

АЛЮМИНИЕВАЯ  
АССОЦИАЦИЯ

V Международная научно-практическая  
КОНФЕРЕНЦИЯ

«Новое в сварке, наплавке при производстве изделий из  
алюминия и алюминиевых сплавов»

**Современные цифровые технологии оценки  
свариваемости алюминиевых сплавов**

Королев Сергей Анатольевич, к.т.н.,  
ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана»

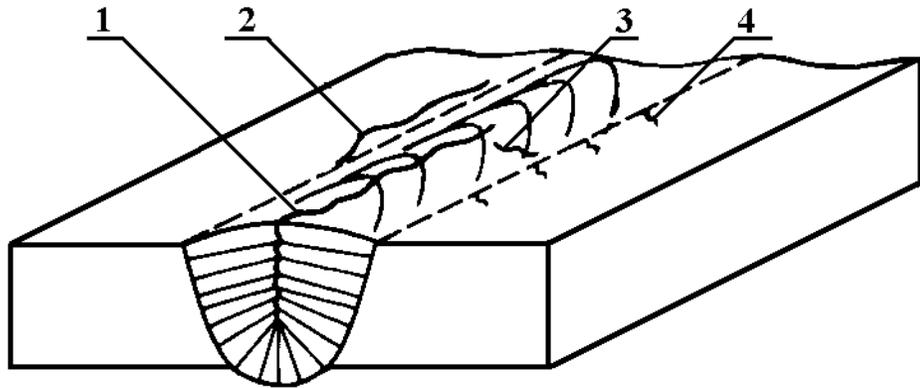
# Основные показатели свариваемости алюминиевых сплавов

2

## Склонность к образованию горячих трещин

### Причины:

- эвтектика в процессе кристаллизации;
- крупное зерно ОШЗ, наследуемое швом;
- высокий уровень высокотемпературных деформаций



Горячие трещины – нарушения сплошности материала, происходящие при высокой температуре

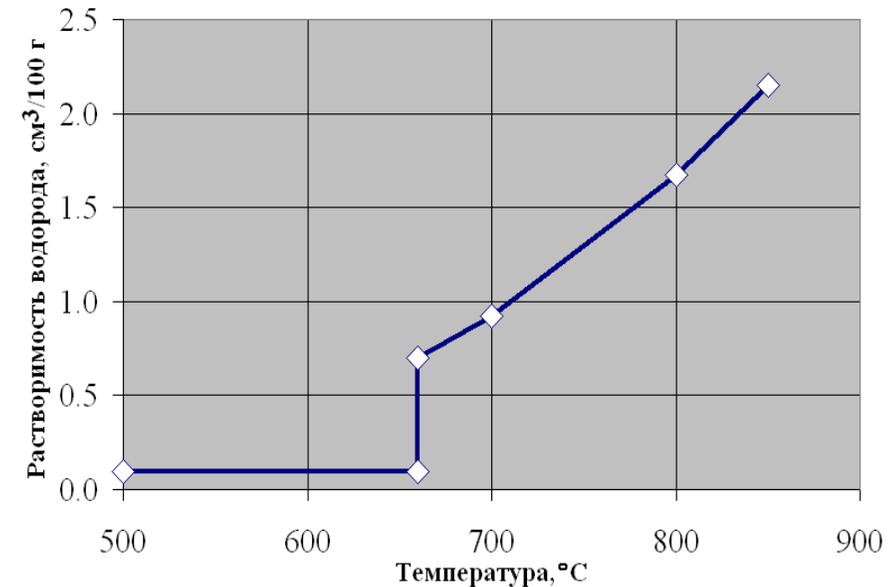
Продольные в шве (1) и ОШЗ (2), поперечные в шве (3) и ОШЗ (4).

Кристаллизационные (1, 3) и ликвационные (2,4).

## Склонность к образованию пор

### Причины:

- высокая растворимость водорода в жидком Al (малая растворимость водорода в твердом металле);
- кратковременность процесса кристаллизации



### Основной способ борьбы

- устранение источников поступления водорода в зону дуги.

# Экспериментальная оценка сопротивляемости образованию ГТ 3

Существующее оборудование для машинных методов применительно к сварному шву – установка ЛТП-1

ГОСТ 26389. Методы испытаний на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением (Николаев Г.А., Сахаров Ю.Н., Якушин Б.Ф., Мисюров А.И., Деев А.И.)

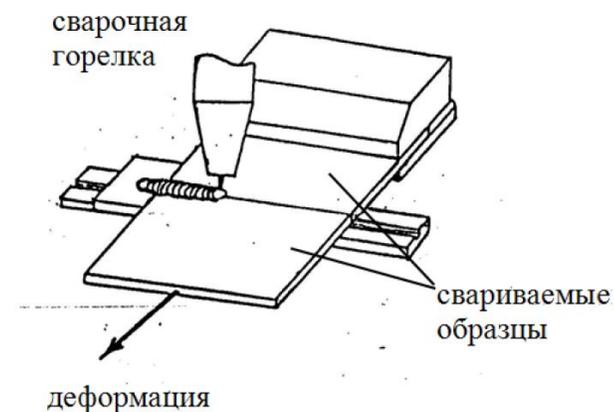
- Машинные методы;
- Технологические методы

ГОСТ Р ИСО 17641. Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию горячих трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки.

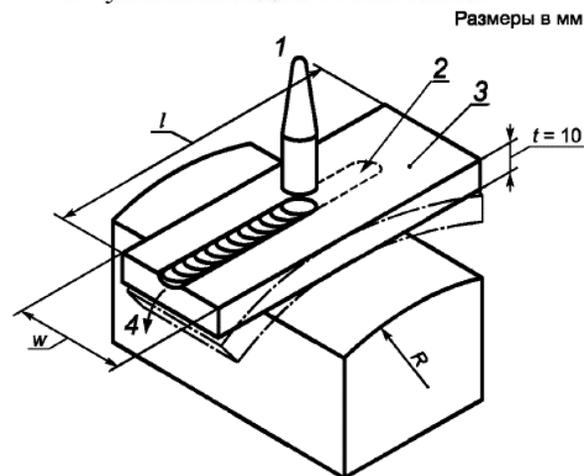
- Испытания с естественной жесткостью;
- Испытания с приложением внешней нагрузки.



а – установка для испытаний

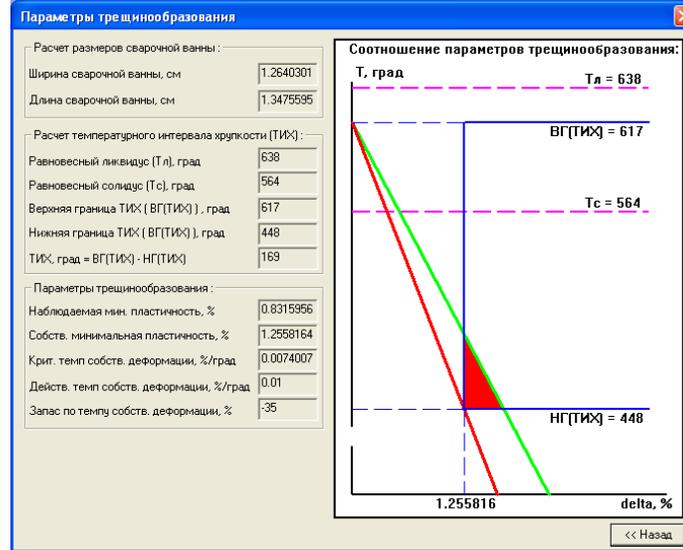
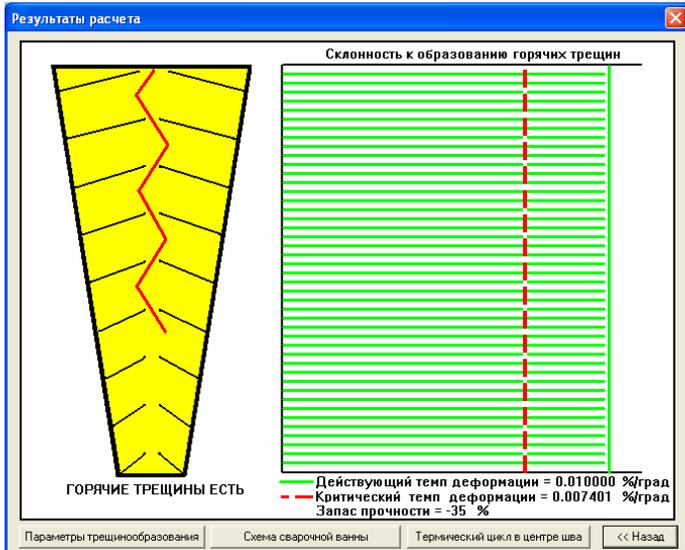
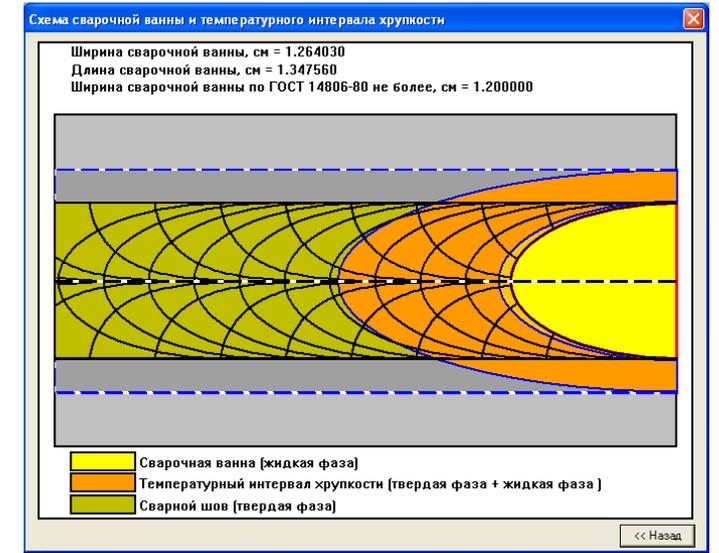
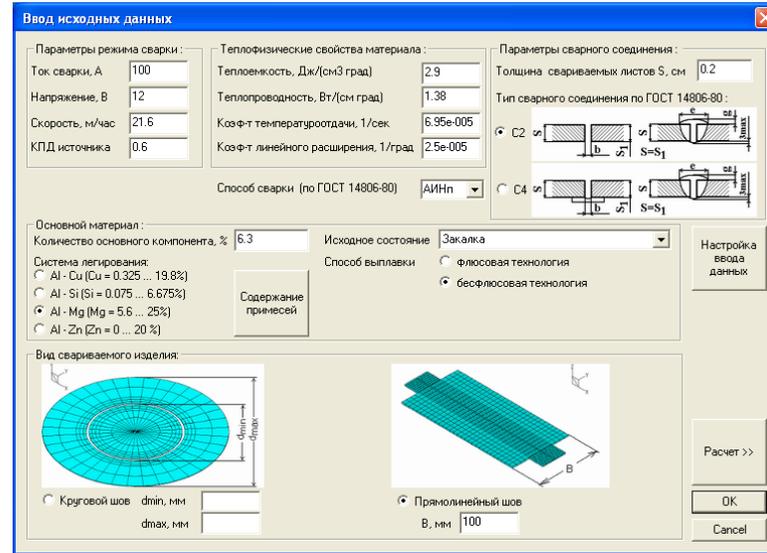
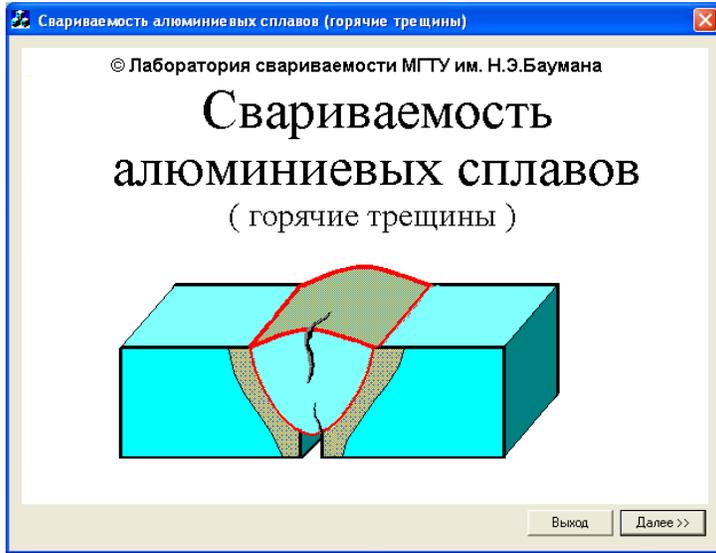


б – схема проведения испытаний



1 — положение горелки при изгибе образца; 2 — окончание сварки; 3 — образец; 4 — изменяемая гидравлической системой скорость изгиба образца

# Инженерный программный комплекс «Свариваемость алюминиевых сплавов» для оперативной оценки



# Факторы, влияющие на образование ГТ

5

## Геометрические особенности свариваемой конструкции

- Габаритные размеры,
- Толщина стенки,
- Вид сварного шва (стыковой, угловой, нестандартный),
- Разделка кромок (без разделки, с разделкой),
- Траектория сварного шва (прямолинейный, круговой или кольцевой, сложная траектория)

## Теплоотвод в сборочно-сварочные приспособления

- Материал изделия и приспособления;
- Шероховатость поверхностей свариваемых заготовок и приспособления в плоскостях контакта;
- Давление в месте контакта
- Геометрические характеристики приспособления

## Параметры распределения вводимой тепловой энергии

- **Линейный источник (Laser),**
- **Поверхностный плоский источник (TIG без присадочной проволоки при сварке стыкового соединения),**
- **Объемный источник (MIG, TIG + присадка),**
- **Комбинированный (поверхностный + объемный)**

## Технология сварки

- Способ сварки - **TIG, MIG, Laser**
- Режимы сварки

## Теплофизические и механические свойства свариваемого материала

- Химический состав,
- Фазовые превращения,
- Температура

Метод решения – **метод конечных элементов (3D), связанная задача.**

Программное обеспечение – **ANSYS 2020 R1 ACADEMIC** (лицензия МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Вычислительное оборудование – **вычислительный кластер МГТУ им. Н.Э. Баумана** (на базе Windows Server 2012 R2, 32 ядра)

Метод определения – **CALPHAD**

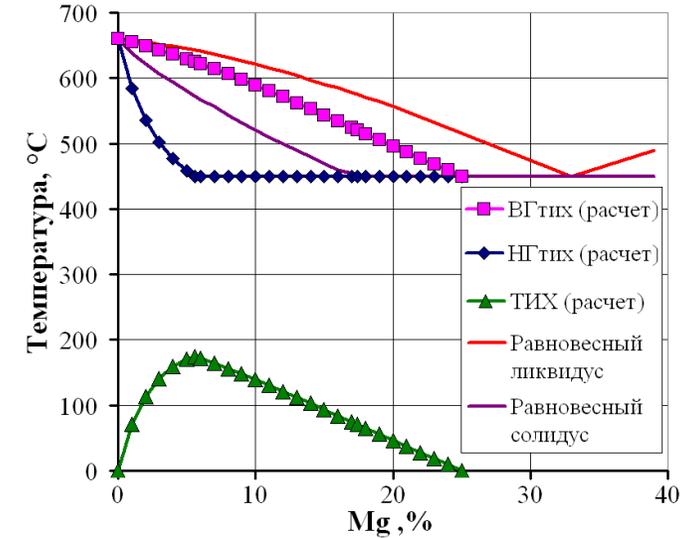
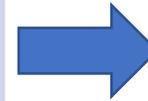
(CALculation of PHAse Diagrams),  
L. Kaufman

# Определение границ температурного интервала вероятного образования ГТ

## Модельные сплавы

(Al-Mg, Al-Cu, Al-Mn, Al-Si и т.д.)

