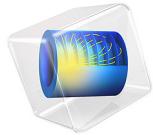


在 COMSOL Multiphysics 6.3 版本中创建



# 钢坯淬火

## 简介

---

淬火是一种热处理工艺，用于调整微观结构，控制钢部件中的变形和残余应力。如果可以最大限度地减少变形，则可以避免淬火后的制造操作，例如磨削。从耐久性的角度来看，部件表面的压缩残余应力可能是有益的，原因是它降低了疲劳失效的可能性。一种趋势是尝试使用经过热处理的钢部件，这保留了表面上的有益压应力，并降低了总制造成本。

本例中我们分析钢坯。钢坯首先加热到 900°C，然后在油中淬火。随着温度降低，奥氏体分解成铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体的组合。本模型介绍如何定义该工艺中涉及的与温度相关的冶金相变，以及如何计算钢坯中的非均相组成。在淬火过程中，相变应变会产生应力和变形。本模型介绍如何通过将与温度相关的相变耦合到弹塑性分析来计算这些应力和变形，其中包含传统塑性和相变诱导塑性 (TRIP) 等效应。

## 模型定义

---

钢坯是长 20 cm、半径 2 cm 的实心圆柱体。通过与温度相关的传热系数，钢坯在油中淬火，可以通过与温度相关的传热系数描述其表面边界与油之间的热交换。由于对称性，在二维轴对称中只分析一半的钢坯。钢坯如图 1 所示。下面讨论热边界条件和机械边界条件。

## 材料属性

钢坯的材料属性与温度有关，也与相有关。“奥氏体分解”物理场接口自动将这些属性平均为定义复合材料的有效属性。复合材料用于热分析和力学分析。

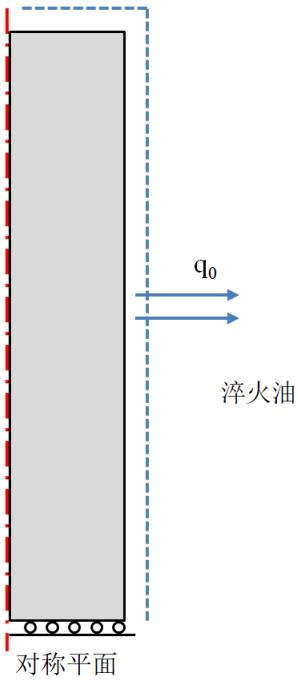


图1：钢坯的轴对称模型。

### 相变分析

在冷却过程中，奥氏体可分解为铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体的组合。向马氏体的相变是位移性的，可用 Koistinen-Marburger 模型描述。本模型表明，以奥氏体为代价形成的马氏体量取决于可用奥氏体的比例，以及低于马氏体开始温度  $M_s$  的过冷度。在微分形式上，模型由下式给出

$$\dot{\xi}^d = -\xi^s \beta \dot{T}$$

其中目标相（马氏体）形成的速率与温度速率和源相（奥氏体）的瞬时比例成正比，比例因子为 Koistinen-Marburger 系数  $\beta$ 。请注意，马氏体仅在冷却过程中形成，这意味着温度速率必须为负。使用 Leblond-Devaux 模型对剩余的扩散型相变进行建模。本模型的特征在于与源相的可用部分成比例的贡献项，以及与形成的目标相的当前部分成比例的延迟项。比例由两个温度相关函数  $K$  和  $L$  给出。

