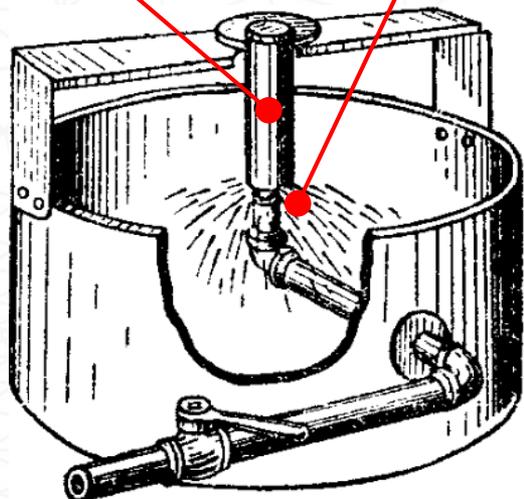


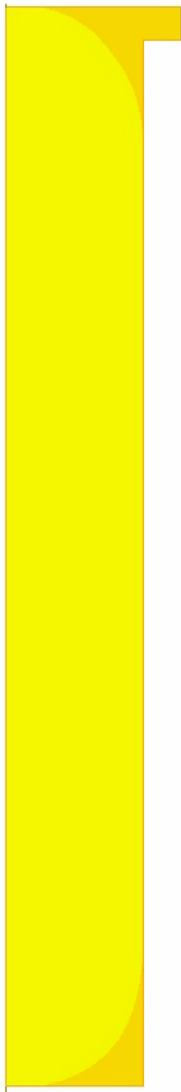
# Использование кривых прокаливаемости Метод торцевой закалки (Jominy test)

Метод стандартизирован ГОСТ 5657 (ISO 642)

Образец  
Струя воды

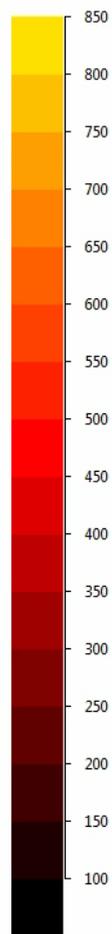


Расстояние от охлаждаемого торца



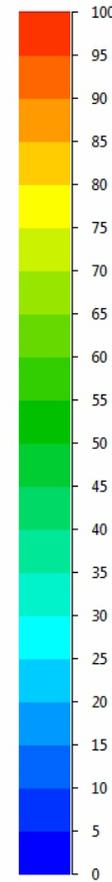
QForm VX 8.1.5.16  
Operation

Температура [°C]



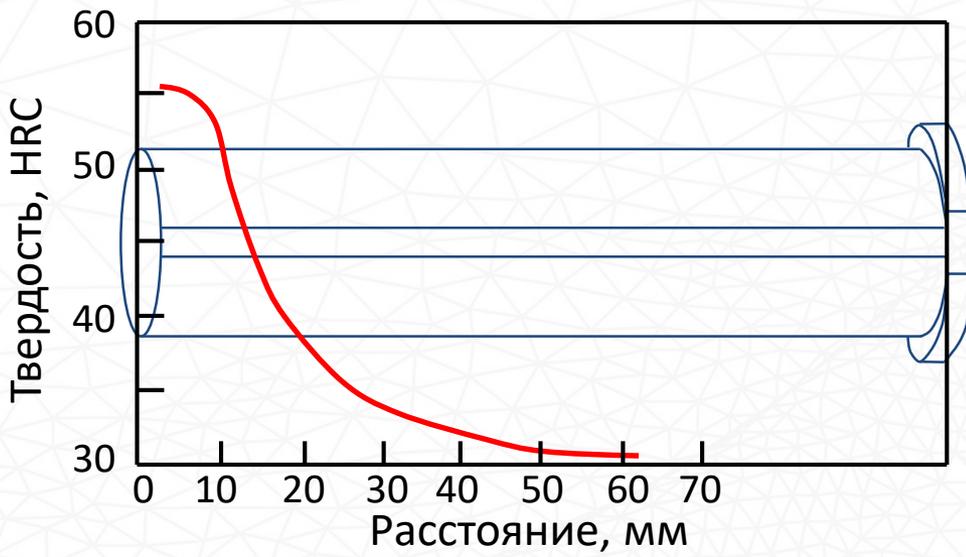
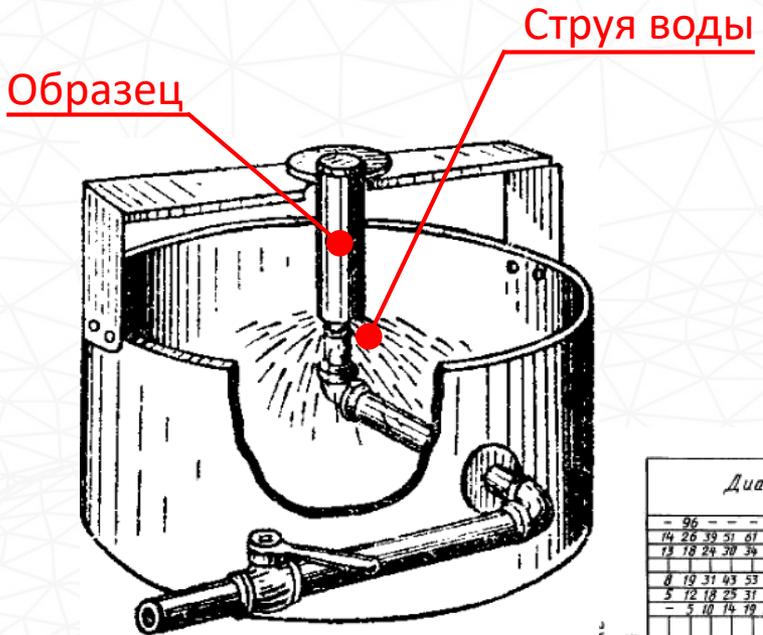
QForm VX 8.1.5.16  
Operation