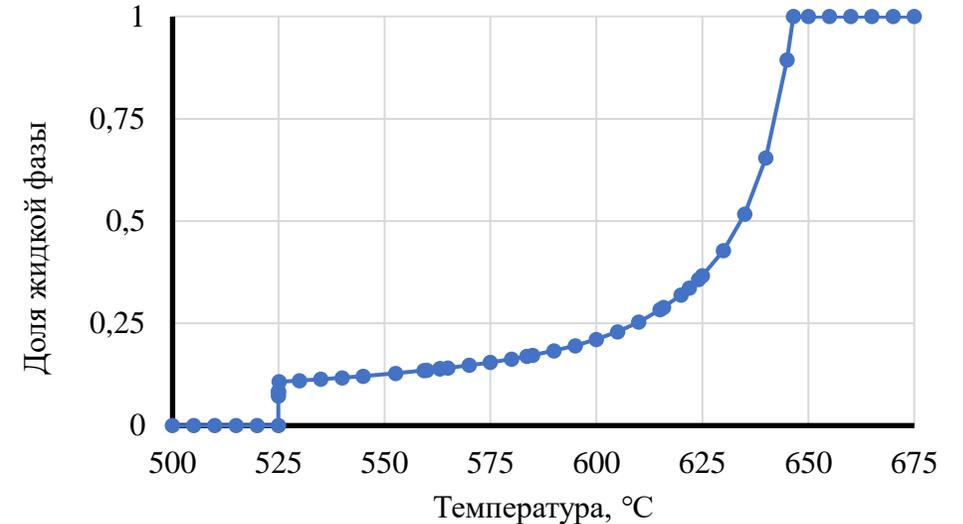
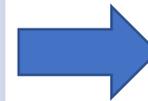
- Анализ равновесных диаграмм состояния двойных сплавов



## Сложные системы легирования

(Al-Cu-Mg, Al-Cu-Li, Al-Mg-Li, Al-Zn-Mg и т.д.)

- Анализ фазовых диаграмм на основе термодинамических баз данных численным методом – **CALPHAD** (программное обеспечение OpenCalphad 6.005)



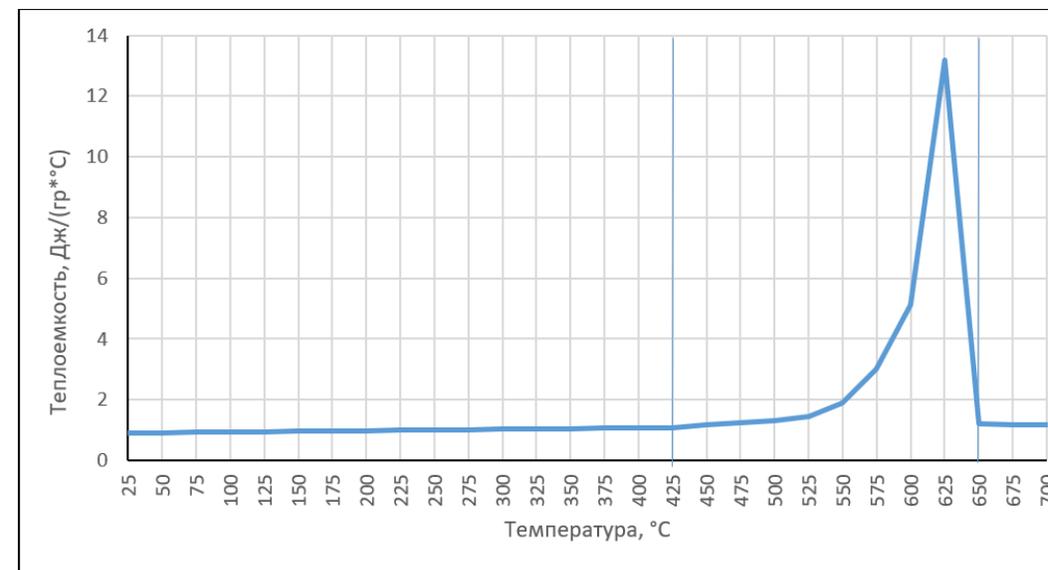
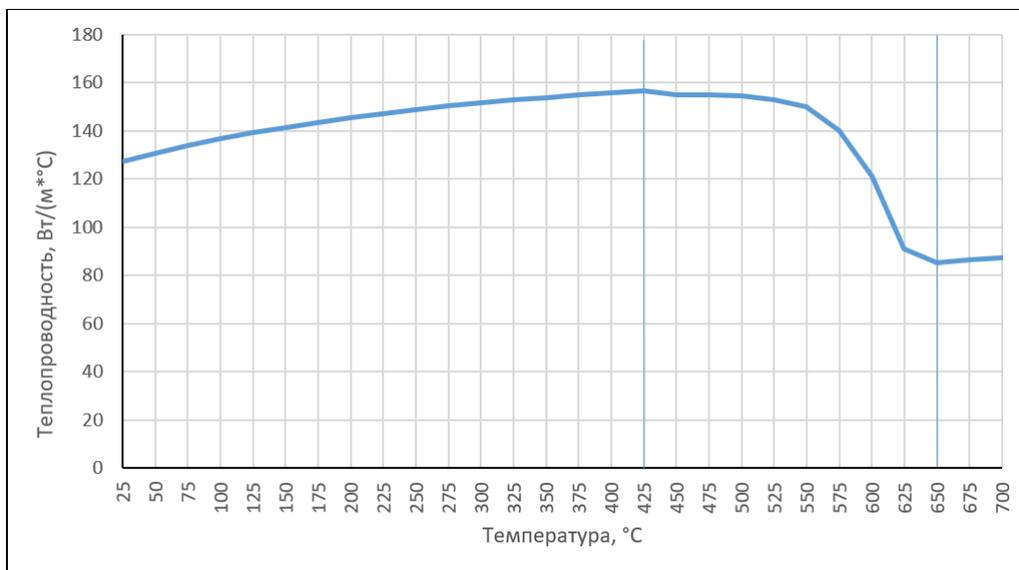
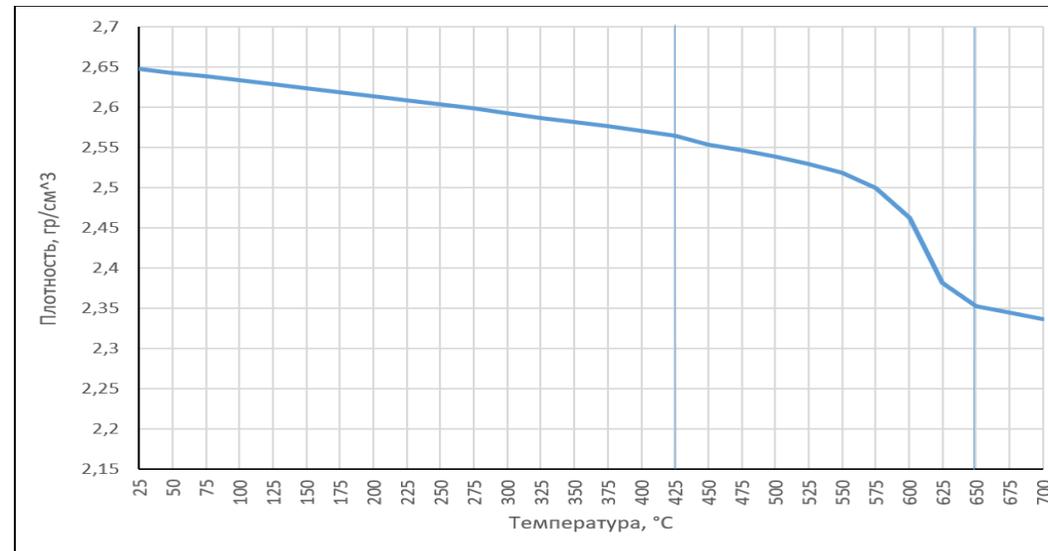
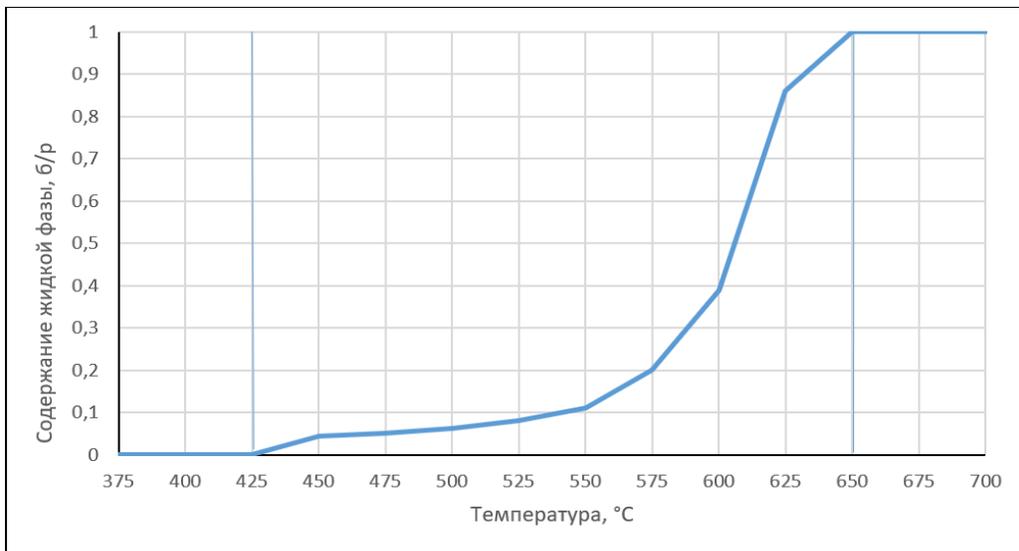
Особенности: моделирование доли жидкой фазы в процессе неравновесной кристаллизации.

Допущения: ВГтих соответствует 0,5 доли жидкой фазы, а НГтих - отсутствию жидкой фазы.

В-1469 (Al – 3,85% Cu – 1,25% Li),  
ВГтих = 635 °C, НГтих = 525 °C, ТИХ = 110 °C

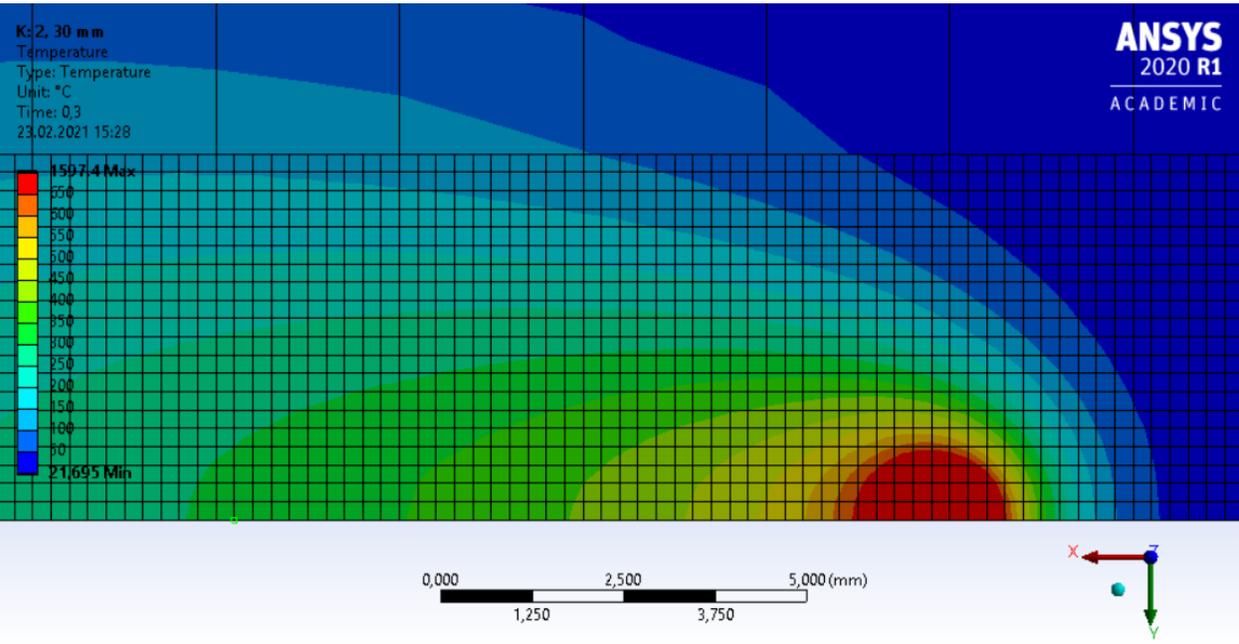
# Пример теплофизических свойств для сплава АМг5 с учетом фазового превращения (кристаллизации)

7



# Модель линейного источника нагрева (лазерная сварка)

8



Вид шва – стыковой.