$$\dot{\xi}^d = K(T)\xi^s - L(T)\xi^d$$

描述奥氏体分解为铁素体、珠光体和贝氏体所需的参数在下面的[表格 1](#)、[表格 2](#) 和 [表格 3](#) 中给出。

表格 1：奥氏体到铁素体，温度相关函数。

温度 (°C)	K (1/s)	L (1/s)
450	0	0
620	0.005	0.001
750	0	0

表格 2：奥氏体到珠光体，温度相关函数。

温度 (°C)	K (1/s)	L (1/s)
450	0	0
550	0.015	0.001
750	0	0

表格 3：奥氏体到贝氏体，温度相关函数。

温度 (°C)	K (1/s)	L (1/s)
450	0	0
620	0.005	0.001
750	0	0

马氏体的形成以牺牲源相（奥氏体）的可用部分为代价，[表格 4](#) 中给出了定义这种相变的两个参数。

表格 4：奥氏体到马氏体参数。

参数	值
$M_s$	300°C
$\beta$	0.011 /K

## 热分析

棒内的传热由热方程描述：

$$\rho C_p \dot{T} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

其中， $T$  是温度， $k$  表示导热系数， $\rho$  表示密度， $C_p$  表示比热容， $Q$  是热源。导热系数、密度和比热容通常与温度相关，但在存在冶金相变的情况下，它们也取决于当前的相组成。举例来说，奥氏体的导热系数与铁素体的不同，随着相分数的变化，复合

材料的导热系数也会发生改变。在目前的热分析中，相变潜热忽略不计，因此  $Q=0$ 。各个冶金相的密度、比热容和导热系数在表格 5 中给出。

表格 5：温度相关的热材料属性。

温度 (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/(kg·K))	$k$ (W/(m·K))
奥氏体			
0	7930	520	15
300		560	20
600		590	22
900		620	25
铁素体、珠光体、贝氏体			
0	7850	480	50
300		570	42
600		640	35
900		700	26
马氏体			
0	7850	480	44
300		570	38
600		640	30
900		650	24

本模型中，我们假设铁素体、珠光体和贝氏体具有相同的热属性。此外，从热扩散系数的角度来看，假设各相的密度与温度无关。

### 边界条件

淬火油没有明确建模，但它由与温度相关的传热系数  $h$  代替，根据这个系数可以得到热通量为

$$q_0 = h(T)(T_{\text{ext}} - T)$$

其中， $T_{\text{ext}} = 80^{\circ}\text{C}$  是淬火油的温度。淬火油的传热属性如表格 6 所示。

表格 6：淬火油的传热系数。

温度 (°C)	$h$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))
0	200
300	200
500	2800

表格 6：淬火油的传热系数。

温度 (°C)	$h$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))
650	750
1300	750

### 力学分析

淬火过程是瞬态的，但从结构力学的角度来看，它是准静态的，并按后者进行建模。应力和应变通过由相组成和各个相的本构特性定义的复合材料的材料属性来计算。

### 材料属性

与热分析一样，机械分析涉及与温度和相组成相关的材料属性。在本模型中，各个金相的塑性特性被视为具有线性硬化的线弹性。力学材料属性如表格 7 所示。线弹性特性由各个相的杨氏模量 ( $E$ ) 和泊松比 ( $\nu$ ) 给出，塑性特性由初始屈服应力 ( $\sigma_{ys0}$ ) 和各向同性硬化模量 ( $h$ ) 给出。本模型中，我们假设相间的弹性特性相等。请注意，热膨胀的正割系数 ( $\alpha$ ) 不会平均到复合材料属性中，而是用于计算每个金相的热应变张量。然后对热应变张量求平均值，得到复合材料的热应变。

表格 7：与温度相关的力学材料属性。

温度 (°C)	$E$ (GPa)	$\nu$	$\sigma_{ys0}$ (MPa)	$h$ (GPa)	$\alpha$ (1/K)
奥氏体					
0	210	0.3	200	1	$22 \cdot 10^{-6}$
300	180		135	15	
600	165		40	11	
900	120		36	0.6	
铁素体、珠光体、贝氏体					$15 \cdot 10^{-6}$
0	210	0.3	400	1	
300	180		200	15	
600	165		150	11	
900	120		35	0.6	
马氏体					$14 \cdot 10^{-6}$
0	210	0.3	1600	1	
300	180		1500	15	
600	165		1400	11	
900	120		100	0.6	