Martensite



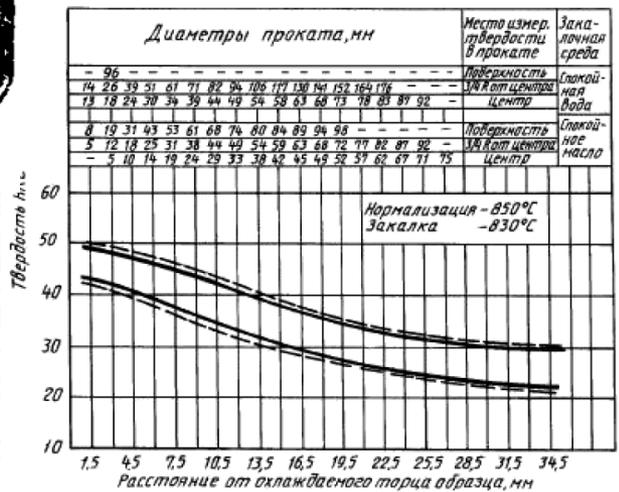
## Использование кривых прокаливаемости Метод торцевой закалки (Jominy test)

Метод стандартизирован ГОСТ 5657 (ISO 642)



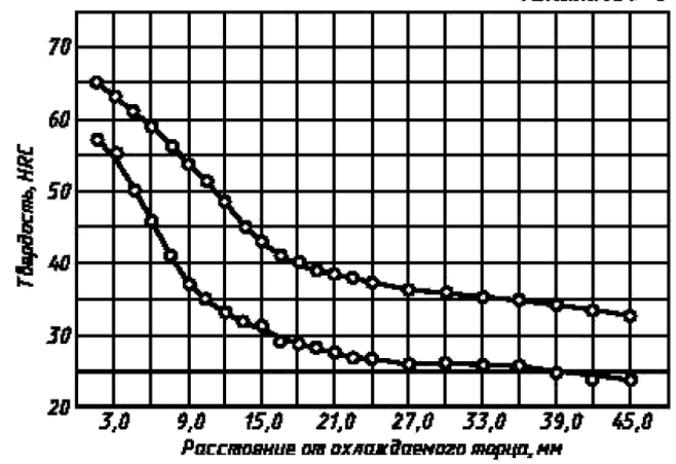
Примеры полос прокаливаемости

Сталь марки 20ХН3А ГОСТ 4543—71 С. 33



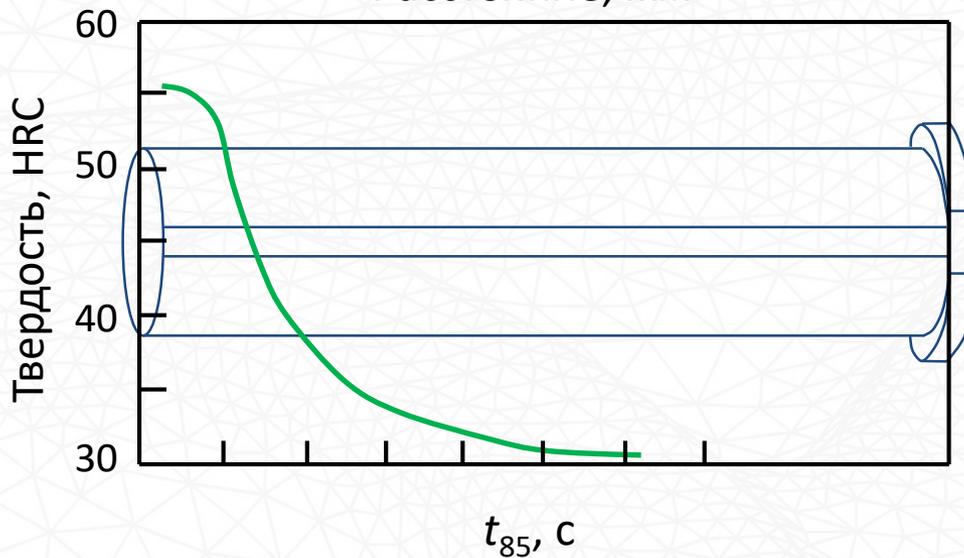
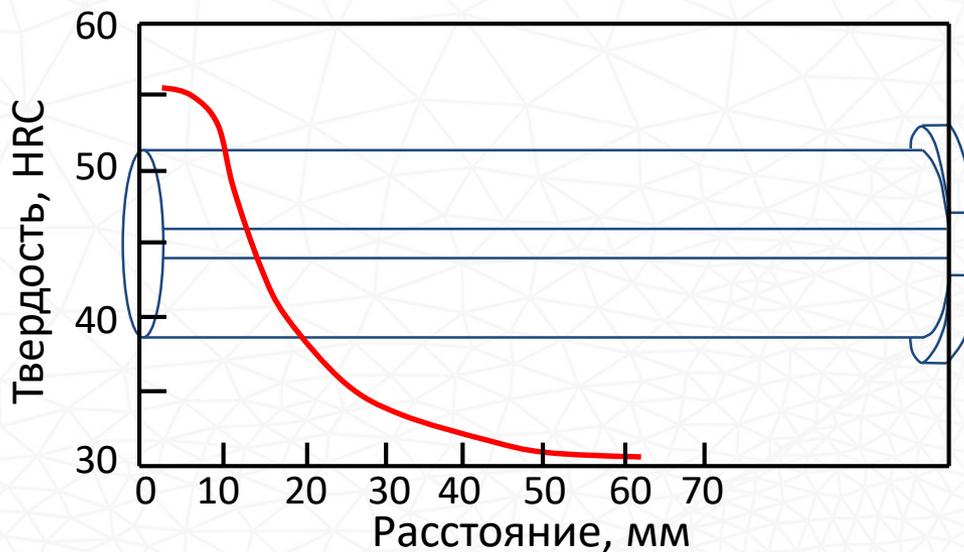
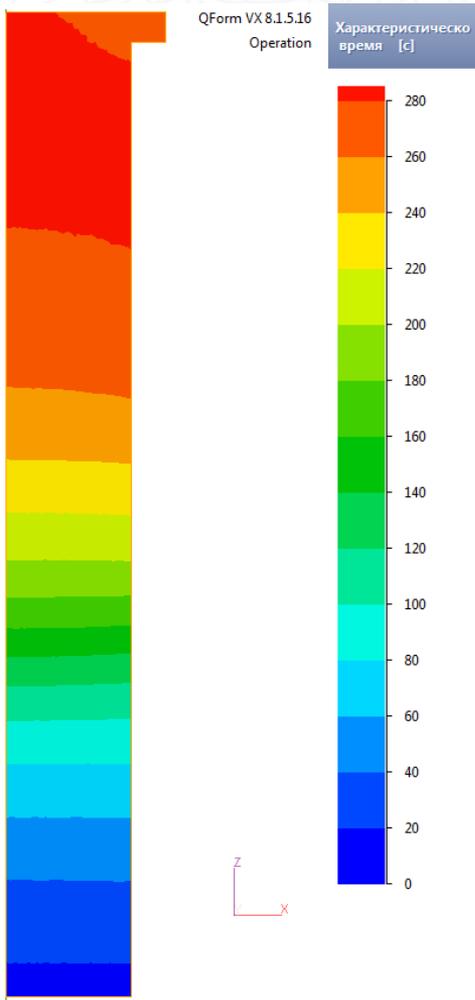
Сталь марки 55С2, 55С2А