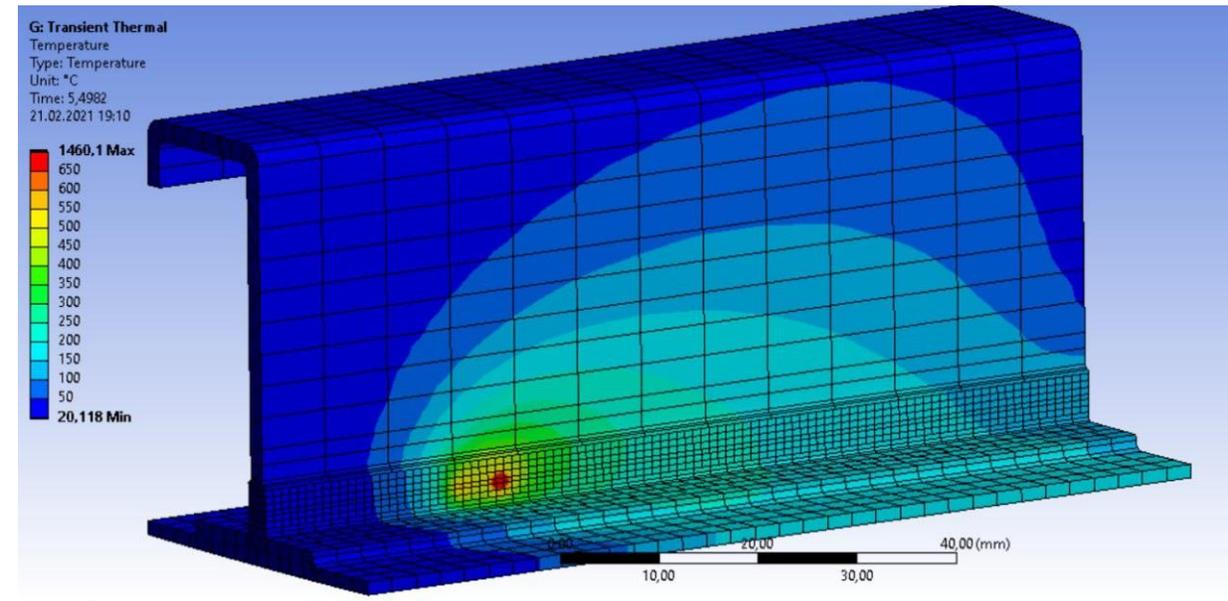
Вид источника нагрева – линейный.

Способ сварки – лазерная.

Траектория сварки – прямолинейная.

Размер элементов 0,25 x 0,25 мм.

Ширина сварного шва 2 мм.



Изделие – шпангоут летательного аппарата из сплава В-1469

Вид шва – стыковой, двухсторонний.

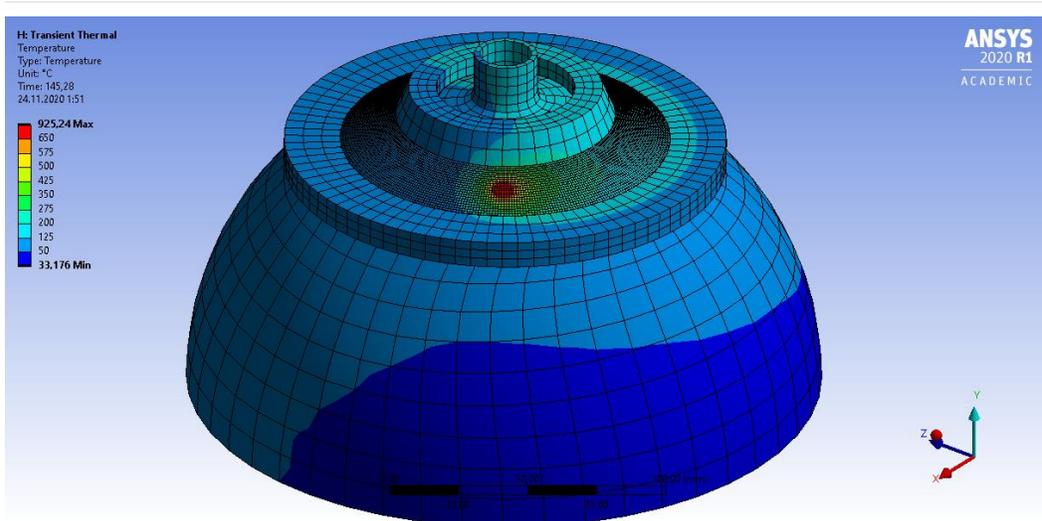
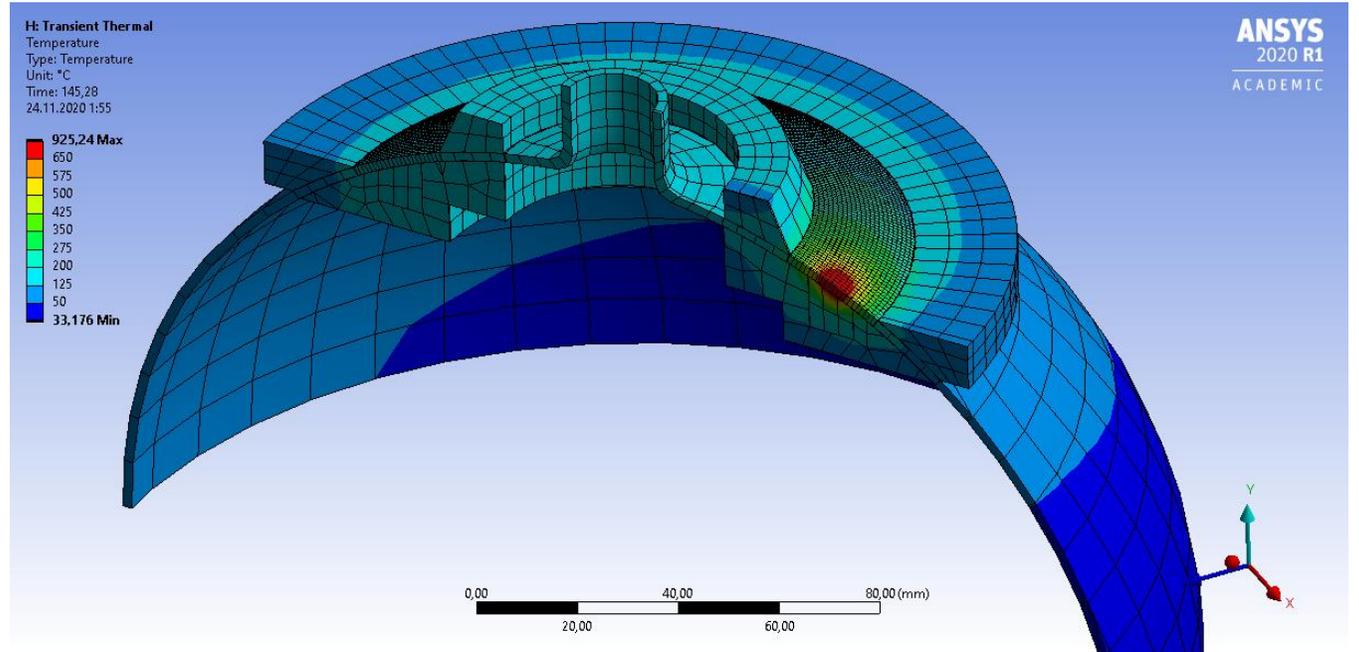
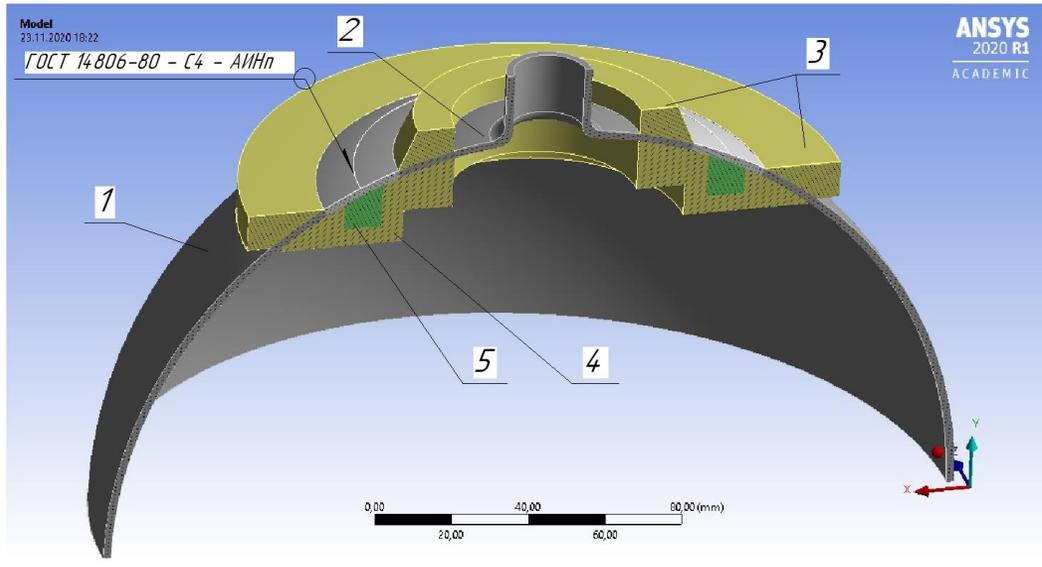
Вид источника нагрева – линейный.

Способ сварки – лазерная.

Траектория сварки – прямолинейная.

# Модель поверхностного плоского источника нагрева (аргонодуговая сварка неплавящимся электродом)

9



Изделие – сосуд, работающий под давлением, из сплава АМГ6

Вид шва – стыковой, без разделки кромок, круговой.

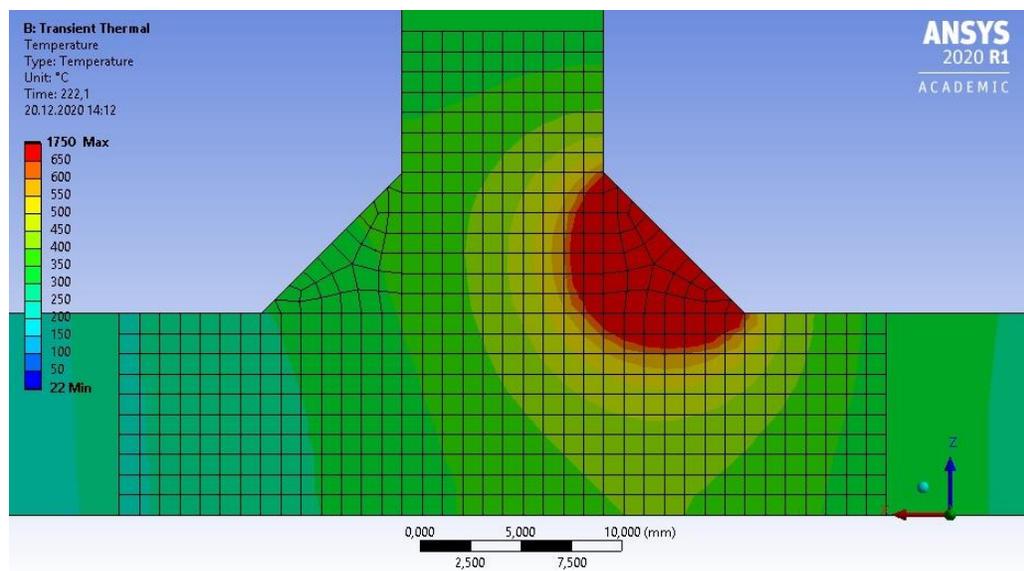
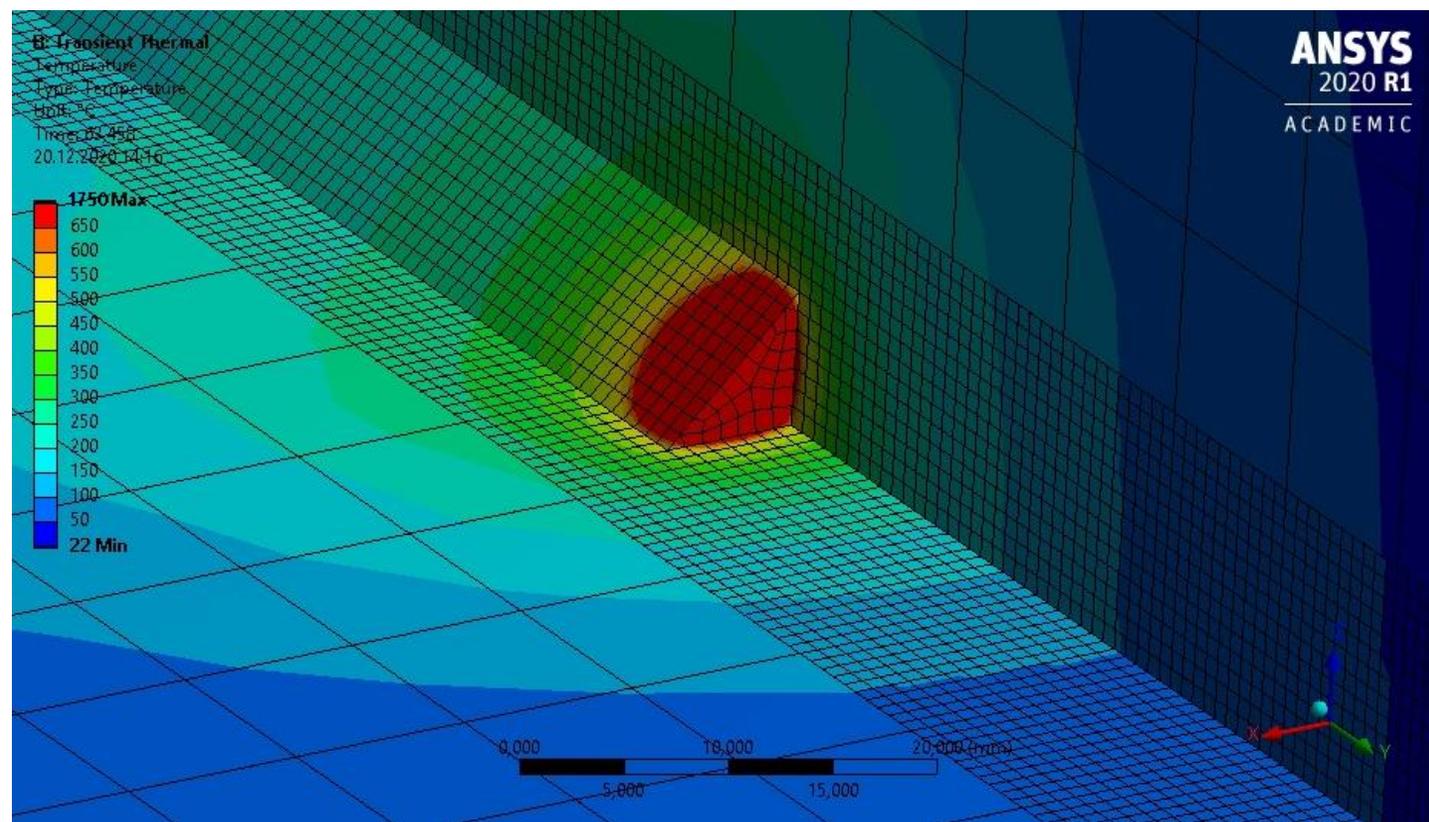
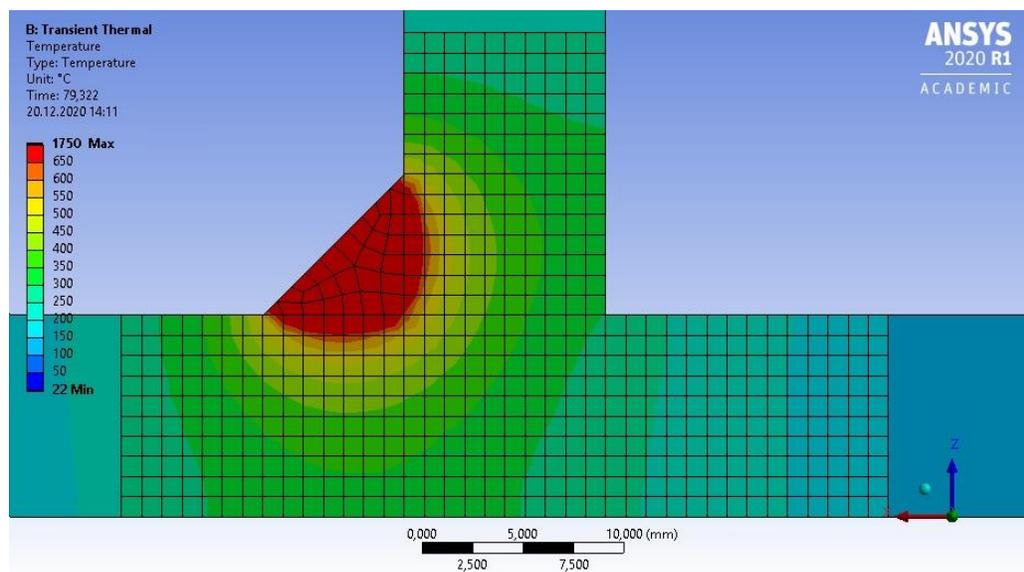
Вид источника нагрева - плоский круговой поверхностный нормально распределенный источник.