为了完成相属性的描述，必须为每个金相定义体积参考温度  $T_{ref}$ 。体积参考温度的选择在一定程度上是任意的。本模型中，我们没有明确考虑加热阶段（奥氏体化），因此

将体积参考温度设置为奥氏体化温度 (900°C)，这意味着钢坯在此温度下无应变。为了说明（未知）基础相组成的热膨胀和奥氏体化产生的应变，我们应用了初始应变。

### 边界条件

我们仅对半个钢坯进行建模，并将位移对称边界条件应用于中面。

### 相变诱导塑性 (TRIP)

通常，当材料受到力学应力时会发生相变，产生相变诱导塑性或 TRIP。实质上，材料的非弹性应变源自低于屈服应力的应力，不会引起经典塑性意义上的塑性流动。本模型中，TRIP 效应包含在每个相变中。需要两个参数来描述效果：参数  $K_{s \rightarrow d}^{\text{TRIP}}$  和饱和函数  $\Phi$ 。为简单起见，在没有额外实验支持的情况下，模型中的每个相变都采用这两个参数的默认值。

### 相塑性

我们可以在各个相中考虑塑性。默认情况下，各个相的等效塑性应变遵循复合材料的等效塑性应变。也就是说，“奥氏体分解”接口中给定相的等效塑性应变等于“固体力学”下“塑性”节点的等效塑性应变。这种等效性通过“相变应变”多物理场耦合建立。对于正在消失的奥氏体，这是一个合理的建模假设。不过，对于逐渐出现且没有预先塑性应变的相，这种假设是有问题的。根据[参考资料 1](#)，这种缺陷可以通过允许目标相的塑性恢复来弥补。对模型中的每个目标相执行此操作。

### 加热和奥氏体化产生的初始应变

为了说明（未知）基础相组成的热膨胀和奥氏体化产生的应变，我们应用了初始应变，它由下式给出

$$\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

## 结果与讨论

当钢坯冷却时，奥氏体分解成铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体的组合。由于冷却速度不均匀，整个钢坯中的相组成会有所不同。例如，钢坯末端的冷却速度比中段高。这表明铁素体、珠光体和贝氏体相变减少，有利于向马氏体的转变，原因是这种转变是由低于开始温度  $M_s$  的过冷量控制，见图 2（左）。

在冷却过程中，钢坯中的材料会发生应变。温度变化产生热应变，机械应力会导致相变诱导塑性 (TRIP)。应力超过复合材料的初始屈服应力，这可以在图 2（中）中看到，在钢坯表面观察到最大等效塑性应变。淬火仿真计算残余应力。图 2（右）显示轴向应力。请注意，钢坯表面的应力是压应力。从疲劳的角度来看，这通常是有益的。