ГОСТ 14959—79 Закалка 850°C

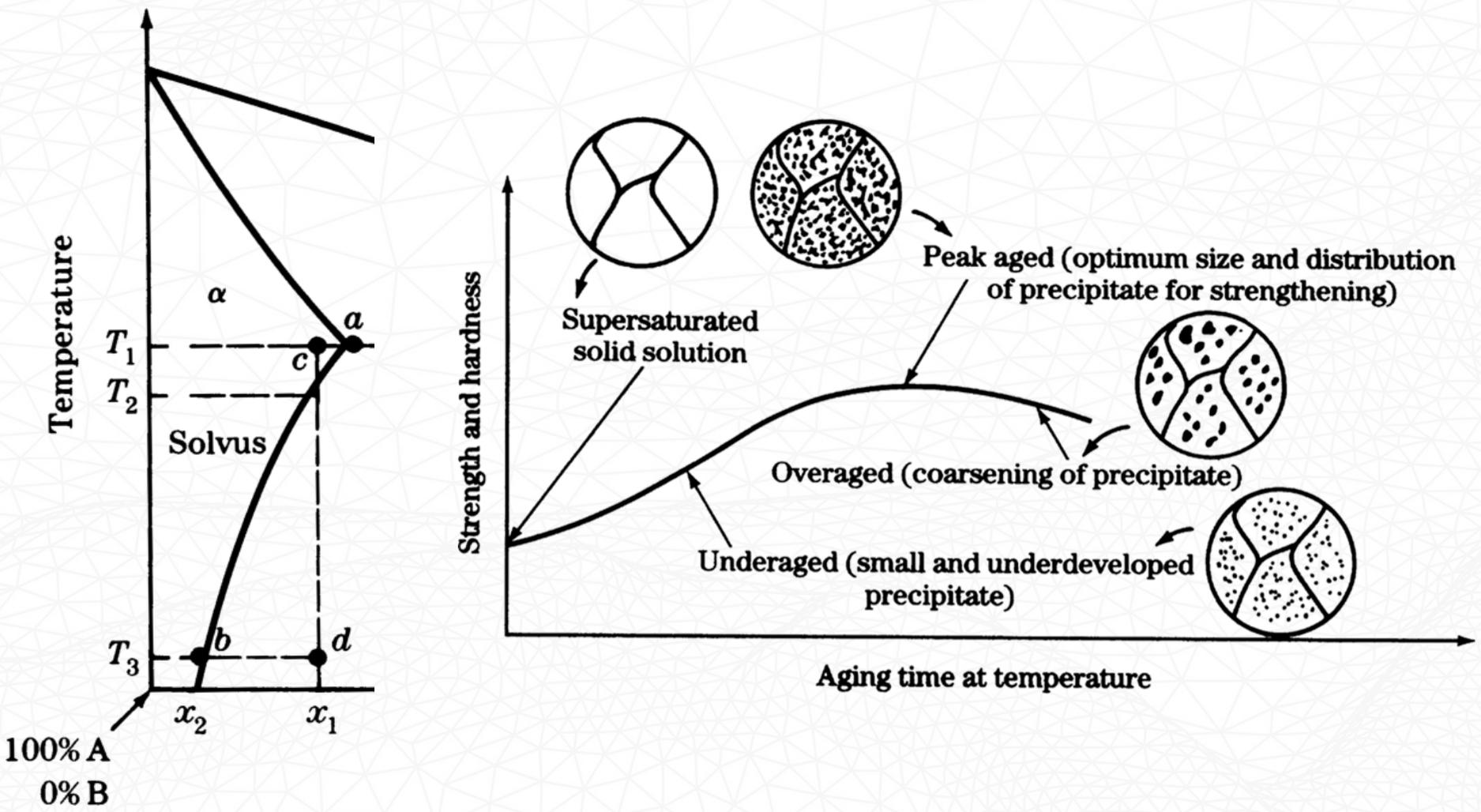


## Использование кривых прокаливаемости

Связь расстояния от охлаждаемого торца и времени  $t_{85}$



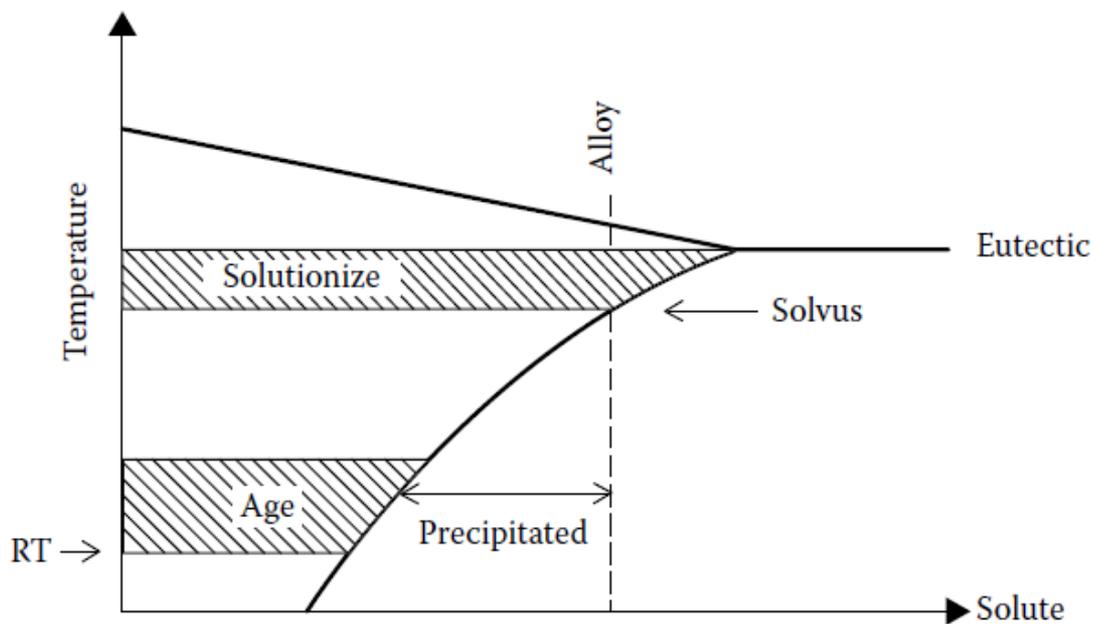
### Закалка без полиморфного превращения



## Закалка Al-сплавов

### Краткое описание процесса

Термической обработкой могут быть упрочнены деформируемые сплавы **2xxx, 6xxx, 7xxx** серий