Траектория сварки – круговая.

1 – полусфера (АМГ6); 2 – горловина (АМГ6); 3 – верхние прижимные элементы (12Х18Н10Т); 4 – нижний прижимной элемент (12Х18Н10Т); 5 – подкладка (12Х18Н10Т)

# Модель объемного источника нагрева (аргонодуговая сварка плавящимся электродом)

10



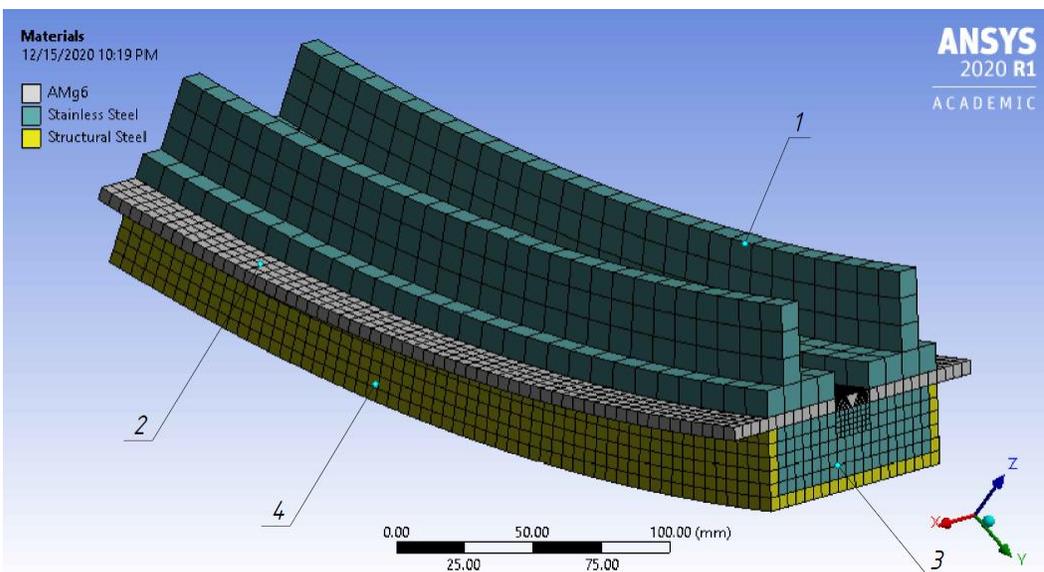
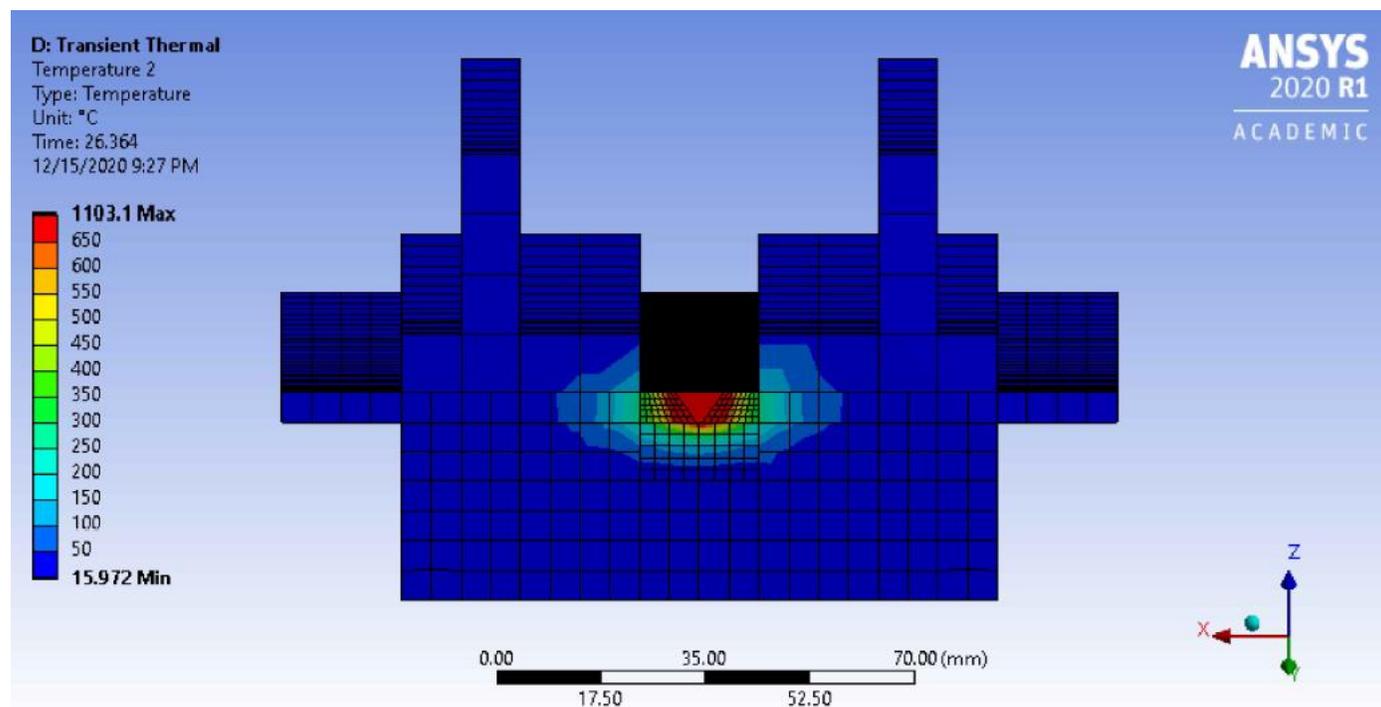
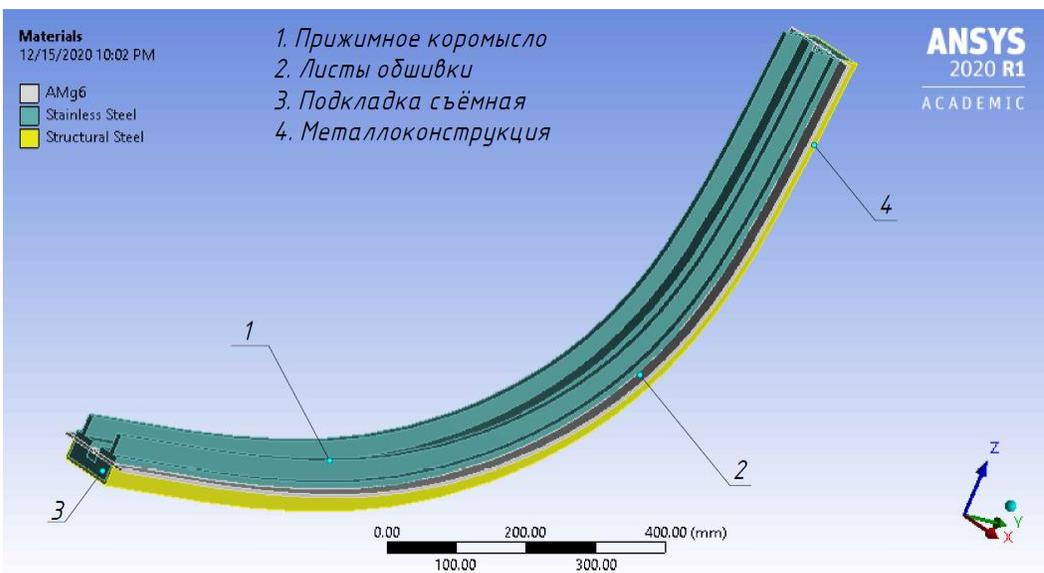
Изделие – элемент корпуса морского судна из сплава АМг5.

Вид шва – угловой, без разделки кромок (толстый лист).

Вид источника нагрева - объемный источник (ввод тепла через присадочный материал).

Траектория сварки – прямолинейная.

# Модель объемного источника нагрева (аргодуговая сварка плавящимся электродом)



Изделие – элемент корпуса речного судна из сплава АМгб.