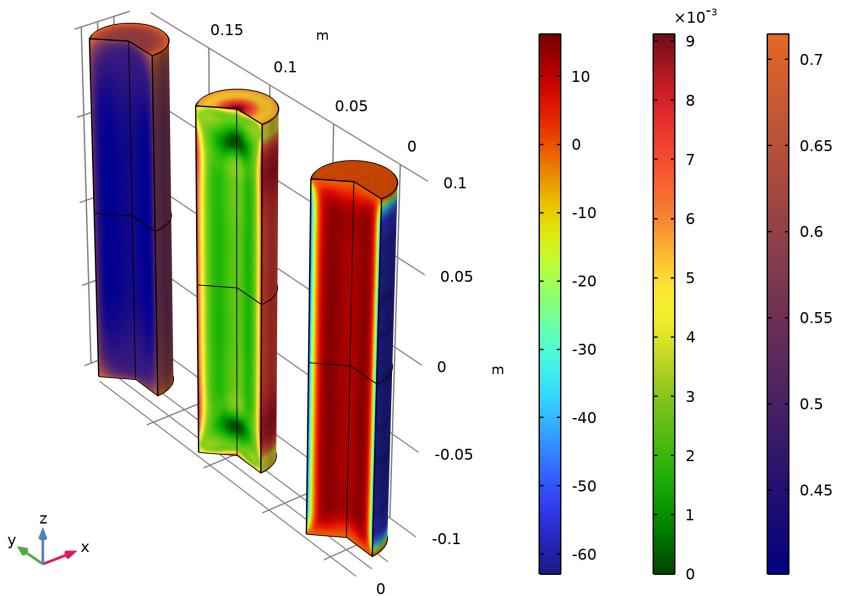


图2：马氏体的相分数（左）、等效塑性应变（中）和轴向拉应力（右）。

显示了钢坯中平面两个位置的演变相组成：图3显示表面的相组成，图4显示钢坯中心的相组成。比较这些相组成，钢坯表面的最终马氏体比例高于中心位置。在表面，冷却速度由传热系数和表面与淬火油之间的温差决定。如果油能够提供足够高的冷却速率，扩散控制的相变会受到限制，有利于位移马氏体相变。相反，钢坯中心的材料点的冷却速率受到材料热扩散系数的限制。通常在材料中添加某些合金元素来改变相变特性。这样可以减少甚至抑制某些扩散控制的相变。

