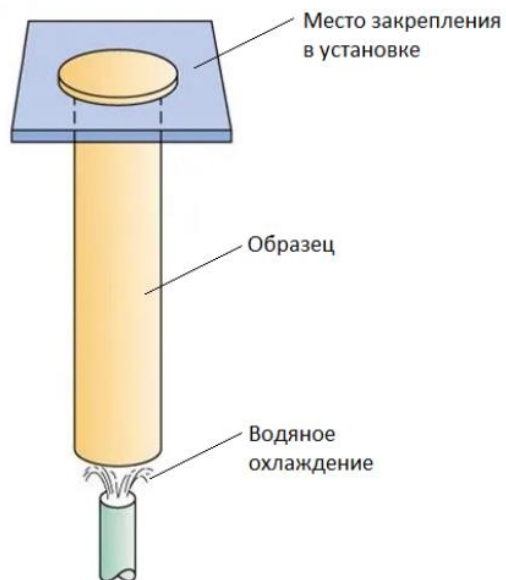
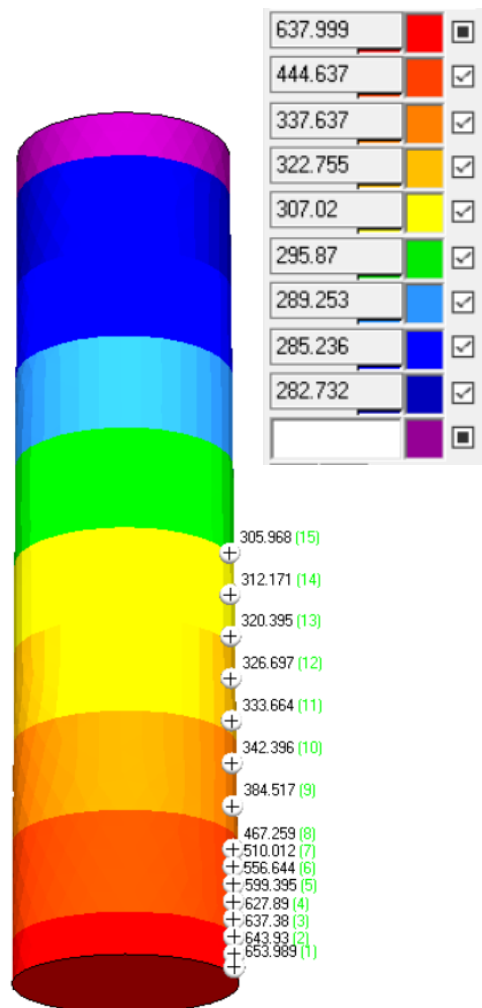
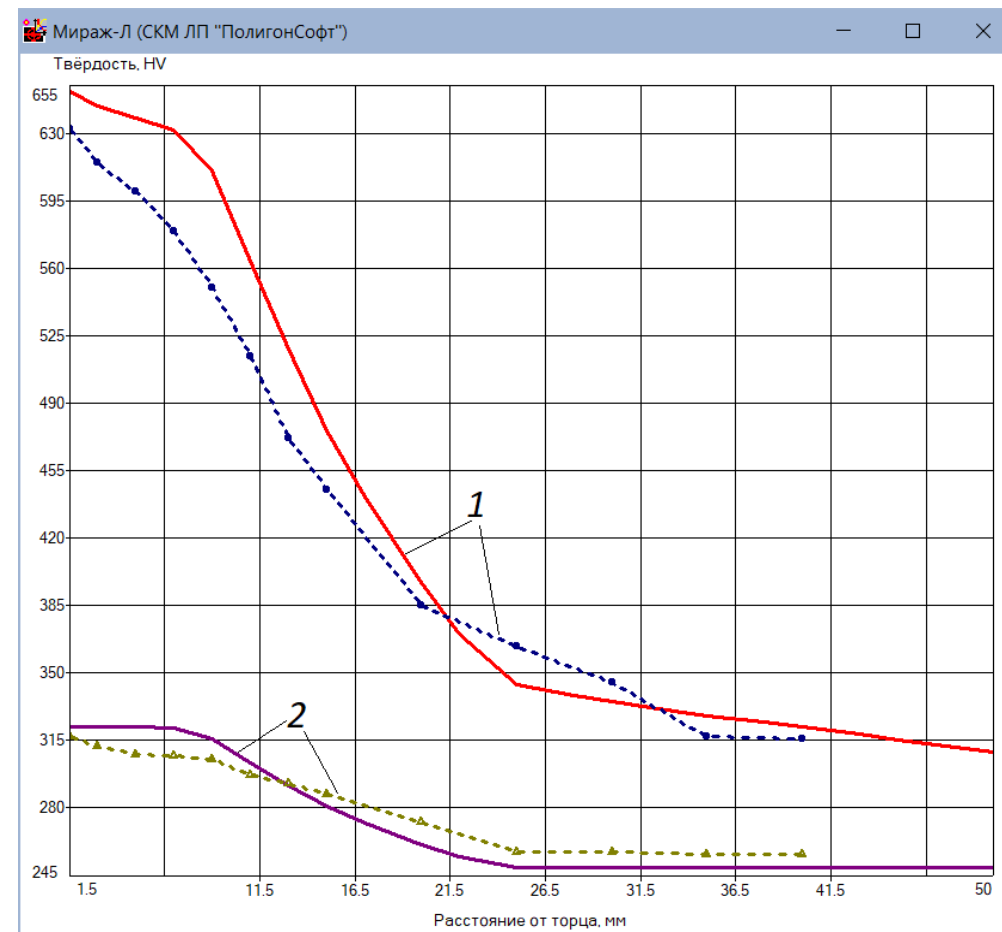