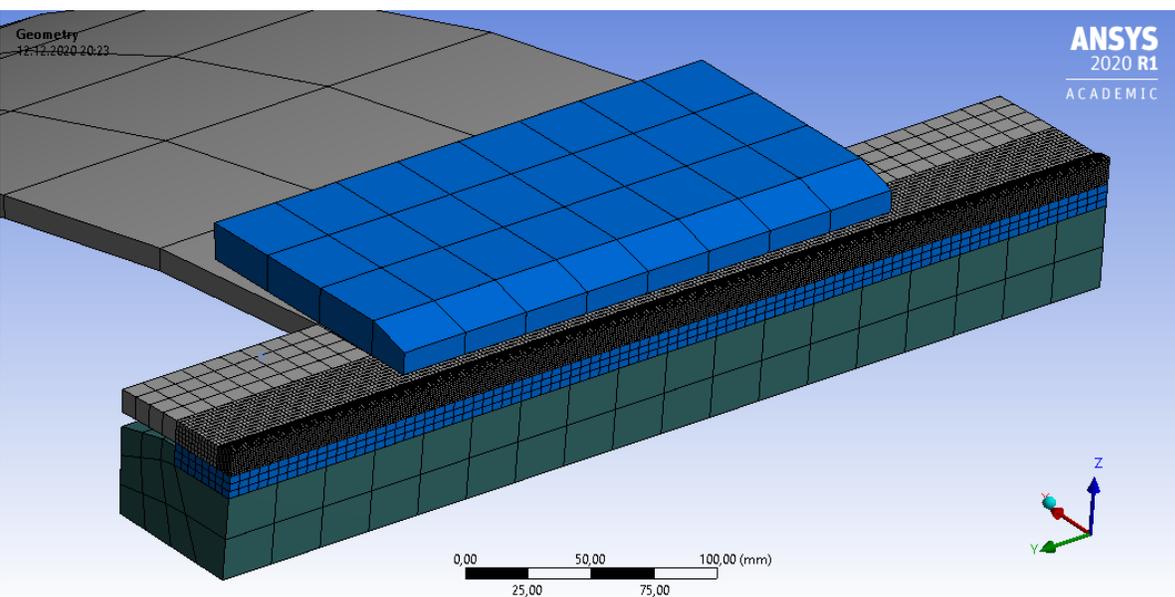
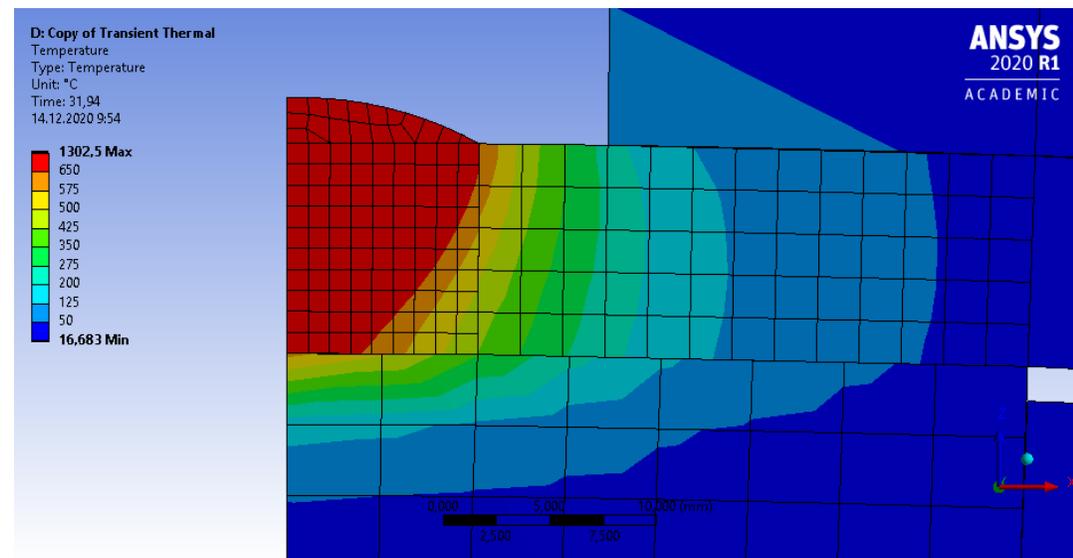
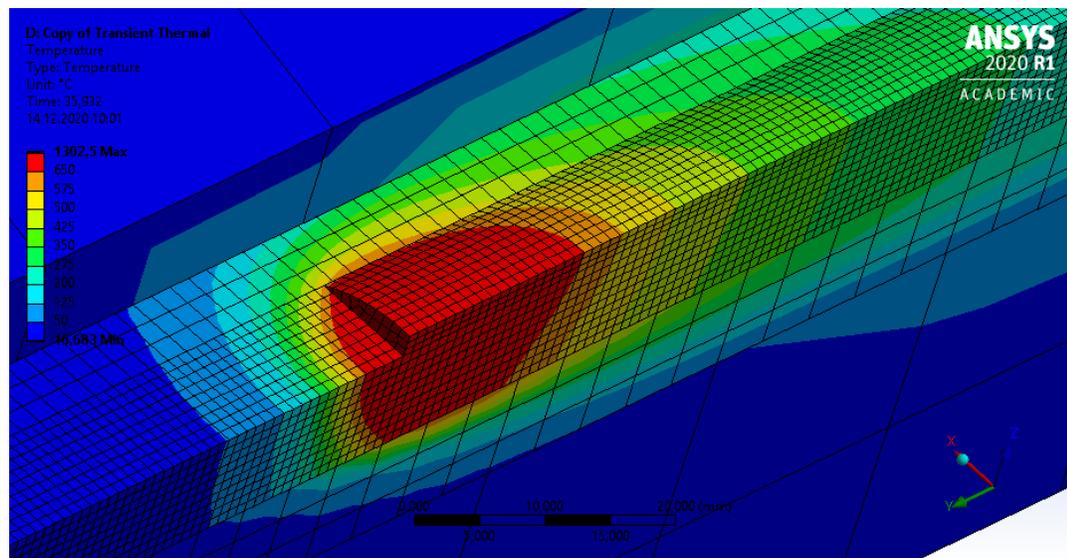
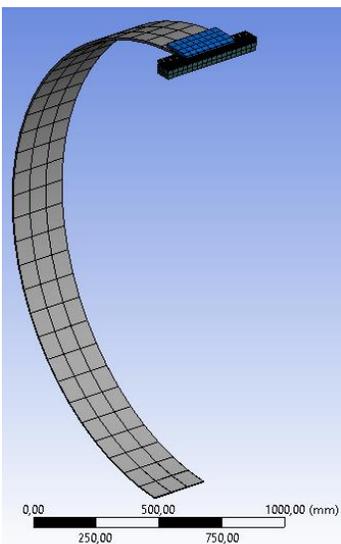
Вид шва – стыковой, V-ая разделка разделка кромок (толстый лист).

Вид источника нагрева - объемный источник (ввод тепла через присадочный материал).

Траектория сварки – криволинейная.

# Модель комбинированного источника нагрева (аргодуговая сварка неплавящимся электродом 3-х фазной дугой)

12



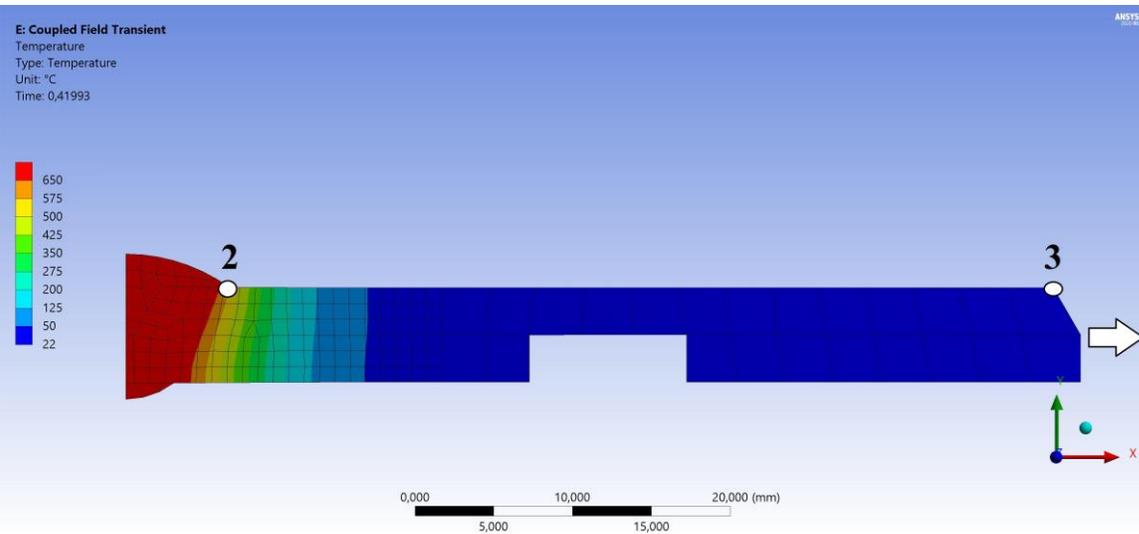
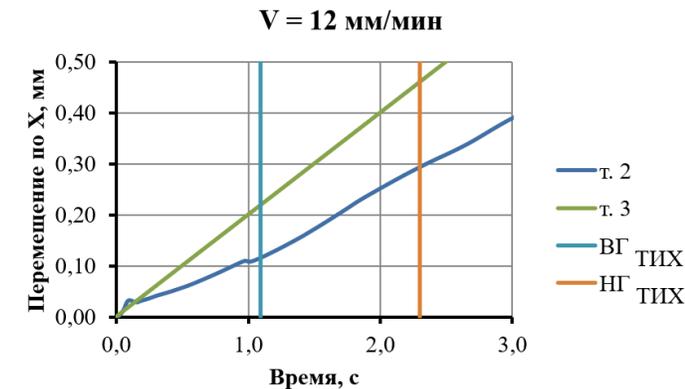
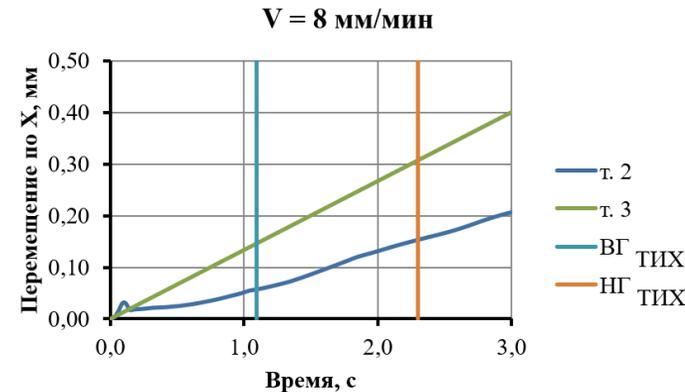
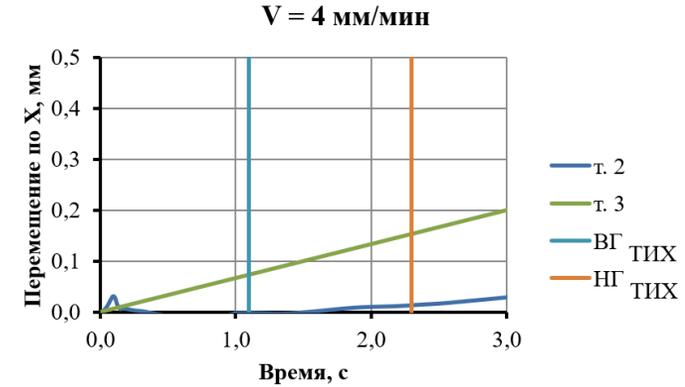
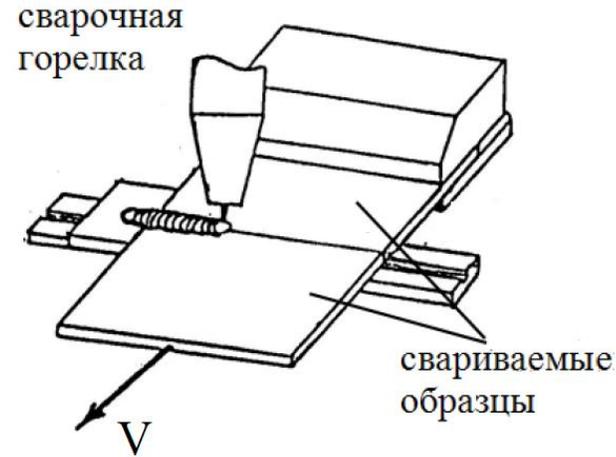
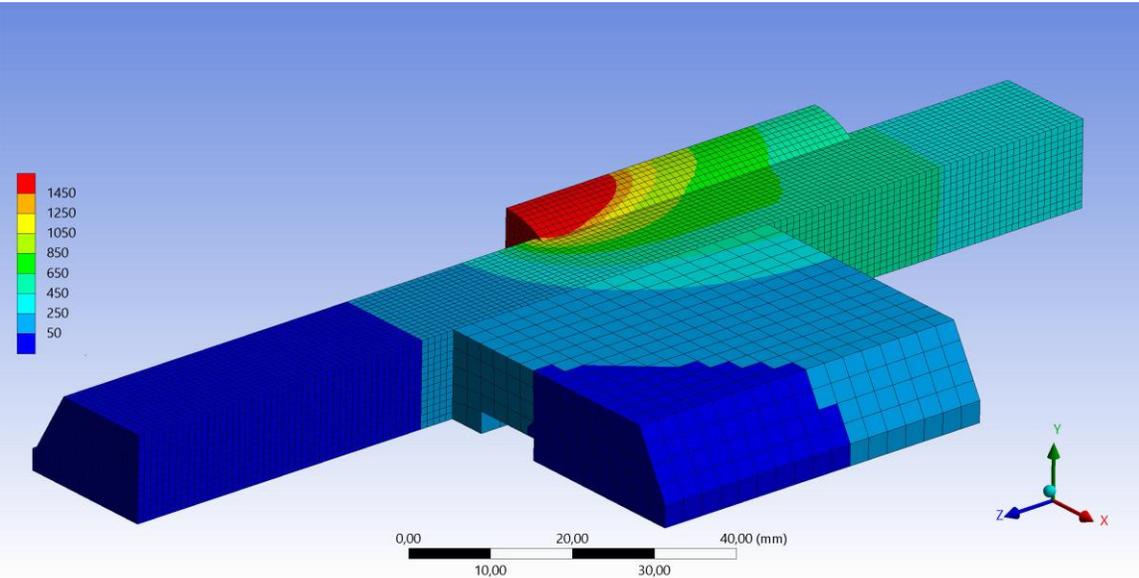
Изделие – переходной отсек космического аппарата.

Вид шва – стыковой, без разделки кромок (толстый лист).

Вид источника нагрева - комбинированный объемный источник: полусферический равномерно распределенный + тепло через присадочный материал.

Траектория сварки – прямолинейная.