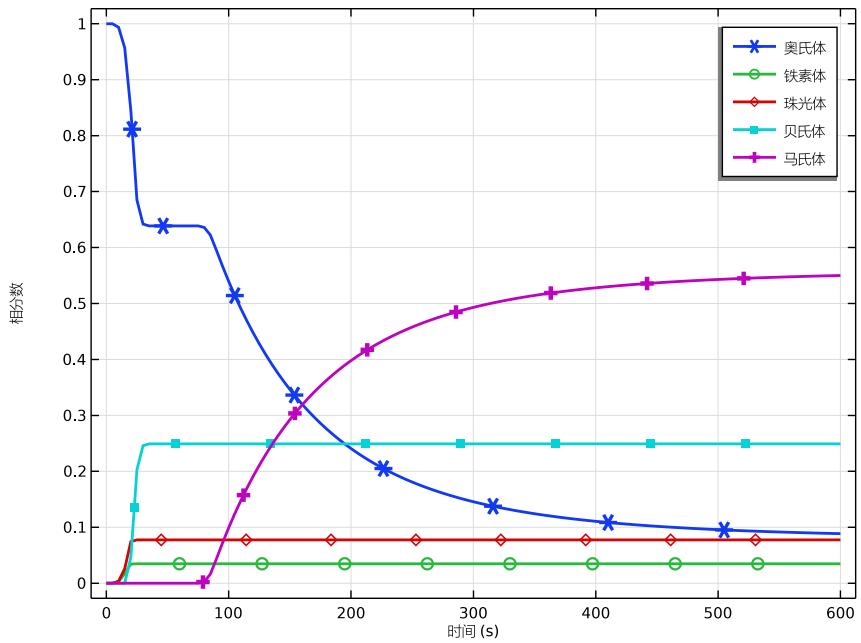


图3：钢坯中部表面的相组成。

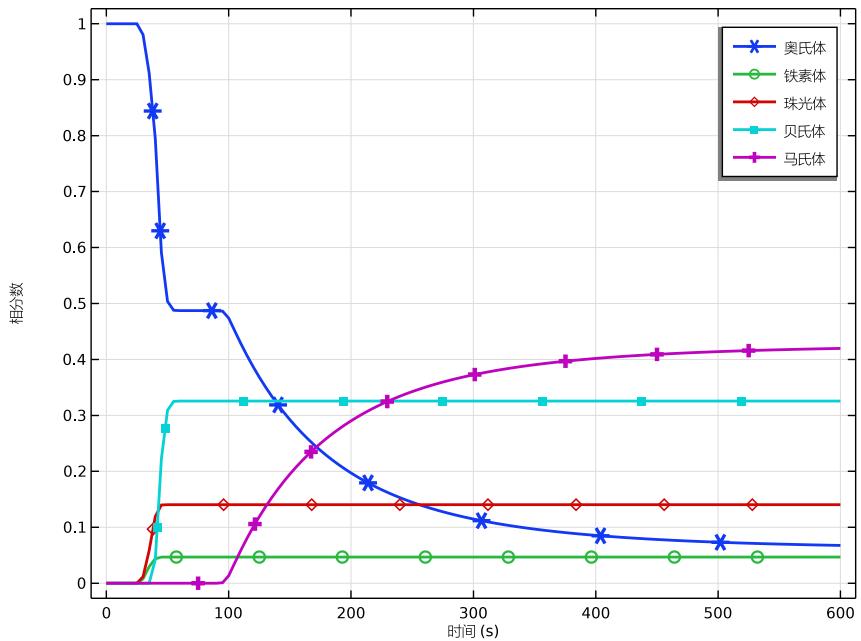


图4：钢坯中心的相组成。

## 参考资料

1. J.B. Leblond, “Mathematical modelling of transformation plasticity in steels II: Coupling with strain hardening phenomena,” *Int. J. Plast.*, vol. 5, pp. 573–591, 1989.

---

案例库路径: Metal\_Processing\_Module/Steel\_Quenching/  
quenching\_of\_a\_steel\_billet

---

## 建模操作说明

从文件菜单中选择新建。

### 新建

在新建窗口中，单击 模型向导。

## 模型向导

- 1 在模型向导窗口中，单击 二维轴对称。
- 2 在选择物理场树中选择传热 > 金属加工 > 钢淬火。
- 3 单击添加。
- 4 单击 研究。
- 5 在选择研究树中选择一般研究 > 瞬态。
- 6 单击 完成。

## 几何 1

创建一个节点组，其中包含奥氏体到铁素体的温度相关数据。

## 全局定义

### 奥氏体到铁素体

- 1 在模型开发器窗口中，右键单击全局定义并选择节点组。
- 2 在组的设置窗口中，在标签文本框中键入“奥氏体到铁素体”。

### 插值 1 (int1)

- 1 在主屏幕工具栏中单击 函数，然后选择全局 > 插值。
- 2 在插值的设置窗口中，定位到定义栏。
- 3 在函数名称文本框中键入“K\_Austenite\_to\_Ferrite”。
- 4 单击 从文件加载。
- 5 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 `quenching_of_a_stell_billet_K_Austenite_to_Ferrite.txt`。
- 6 定位到内插和外推栏。从插值列表中选择分段三次。
- 7 定位到单位栏。在变元表中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

- 8 在函数表中，输入以下设置：

函数	单位
K_Austenite_to_Ferrite	1/s

### 插值 2 (int2)

- 1 在主屏幕工具栏中单击 函数，然后选择全局 > 插值。
- 2 在插值的设置窗口中，定位到定义栏。

- 3 在**函数名称**文本框中键入“L\_Austenite\_to\_Ferrite”。
- 4 单击 **从文件加载**。
- 5 浏览到该App的“案例库”文件夹，然后双击文件  
`quenching_of_a_steele_billet_L_Austenite_to_Ferrite.txt`。
- 6 定位到**内插和外推栏**。从**插值**列表中选择**分段三次**。
- 7 定位到**单位栏**。在**变元表**中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

- 8 在**函数表**中，输入以下设置：

函数	单位
L_Austenite_to_Ferrite	1/s

以类似的方式为奥氏体到珠光体和贝氏体的变换创建节点组和插值函数，并从文件加载适当的函数。

获取杨氏模量的温度相关数据。

#### *插值 7 (int7)*

- 1 在**主屏幕**工具栏中单击 **函数**，然后选择**全局 > 插值**。
- 2 在**插值**的设置窗口中，定位到**定义栏**。
- 3 在**函数名称**文本框中键入“EYoung”。
- 4 单击 **从文件加载**。
- 5 浏览到该App的“案例库”文件夹，然后双击文件  
`quenching_of_a_steele_billet_EYoung.txt`。
- 6 定位到**单位栏**。在**变元表**中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