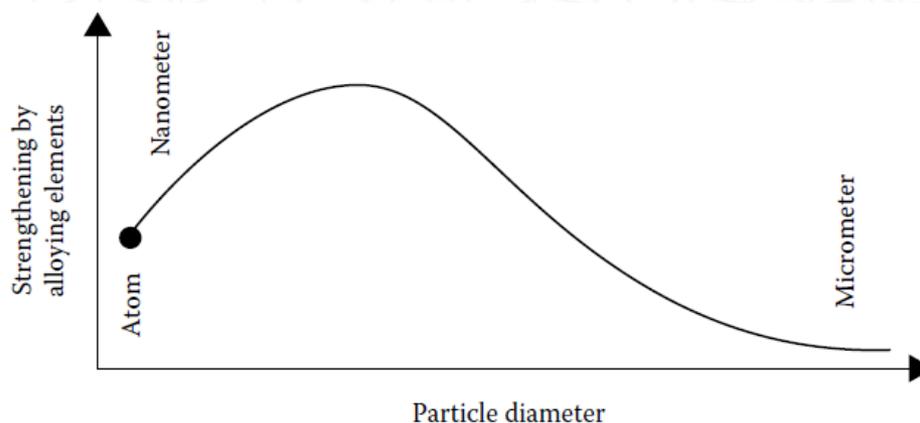
Quenching theory and technology / B. Lišcic et al. 2-nd ed. CRC Press. 2010

## Закалка Al-сплавов

### Краткое описание процесса

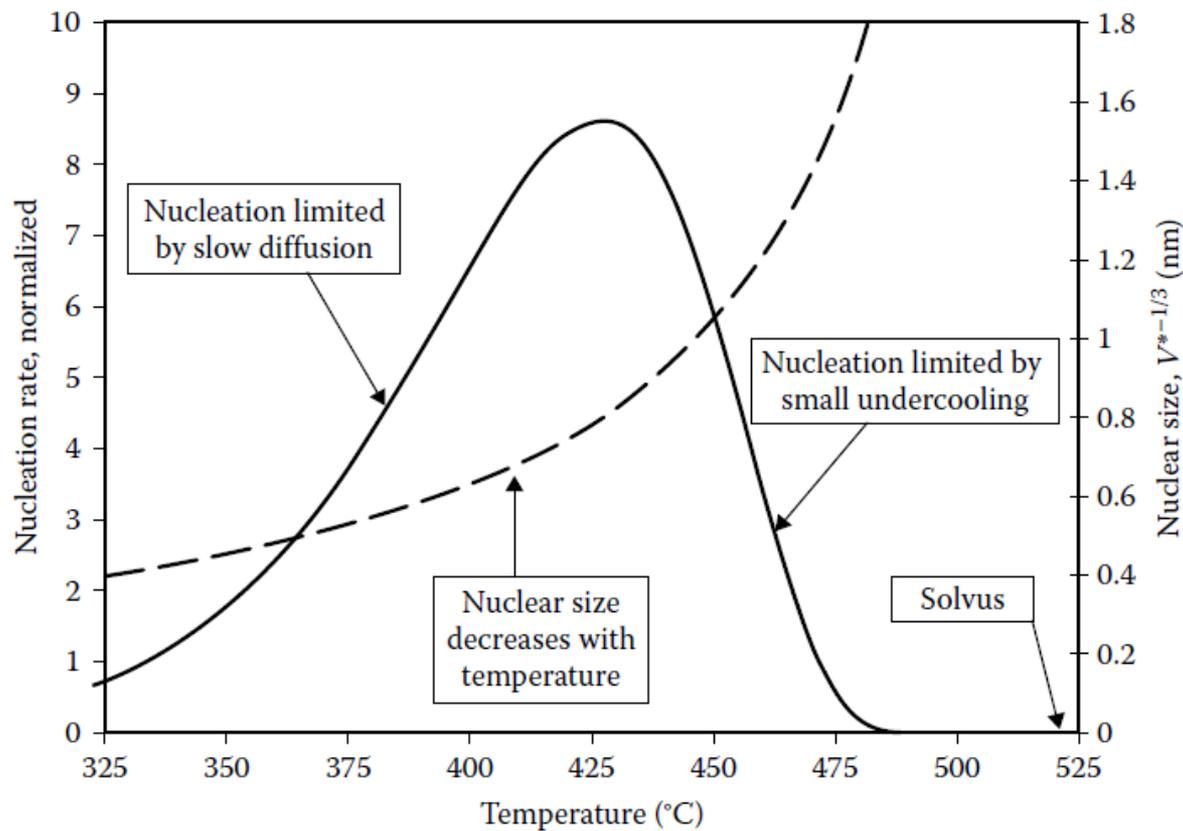
Для Al-сплавов, упрочнение происходит за счет частиц интерметаллидных фаз, упрочняющее действие которых определяется их размером