# Уточнение экспериментальных показателей свариваемости (критическая скорость растяжения $V_{кр}$ , мм/мин)



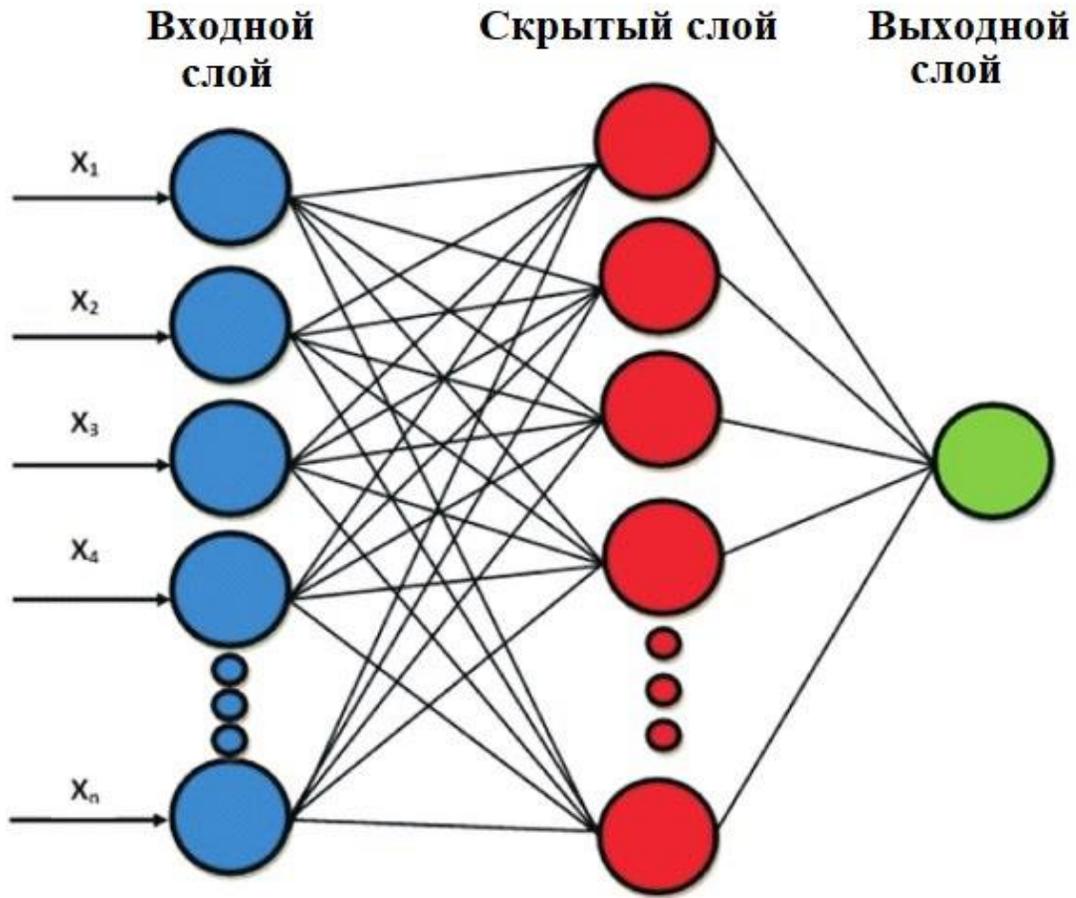
**АМг6**

$V_{кр} = 8,0$  мм/мин  
(эксперимент)

$V_{кр} = 4,8$  мм/мин  
(уточнение)

# Нейросетевая модель оперативной оценки свариваемости по химическому составу основного металла и присадки

14



**Входной слой** ( $x_1, \dots, x_n$ ) - химический состав основного металла (22 элемента) и присадочной проволоки (22 элемента).

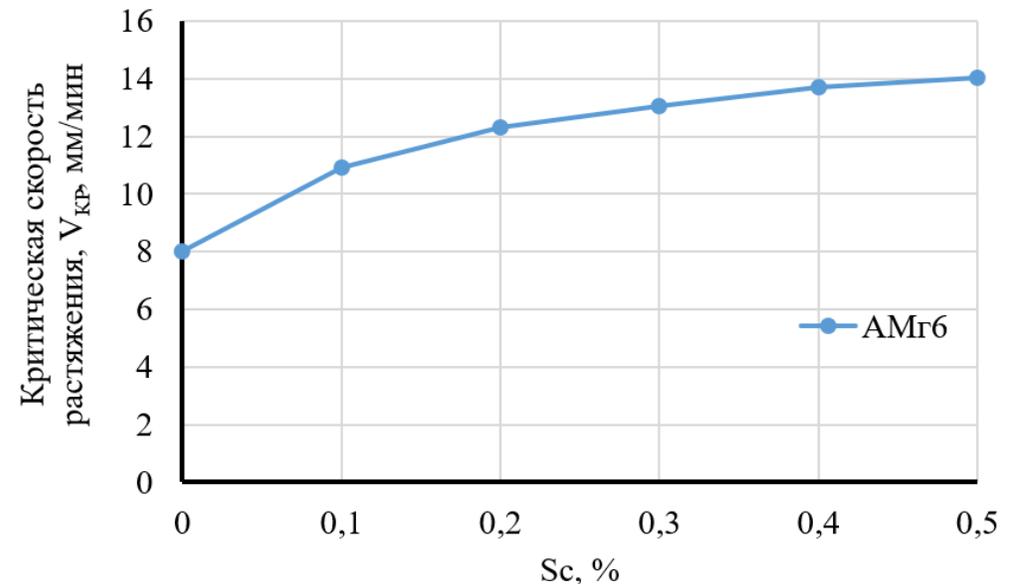
Основные легирующие элементы - Mg, Mn, Si, Cu, Li, Zn

Редкоземельные: Sc, Y, Ce, Nd, Dy

Остальные (редкие и переходные): Ti, Zr, V, Cd, Cr, Fe, Ni, V, Ag, Be, Hf

**Выходной слой** – критическая скорость растяжения  $V_{кр}$ , мм/мин

Пример расчета с помощью нейронной сети



**Тип** – полно связанная нейронная сеть.

**Метод обучения** – обучение с учителем.

**Алгоритм обучения** – метод обратного распространения ошибки (по данным МГТУ им. Н.Э. Баумана, ВИАМ)

# Разработка моделей для расчета минимальной пластичности в температурном интервале хрупкости

## Существующая модель

(плоская схема кристаллизации, столбчатые кристаллиты):

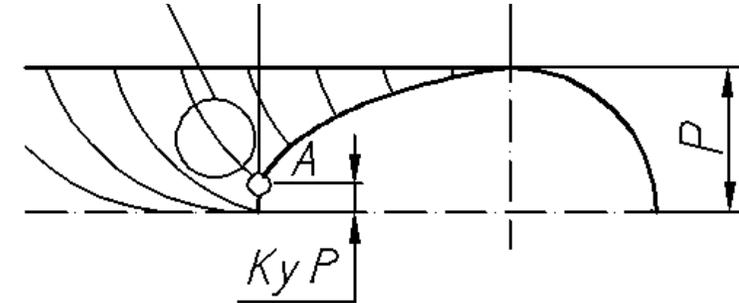
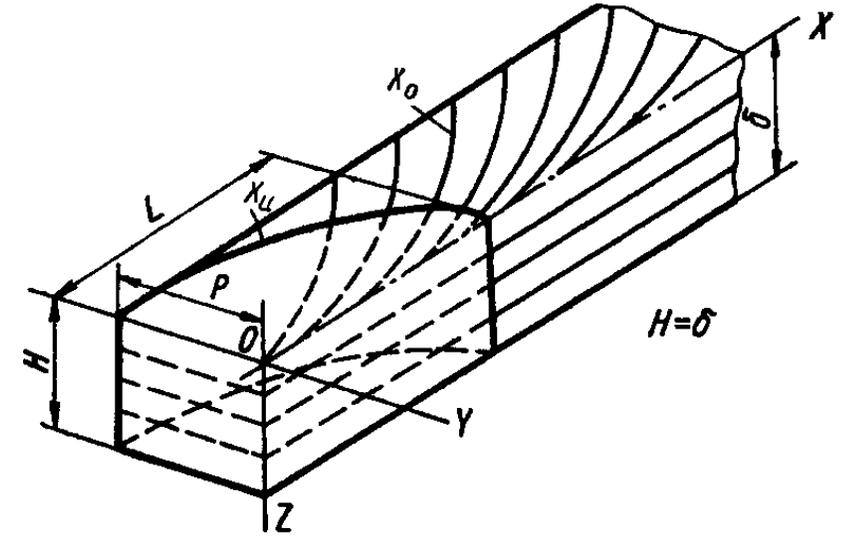
$$\delta_{\min} = \delta_{\min\_min} (1 + \sum K_i X_i)$$

где  $\delta_{\min}$  – искомое значение минимальной пластичности металла шва в ТИХ, %;

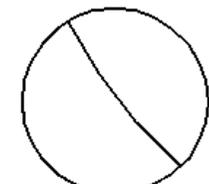
$\delta_{\min\_min}$  – наименьшее из известных экспериментальных значений минимальной пластичности в ТИХ для данного типа сплавов, %;

$X_i$  – нормированное значение величины, описывающей  $i$ -й фактор, влияющий на минимальную пластичность, [0 ... 1]. (Приближается к единице, когда данный фактор в максимальной степени повышает минимальную пластичность металла шва в ТИХ.);

$K_i$  – весовой коэффициент, характеризующий степень влияния  $i$ -го фактора на величину минимальной пластичности в ТИХ.



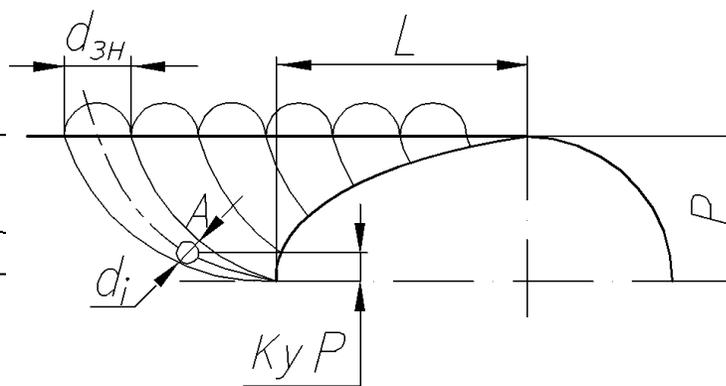
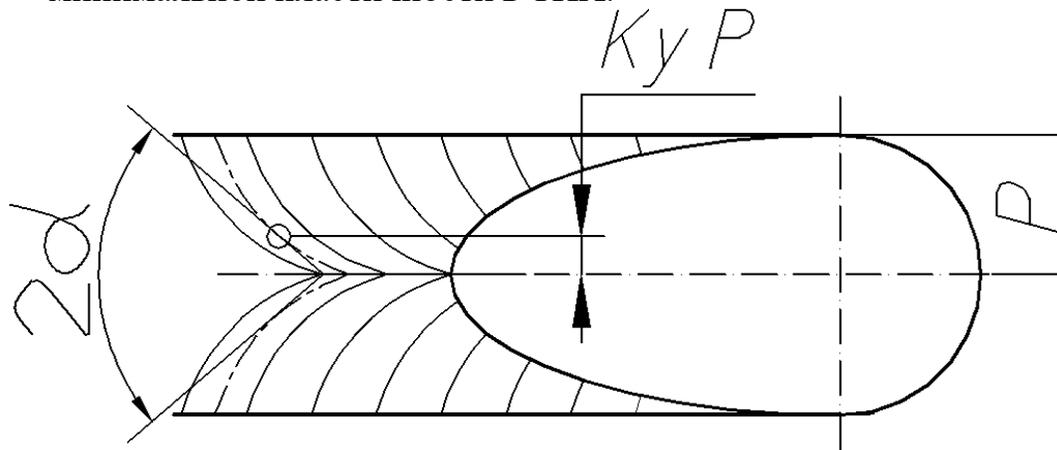
Б (увеличено)



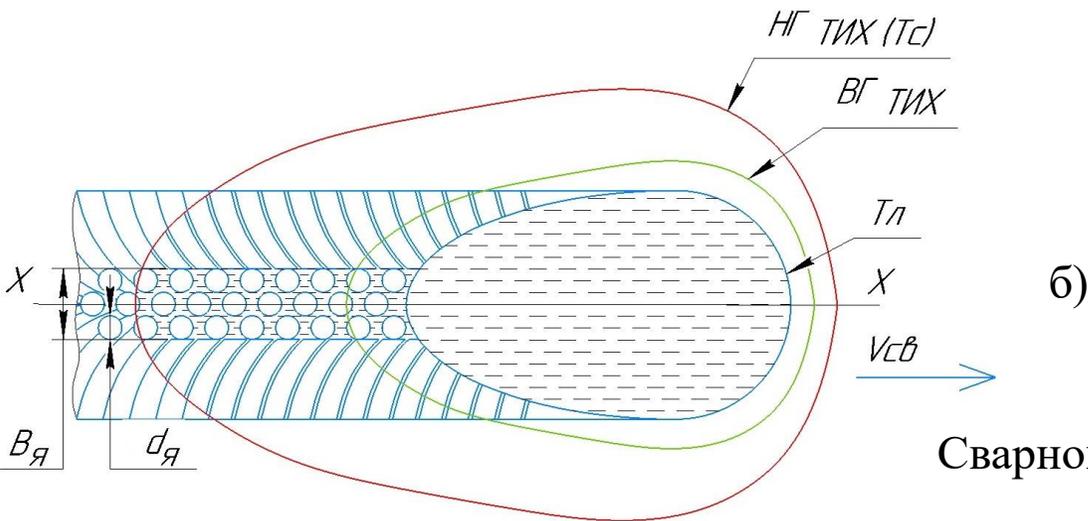
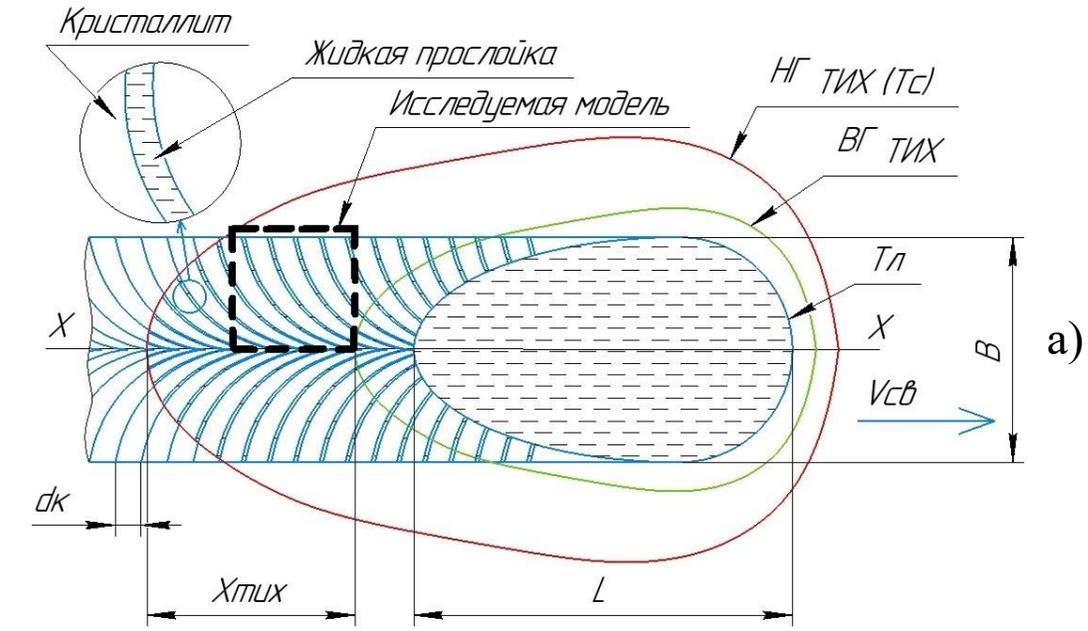
ячеистые кристаллиты