- 7 在**函数表**中，输入以下设置：

函数	单位
EYoung	GPa

获取淬火油传热系数的温度相关数据。

#### *插值 8 (int8)*

- 1 在**主屏幕**工具栏中单击 **函数**，然后选择**全局 > 插值**。

- 2 在插值的设置窗口中，定位到定义栏。
- 3 在函数名称文本框中键入“htc”。
- 4 单击 从文件加载。
- 5 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件  
quenching\_of\_a\_steele\_billet\_htcOil.txt。
- 6 定位到单位栏。在变元表中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

- 7 在函数表中，输入以下设置：

函数	单位
htc	W/(m^2*K)

接下来，创建钢坯的几何形状。

## 几何 1

### 矩形 1 (r1)

- 1 在几何工具栏中单击 矩形。
- 2 在矩形的设置窗口中，定位到大小和形状栏。
- 3 在宽度文本框中键入“0.02”。
- 4 在高度文本框中键入“0.1”。
- 5 在几何工具栏中单击 全部构建。

### 奥氏体分解 (AUDC)

模型中忽略相变潜热，但包括传统塑性和 TRIP。

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1)节点下，单击奥氏体分解 (audc)。
- 2 在奥氏体分解的设置窗口中，定位到传热栏。
- 3 清除启用相变潜热复选框。
- 4 定位到固体力学栏。选中启用相塑性复选框。

假设各相的体积参考温度相等。

输入奥氏体的材料数据。首先，创建所需的相材料。

- 5 定位到材料属性栏。单击该栏右上角的创建复合材料。

### 奥氏体

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) > 奥氏体分解 (audc)节点下，单击奥氏体。

- 2 在**金相**的设置窗口中，定位到**相材料**栏。
- 3 单击该栏右上角的**创建相材料**。
- 4 定位到**力学属性**栏。从**各向同性硬化模型**列表中选择**线性**。

#### 铁素体

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**铁素体**。
- 2 在**金相**的设置窗口中，定位到**相材料**栏。
- 3 单击该栏右上角的**创建相材料**。
- 4 定位到**力学属性**栏。从**各向同性硬化模型**列表中选择**线性**。

#### 珠光体

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**珠光体**。
- 2 在**金相**的设置窗口中，定位到**相材料**栏。
- 3 单击该栏右上角的**创建相材料**。
- 4 定位到**力学属性**栏。从**各向同性硬化模型**列表中选择**线性**。

#### 贝氏体

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**贝氏体**。
- 2 在**金相**的设置窗口中，定位到**相材料**栏。
- 3 单击该栏右上角的**创建相材料**。
- 4 定位到**力学属性**栏。从**各向同性硬化模型**列表中选择**线性**。

#### 马氏体

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**马氏体**。
- 2 在**金相**的设置窗口中，定位到**相材料**栏。
- 3 单击该栏右上角的**创建相材料**。
- 4 定位到**力学属性**栏。从**各向同性硬化模型**列表中选择**线性**。

#### 全局定义

在**模型开发器**窗口中展开**组件 1 (comp1) > 材料**节点。

#### 奥氏体 (mat2)

在**模型开发器**窗口中展开**全局定义 > 材料**节点。

#### 插值 1 (int1)

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**奥氏体 (mat2)**节点。
- 2 右键单击**全局定义 > 材料 > 奥氏体 (mat2) > 基本 (def)** 并选择**函数 > 插值**。
- 3 在**插值**的设置窗口中，定位到**定义**栏。

- 4 在**函数名称**文本框中键入“k”。
- 5 单击 **从文件加载**。
- 6 浏览到该App的“案例库”文件夹，然后双击文件  
`quenching_of_a_steele_billet_kAustenite.txt`。
- 7 定位到**单位**栏。在**变元表**中，输入以下设置：