Phase	Elements	Nominal Formula	Wrought Series
$\theta'$	Al-Cu	$Al_2Cu$	2xxx
$S'$	Al-Cu-Mg	$Al_2CuMg$	2xxx
$T_1$	Al-Cu-Li	$Al_2CuLi$	2xxx(Li)
$\beta''$	Mg-Si	$Mg_5Si_6$	6xxx
$Q''$	Al-Cu-Mg-Si	??	2xxx, 6xxx
$\eta'$	Al-(Cu)-Mg-Zn	$\sim (Al,Cu)MgZn_2$	7xxx



## Закалка Al-сплавов

### Краткое описание процесса



Quenching theory and technology / B. Lišcic et al. 2-nd ed. CRC Press. 2010

# Моделирование термообработки Al-сплавов

Подход к моделированию. Моделирование образования метастабильных фаз

**QForm** позволяет пользователю задавать TTT диаграммы для каждой метастабильной фазы

The screenshot displays the QForm software interface for material simulation. It is divided into several panels:

- Left Panel (Deformed materials):** Shows material type (Mixture) and phase composition. Under 'Al solid solution', there are sub-phases: GP, Eta metastable, and Eta stable. A red box highlights this section.
- Right Panel (Properties):** Shows 'Phase transformations' with a table of transformation kinetic models. A red box highlights the 'Diffusion (TTT)' model for several transformations.
- Table (Phase transformations list):**

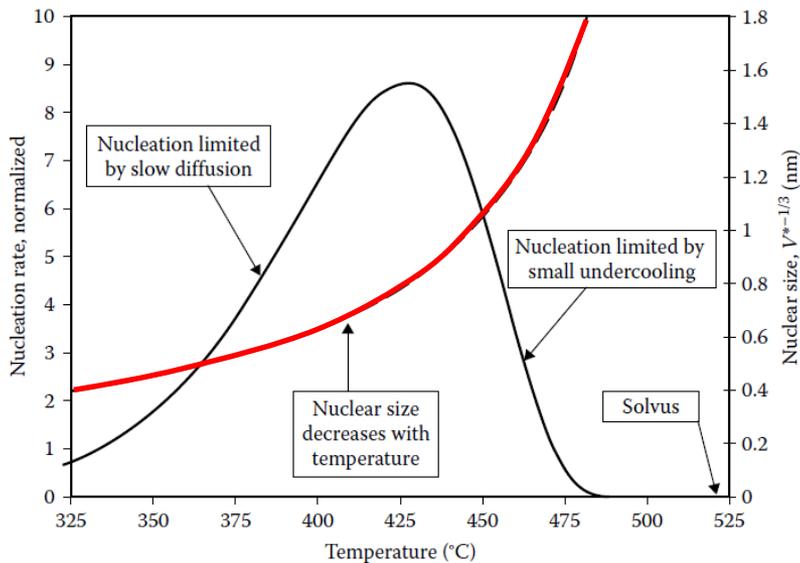
	Mother phase	Child phase	Transformation kinetic model
1	Al solid solution	GP	Diffusion (TTT)
2	GP	Eta metastable	Diffusion (TTT)
3	Eta metastable	Eta stable	Diffusion (TTT)
4	Al solid solution	S	Diffusion (TTT)
5	Al solid solution	T	Diffusion (TTT)
- Bottom Panel (TTT curves):** A plot of Temperature (C) vs Time (h) on a semi-log scale. The y-axis ranges from 0 to 500, and the x-axis ranges from 0.001 to 1000. The plot shows several curves representing different phase transformations, with a legend listing models like AL2CU(0.1%), S\_AL2CUMG(0.1%), MGZN2(0.1%), T\_ALCUMGZN(0.1%), THETA\_PRIME\_HET(0.1%), S\_PRIME\_HET(0.1%), ETA\_PRIME\_HET(0.1%), T\_PRIME\_HET(0.1%), T1\_ALCULI(0.1%), and GP(0.1%). A red box highlights the legend.

TTT curves from JMatPro v. 10 - demo

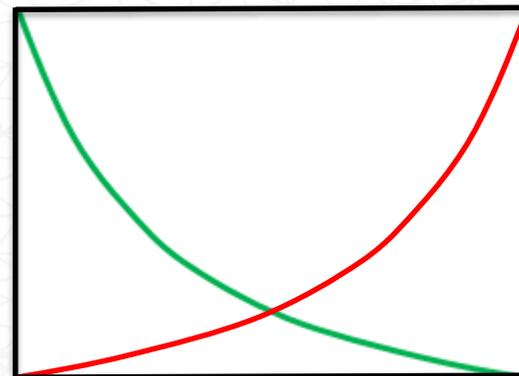
## Моделирование термообработки Al-сплавов

Подход к моделированию. Моделирование образования метастабильных фаз

Для учета влияния размеров упрочняющих частиц на эксплуатационные свойства, твердость и предел прочности для каждой фазы нужно задавать табличными функциями от температуры



Твердость (или  $\sigma_B$ )



Размер частицы упрочняющей фазы

Температура

Quenching theory and technology / B. Lišcic et al.  
2-nd ed. CRC Press. 2010

Hardness  
 Table function [Edit](#)

Tensile strength  
 Table function [Edit](#)

## Моделирование термообработки Al-сплавов

*Подход к моделированию. Моделирование образования метастабильных фаз*

### **Преимущества подхода:**

- Возможность моделирование режимов термообработки, состоящих из одной или нескольких стадий, например: W, T4, T6, T76 и т. д.;
- Возможно задавать обратные фазовые превращения (моделировать растворение метастабильных фаз в процессе нагрева) с учетом равновесных концентраций фаз;
- Возможно выполнять оптимизацию процесса нагрева по температуре и времени выдержки перед закалкой;
- Возможно выполнять оптимизацию процесса старения по температуре и времени выдержки.