Схема испытания на прокаливаемость по ГОСТ 5657 (по Джомини)



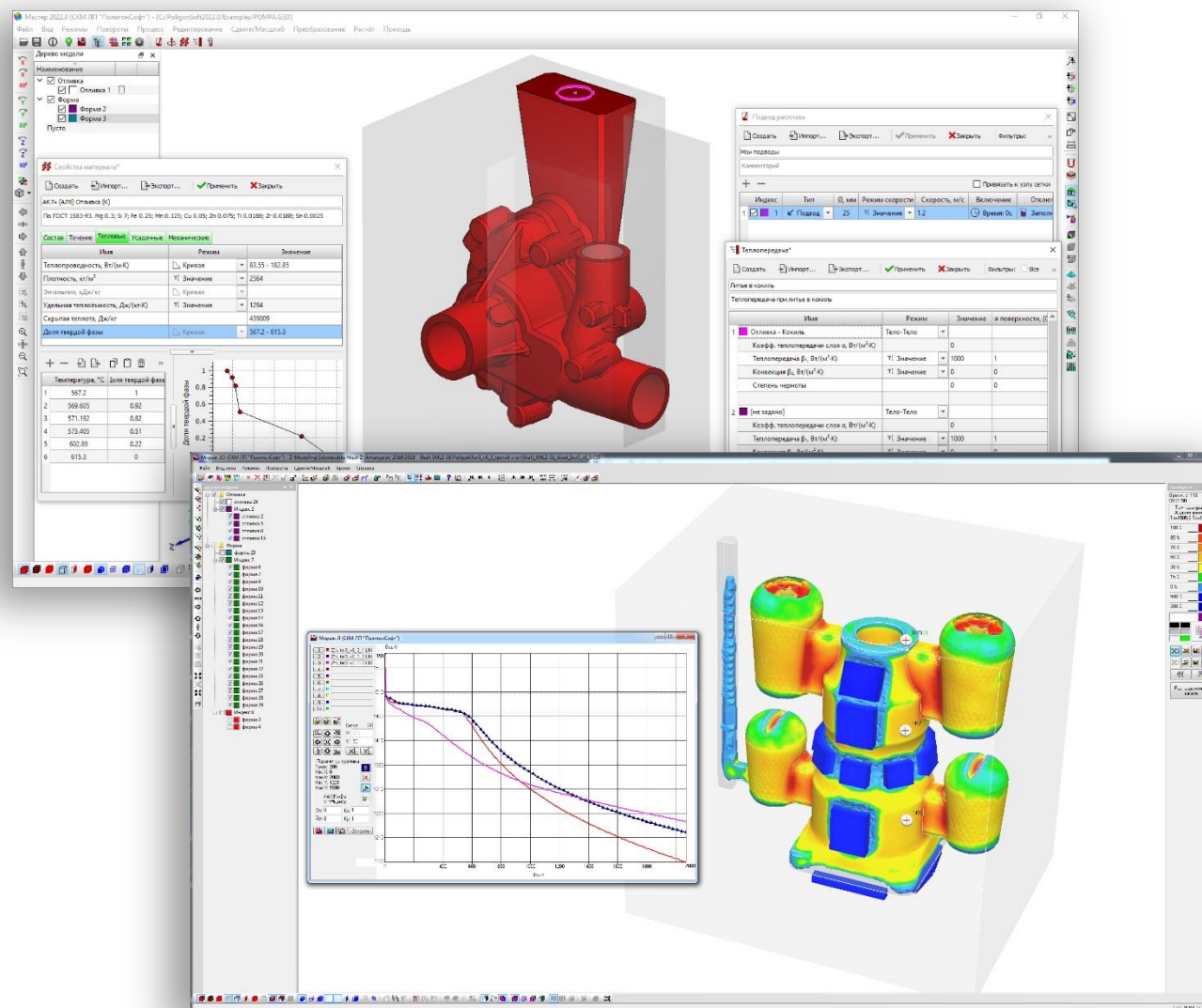
Результат расчёта твёрдости (HV) в закалённом образце из стали марки 38ХГМ



Распределение твердости по высоте пробы (сплошные линии — расчет, пунктирные — эксперимент):  
1 — после торцевой закалки; 2 — после отпуска

## ПРЕИМУЩЕСТВА

- Точность расчета дефектов усадки (раковины, макро- и микропористость)
- Точность расчета заполнения формы расплавом
- Лучшая модель непрерывного литья заготовок
- Шаблоны технологических процессов
- Бесплатный пре- и постпроцессинг
- Многопоточные вычисления
- Русскоязычный интерфейс и документация
- Связь с командой разработчиков
- Лицензированный учебный центр
- Профессиональная поддержка пользователя
- Отсутствие политики штрафов





---

**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**

**CSDEV.RU/+7 (495) 069-44-44**