<u>变元</u>	<u>单位</u>
t	degC

- 8 在**函数表**中，输入以下设置：

<u>函数</u>	<u>单位</u>
k	W/(m*K)

#### *奥氏体 (mat2)*

- 1 在**模型开发器**窗口的**全局定义 > 材料 > 奥氏体 (mat2)**节点下，单击**基本 (def)**。
- 2 在**基本的设置**窗口中，定位到**模型输入**栏。
- 3 单击 **选择物理量**。
- 4 在**物理量**对话框中，在文本框中键入“温度”。
- 5 在**模型树**中选择**常规 > 温度 (K)**。
- 6 单击**确定**。

#### *插值 2 (int2)*

- 1 在**主屏幕**工具栏中单击 **函数**，然后选择**全局 > 插值**。
- 2 在**插值的设置**窗口中，定位到**定义**栏。
- 3 在**函数名称**文本框中键入“Cp”。
- 4 单击 **从文件加载**。
- 5 浏览到该App的“案例库”文件夹，然后双击文件  
`quenching_of_a_steele_billet_CpAustenite.txt`。
- 6 定位到**单位**栏。在**变元表**中，输入以下设置：

<u>变元</u>	<u>单位</u>
t	degC

- 7 在**函数表**中，输入以下设置：

<u>函数</u>	<u>单位</u>
Cp	J/(kg*K)

### 奥氏体 (mat2)

- 1 在模型开发器窗口的全局定义 > 材料 > 奥氏体 (mat2) 节点下，单击基本 (def)。
- 2 在基本的设置窗口中，定位到输出属性栏。
- 3 在表中输入以下设置：

属性	变量	表达式
导热系数	$k_{iso} ; k_{ii} = k_{iso}, k_{ij} = 0$	$k(T)$
密度	$\rho$	7930
恒压热容	$C_p$	$C_p(T)$

- 4 在模型开发器窗口的全局定义 > 材料 > 奥氏体 (mat2) 节点下，单击热膨胀 (ThermalExpansion)。
- 5 在热膨胀的设置窗口中，定位到输出属性栏。
- 6 在表中输入以下设置：

属性	变量	表达式
热膨胀系数	$\alpha_{iso} ; \alpha_{ii} = \alpha_{iso}, \alpha_{ij} = 0$	$2.2e-5$

- 7 在模型开发器窗口的全局定义 > 材料 > 奥氏体 (mat2) 节点下，单击杨氏模量和泊松比 (Enu)。
- 8 在杨氏模量和泊松比的设置窗口中，定位到模型输入栏。
- 9 单击 选择物理量。
- 10 在物理量对话框中，选择模型树中的常规 > 温度 (K)。
- 11 单击确定。
- 12 在杨氏模量和泊松比的设置窗口中，定位到输出属性栏。
- 13 在表中输入以下设置：

属性	变量	表达式
杨氏模量	$E$	$EYoung(T)$
泊松比	$\nu$	0.3

- 14 在模型开发器窗口的全局定义 > 材料 > 奥氏体 (mat2) 节点下，单击弹塑性材料模型 (ElastoplasticModel)。
- 15 在弹塑性材料模型的设置窗口中，定位到模型输入栏。
- 16 单击 选择物理量。
- 17 在物理量对话框中，选择模型树中的常规 > 温度 (K)。

18 单击确定。

#### 插值 1 (int1)

- 1 在主屏幕工具栏中单击 函数，然后选择全局 > 插值。
- 2 在插值的设置窗口中，定位到定义栏。
- 3 在函数名称文本框中键入 “sY”。
- 4 单击 从文件加载。
- 5 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 `quenching_of_a_steele_billet_sYAustenite.txt`。
- 6 定位到单位栏。在变元表中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