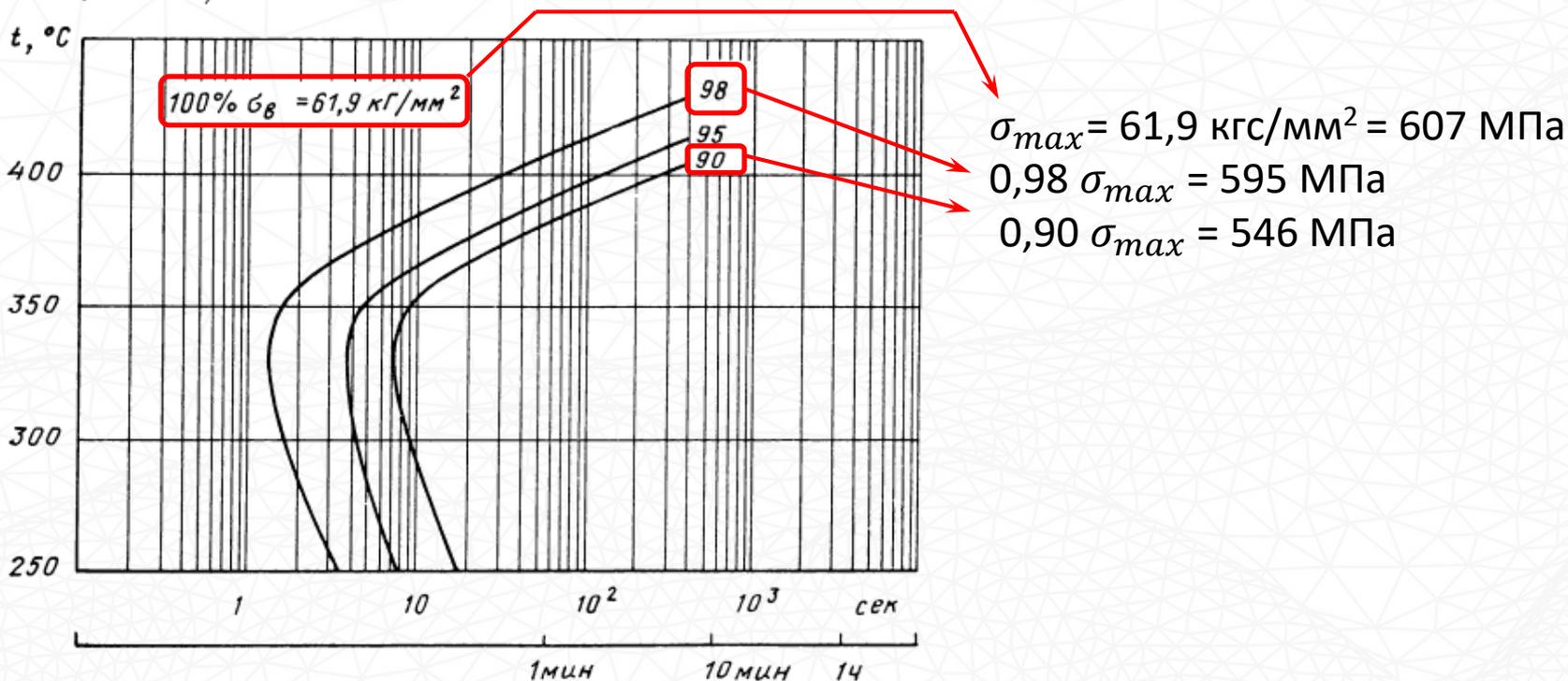
### **Недостатки подхода:**

- Необходимость большого количества исходных данных;
- Отсутствие надежных источников информации;
- Сложная нелинейная взаимосвязь фазового состава и эксплуатационных свойств.

## Моделирование закалки Al-сплавов Подход к моделированию. TTP-диаграммы

**Time – Temperature – Property (TTP)** – диаграмма отражает зависимость эксплуатационных свойств после изотермической закалки и последующего старения сплава от параметров изотермической закалки

Сплав В95 (5,33% Zn; 2,71% Mg; 1,52% Cu; 0,51% Mn; 0,15% Cr).



# Моделирование закалки Al-сплавов

## Задание списка «фаз»

The screenshot shows the 'Деформируемые материалы' (Deformable materials) window. The 'Фазовый состав' (Phase composition) section is highlighted with a red box. It contains two dropdown menus: '7075-T6' and '7075-O'. A red arrow points from this section to a separate callout box on the left, which also contains the same two dropdown menus. The main window also shows other material properties like 'Тип материала' (Material type) set to 'Смесь' (Mixture), 'Твердость' (Hardness), 'Предел прочности' (Tensile strength), and 'Химический состав' (Chemical composition). The 'Характерный интервал температур' (Characteristic temperature range) is set to 250 - 450 °C. The 'Свойства' (Properties) panel on the right shows 'Свойства фаз' (Phase properties) with '7075-T6' and '7075-O' listed, and 'Фазовые переходы' (Phase transitions) with '7075-T6 -> 7075-O' listed.