дендритные кристаллиты



# Разработка моделей для расчета минимальной пластичности в 16 температурном интервале хрупкости



Сварной шов, состоящий из столбчатых (а) кристаллитов и равноосных кристаллитов на оси шва (б)

## Влияющие факторы

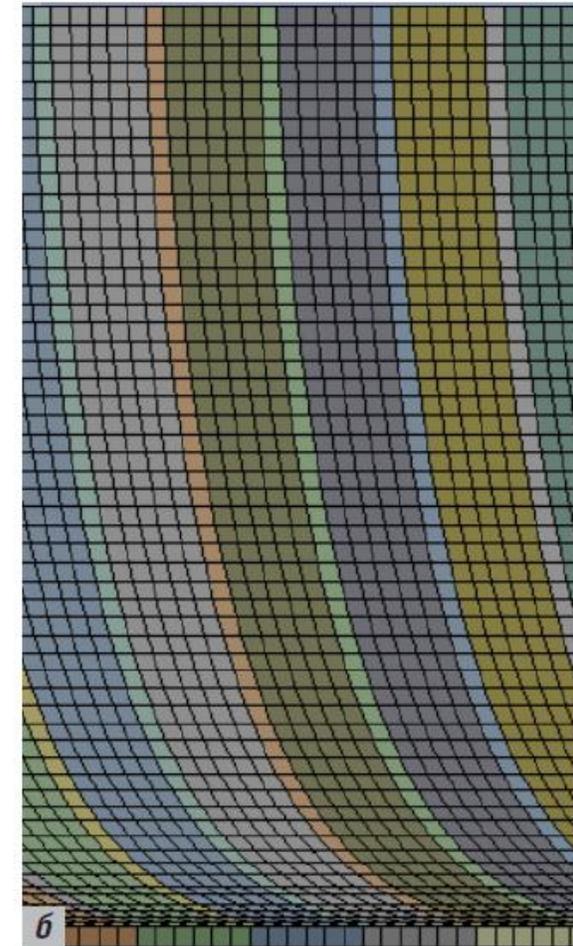
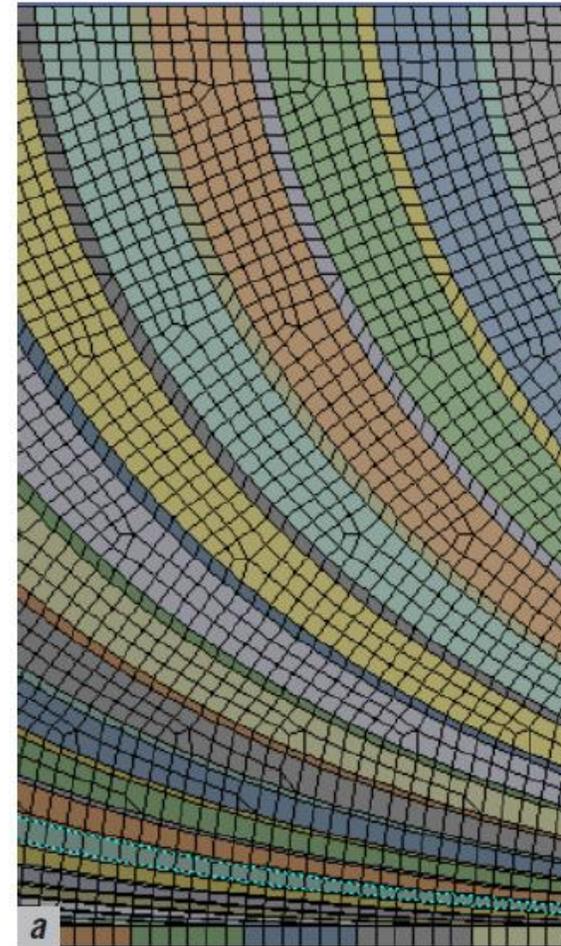
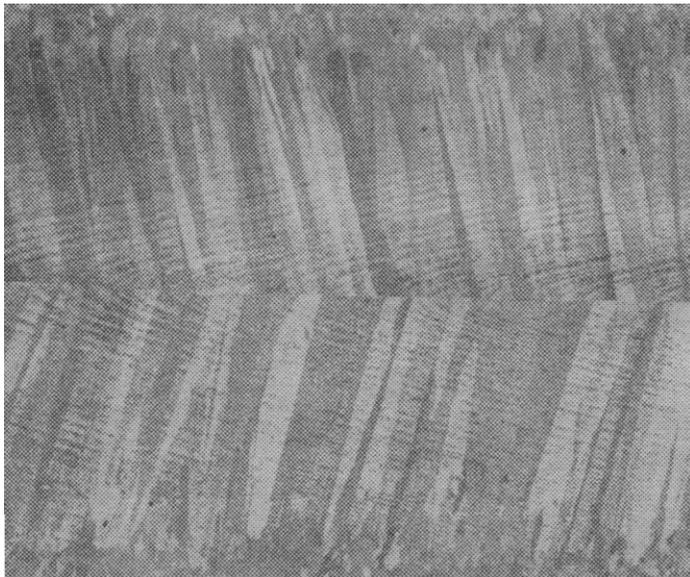
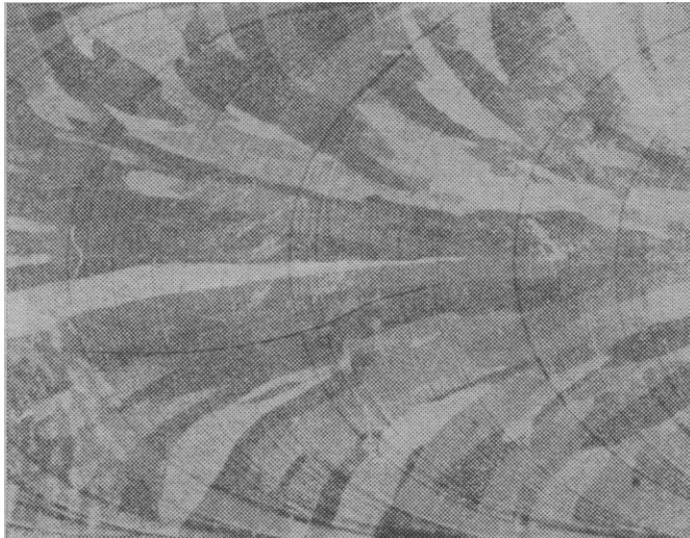
Начальный диаметр столбчатого кристаллита ( $d_k$ , мкм)

Угол схождения осей противоположно растущих кристаллитов

Диаметр равноосного кристаллита ( $d_y$ , мкм)

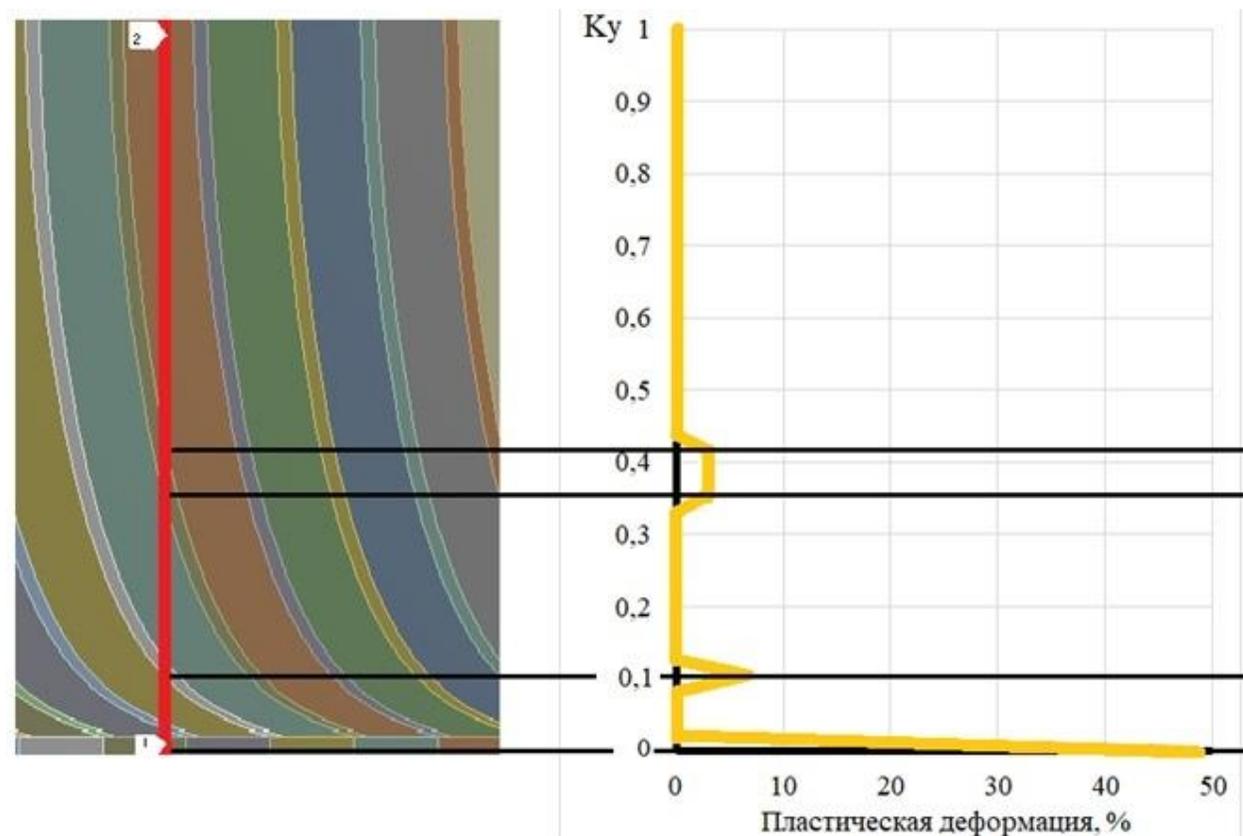
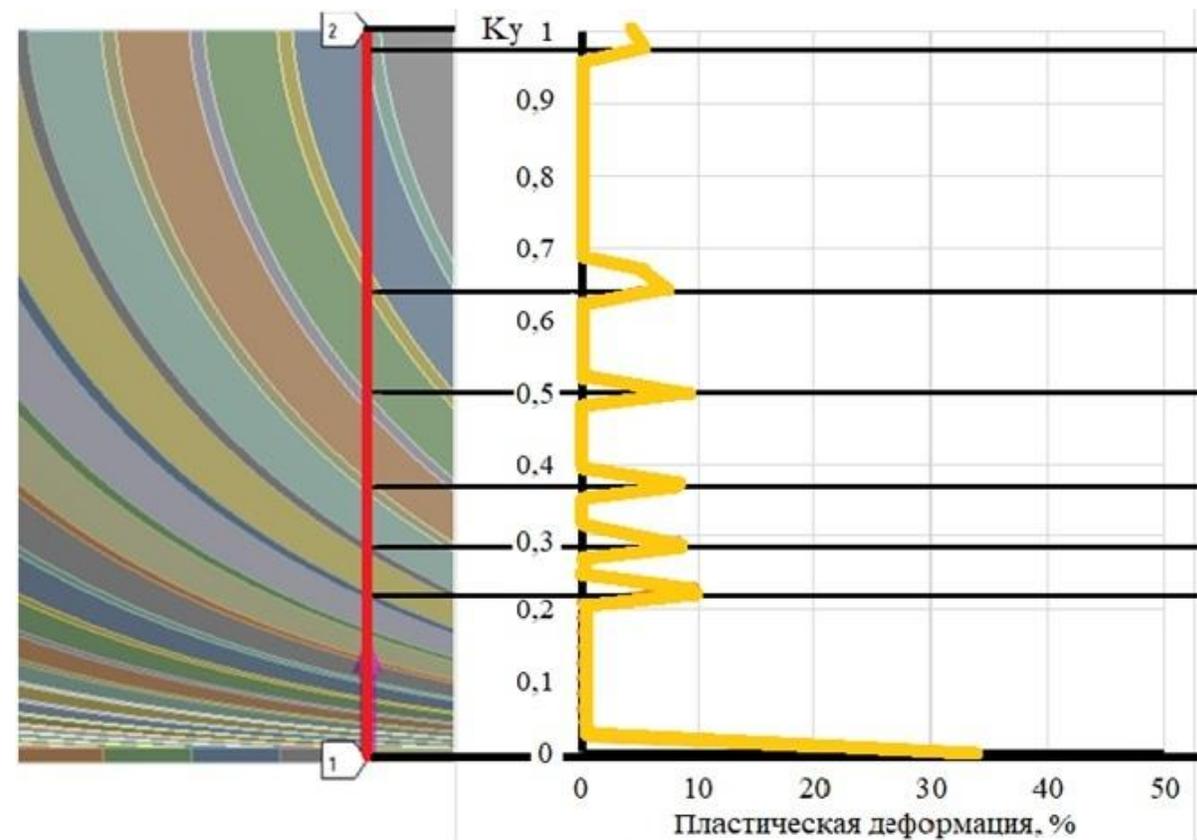
Относительная ширина зоны с равноосными кристаллитами ( $B_y/V$ )