## Моделирование закалки Al-сплавов Задание эксплуатационных свойств для «фаз»

T1 – после закалки и  
искусственного старения  
(T6 – temper designation)

M - отожженный  
(Annealed, O – temper designation)

$HV_{max}$

Твердость

Постоянная величина 210 HV

Предел прочности

Постоянная величина 556 МПа

$\sigma_{max}$

$HV_{min}$

Твердость

Постоянная величина 59 HV

Предел прочности

Постоянная величина 230 МПа

$\sigma_{min}$

## Моделирование закалки Al-сплавов Задание TTP-диаграммы

Деформируемые материалы

Назначить | Создать | Создать папку | Сохранить | Сохранить как... | Удалить | Экспортировать | Импортировать | Стандарт: AISI/SAE | Debug

Модель превращения: Диффузионное (TTT)

Объемная доля фазы для TTT кривой начала превращения:  $\xi_{min}$  3.411 [%]

Объемная доля фазы для TTT кривой конца превращения:  $\xi_{max}$  17.054 [%]

Curves morphing

TTT кривая начала превращения		TTT кривая завершения превращения	
Тип параметра	Количество	Тип параметра	Количество
Температура [°C]	31	Температура [°C]	31

Выбрать пара | Загрузить данные | Экспортировать

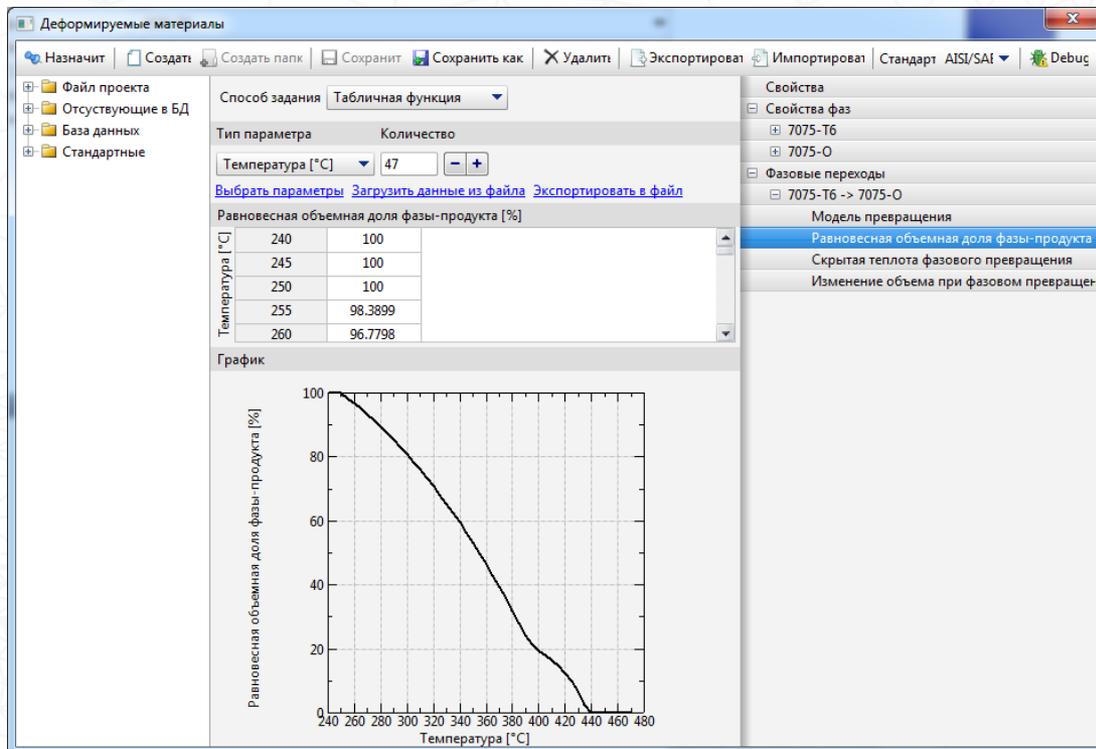
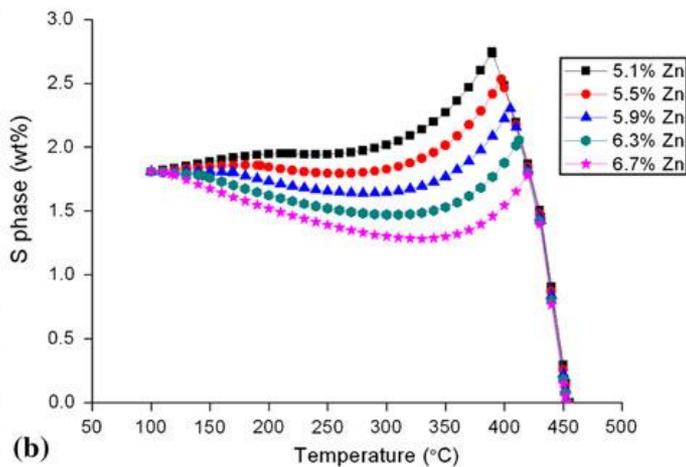
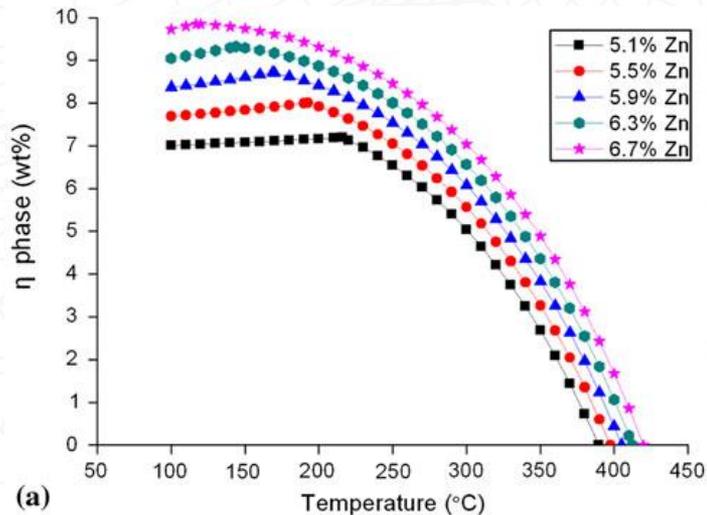
TTT кривая начала превращения		TTT кривая завершения превращения	
Температура [°C]	Время [с]	Температура [°C]	Время [с]
250	6.2291	289.61	12.2096
257.792	5.11458	300	10.0042
266.883	4.19423	309.74	8.40031
279.87	3.116		
290.909	2.4914		
299.351	2.09372		
305.844	1.80464		

$$\xi(\sigma) = \left( 1 - \frac{\sigma - \sigma_{min}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} \right) \cdot 100\%$$