# Разработка моделей для расчета минимальной пластичности в температурном интервале хрупкости

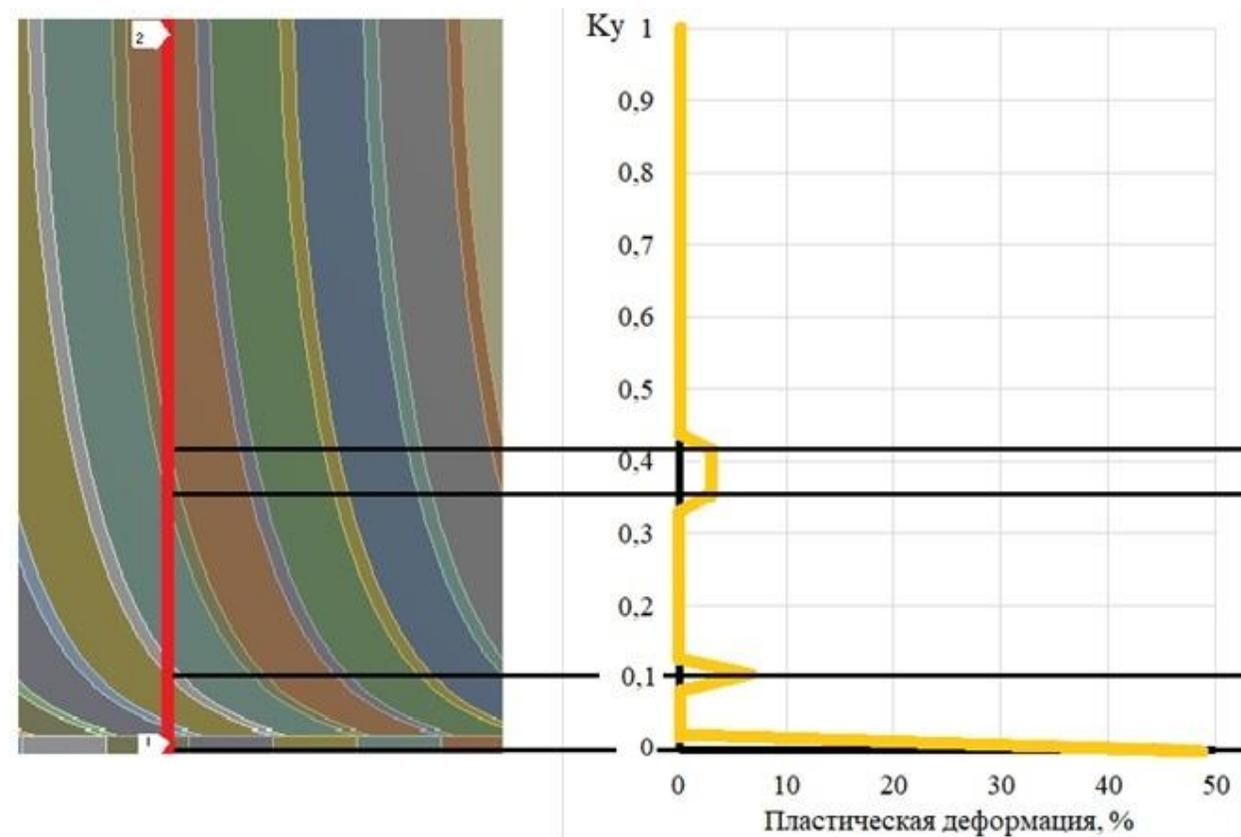
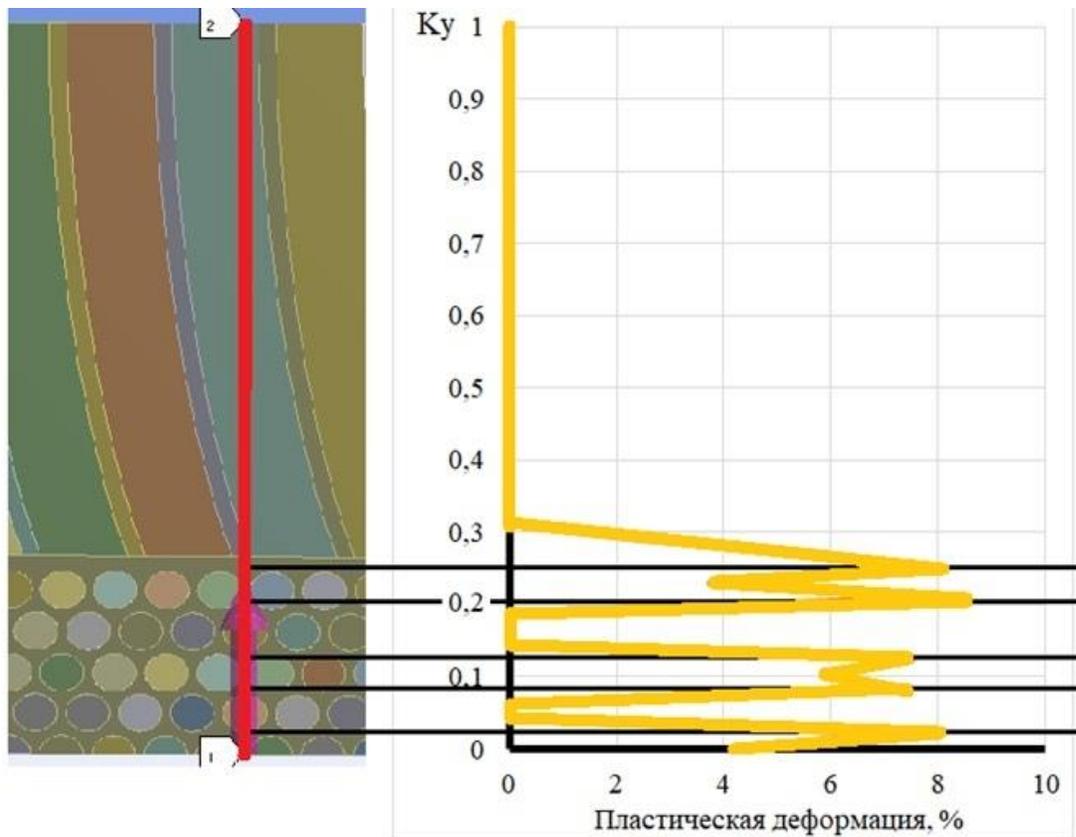


Вид геометрических моделей сварных швов в ANSYS с соотношениями длины сварочной ванны к ширины сварного шва: 1 (а) и 5 (б) соответственно

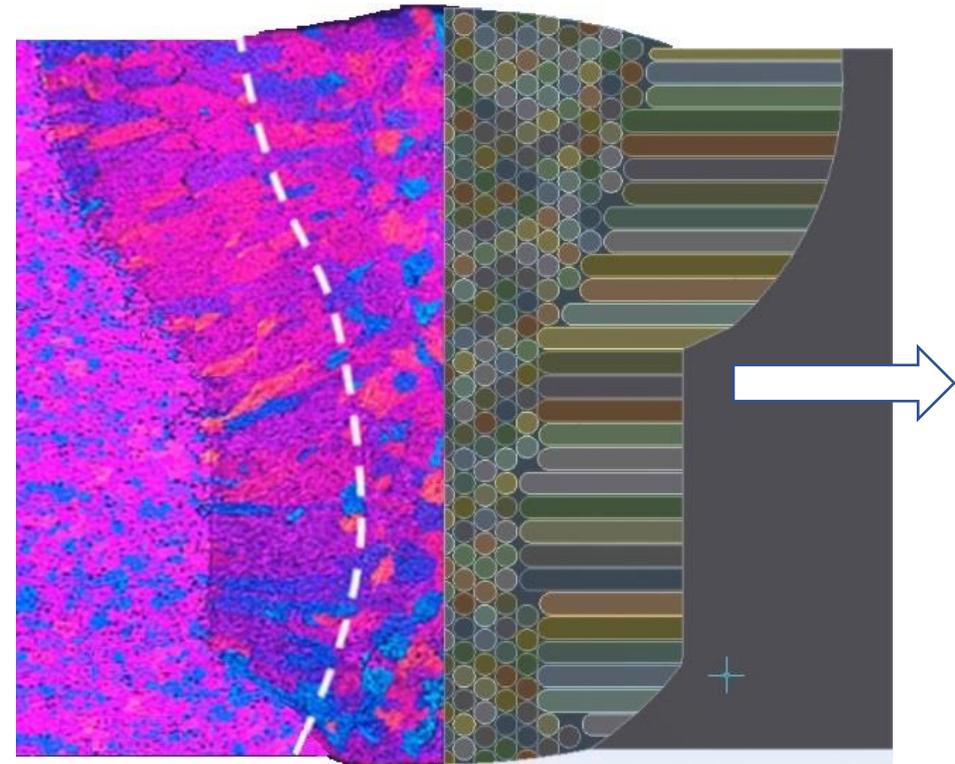
# Разработка моделей для расчета минимальной пластичности в температурном интервале хрупкости



# Разработка моделей для расчета минимальной пластичности в температурном интервале хрупкости

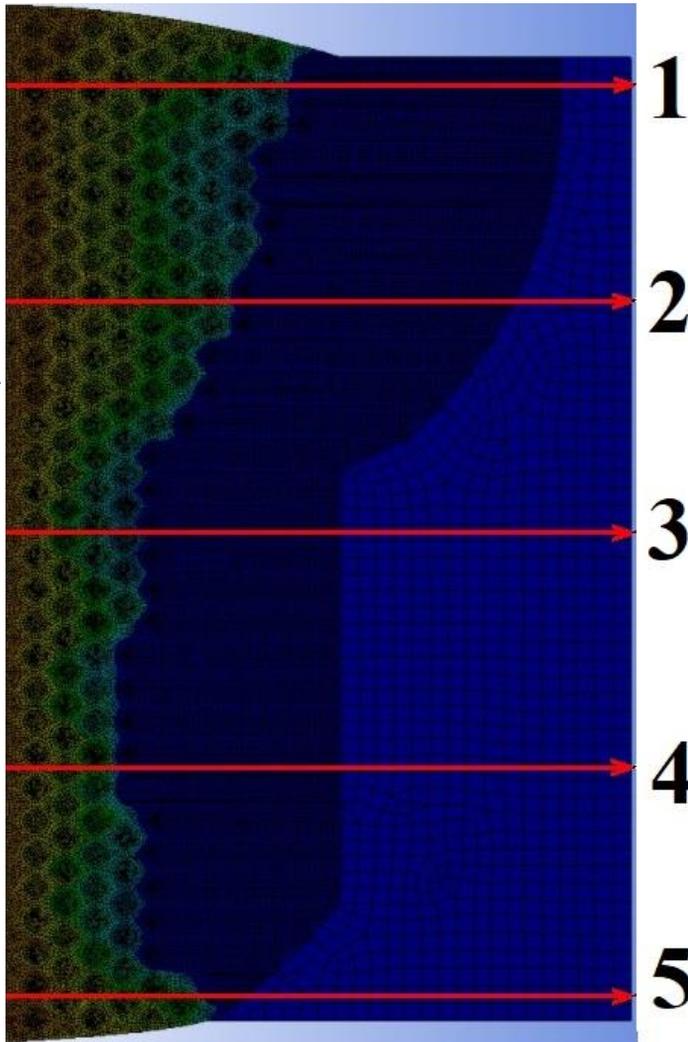


# Моделирование высокотемпературных деформаций шва, находящегося в двухфазном состоянии

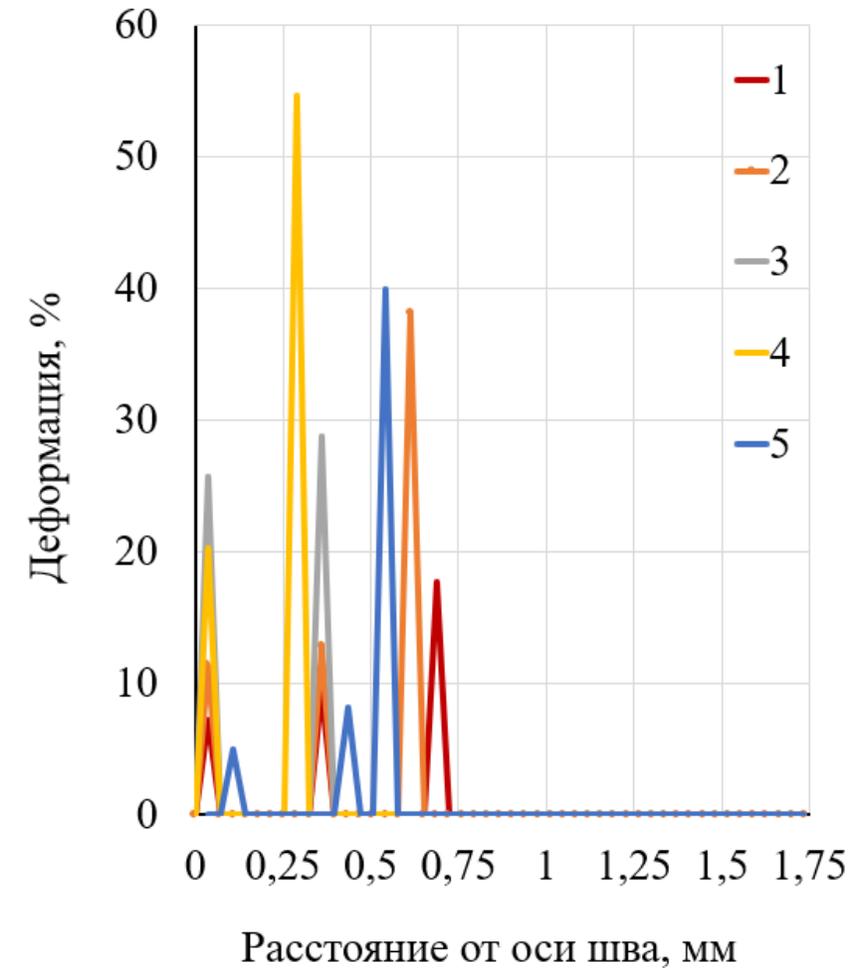


Шлиф

Геометрическая модель



Распределение деформаций в сечении



Распределение деформаций на разной высоте в сечении

Условия сварки:

Сплав: Surfalex R alloy welded (0,9% Si)

Способ сварки – лазерная;

Режим сварки:  $V_{CB} = 3$  м/мин (180 м/ч),  $q = 3200$  Вт

Средняя деформация на базе ширины шва 1 %.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**