$\xi(545 \text{ МПа}) = 3,441\%$   
 $\xi(500 \text{ МПа}) = 17,054\%$

График

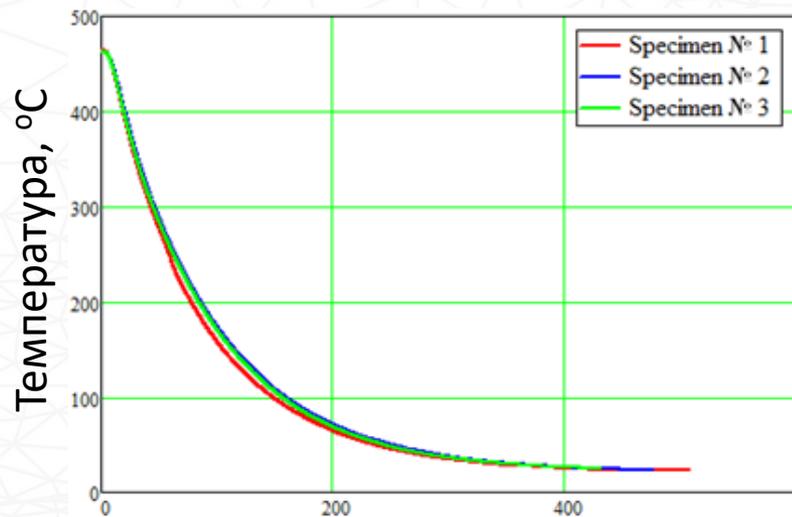
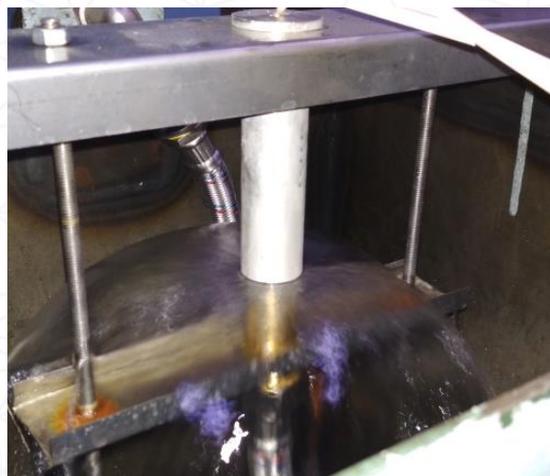
## Моделирование закалки Al-сплавов Максимальная степень разупрочнения



Yu J., Li X. Modelling of the Precipitated Phases and Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloys // JPEDAV. 2011. Vol. 32. P. 350-360

## Моделирование закалки Al-сплавов Эксперимент

AlH	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Be	Bi
45165	0.107	0.161	1.5958	0.272	1.754	0.084	0.004	5.44	0.008	0.0017	<0.001
Ca	Cd	Co	Pb	Sb	Sn	Sr	V	Zr			
0.0005	<0.0001	<0.001	0.002	0.003	0.001	<0.0001	<0.001	0.0037			



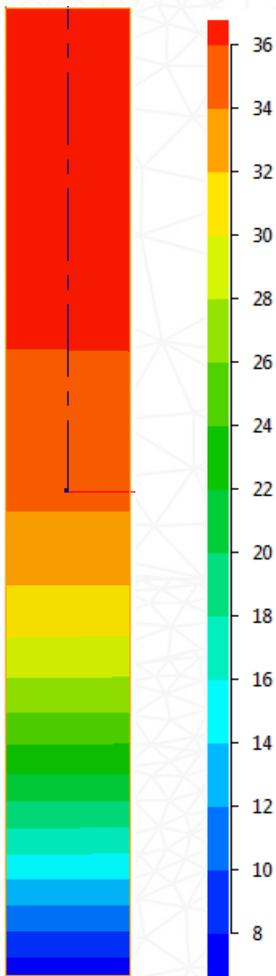
Время, с



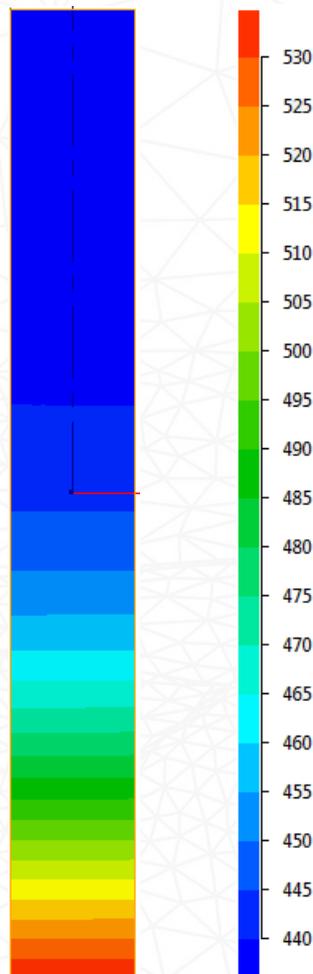
# Моделирование закалки Al-сплавов

## Результаты расчета

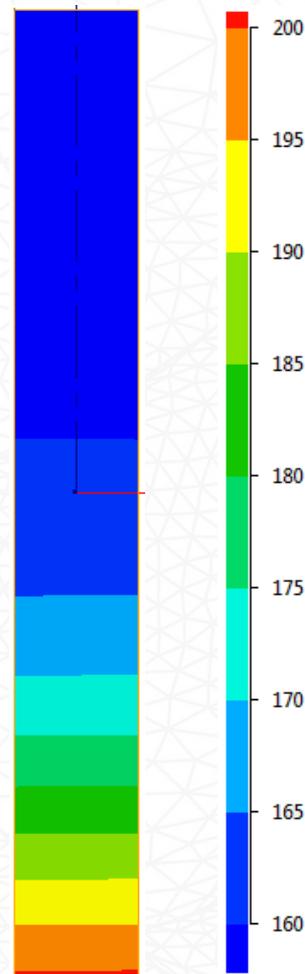
Степень разупрочнения, %



Предел прочности, МПа



Твердость, HV



## Моделирование закалки Al-сплавов Сравнение с экспериментом