7 在函数表中，输入以下设置：

函数	单位
sY	MPa

#### 插值 2 (int2)

- 1 在主屏幕工具栏中单击 函数，然后选择全局 > 插值。
- 2 在插值的设置窗口中，定位到定义栏。
- 3 在函数名称文本框中键入 “h”。
- 4 单击 从文件加载。
- 5 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 `quenching_of_a_steele_billet_hardeningAustenite.txt`。
- 6 定位到单位栏。在变元表中，输入以下设置：

变元	单位
t	degC

7 在函数表中，输入以下设置：

函数	单位
h	GPa

#### 奥氏体 (mat2)

- 1 在模型开发器窗口的全局定义 > 材料 > 奥氏体 (mat2) 节点下，单击 **弹塑性材料模型 (ElastoplasticModel)**。

2 在**弹塑性材料**模型的设置窗口中，定位到**输出属性**栏。

3 在表中输入以下设置：

属性	变量	表达式
初始屈服应力	sigmags	sY(T)
各向同性切线模量	Et	h(T)

以类似的方式输入铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体的材料数据。

### 固体传热 (HT)

#### 初始值 1

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1) > 固体传热 (ht)** 节点下，单击**初始值 1**。

2 在**初始值**的设置窗口中，定位到**初始值**栏。

3 在 *T* 文本框中键入 “900[degC]”。

#### 对称 1

1 在**物理场**工具栏中单击 边界，然后选择**对称**。

2 选择“边界”2。

#### 热通量 1

1 在**物理场**工具栏中单击 边界，然后选择**热通量**。

2 选择“边界”3 和 4。

3 在**热通量**的设置窗口中，定位到**热通量**栏。

4 从**通量类型**列表中选择**对流热通量**。

5 在 *h* 文本框中键入 “htc(T)”。

6 在 *T<sub>ext</sub>* 文本框中键入 “80[degC]”。

### 固体力学 (SOLID)

#### 线弹性材料 1

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1) > 固体力学 (solid)** 节点下，单击**线弹性材料 1**。

#### 塑性 1

1 在**物理场**工具栏中单击 属性，然后选择**塑性**。

使用复合材料的硬化特性。

2 在**塑性**的设置窗口中，定位到**塑性模型**栏。

3 找到**各向同性硬化模型**子栏。从列表中选择**硬化函数**。

## 线弹性材料 1

在模型开发器窗口中，单击线弹性材料 1。

### 初始应力和应变 1

1 在物理场工具栏中单击 属性，然后选择初始应力和应变。

2 在初始应力和应变的设置窗口中，定位到初始应力和应变栏。

3 将  $\epsilon_0$  矩阵指定为

0.005	0	0
0	0.005	0
0	0	0.005

## 对称平面 1

1 在物理场工具栏中单击 边界，然后选择对称平面。

2 选择“边界”2。

## 奥氏体分解 (AUDC)

### 奥氏体

1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) > 奥氏体分解 (audc) 节点下，单击奥氏体。

2 在金相的设置窗口中，定位到模型输入栏。

3 在体积参考温度右侧单击 创建模型输入。

## 共享属性

### 模型输入 1

1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) > 定义 > 共享属性节点下，单击模型输入 1。

2 在模型输入的设置窗口中，定位到定义栏。

3 在文本框中键入“900[degC]”。

## 奥氏体分解 (AUDC)

### 奥氏体到铁素体

1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) > 奥氏体分解 (audc) 节点下，单击奥氏体到铁素体。

2 在相变的设置窗口中，定位到相变栏。

3 在  $K_{s \rightarrow d}$  文本框中键入“K\_Austenite\_to\_Ferrite(audc.T)”。

4 在  $L_{s \rightarrow d}$  文本框中键入“L\_Austenite\_to\_Ferrite(audc.T)”。

5 定位到相变应变栏。选中相变诱导塑性复选框。

6 选中目标相的塑性恢复复选框。

### **奥氏体到珠光体**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**奥氏体到珠光体**。
- 2 在**相变的设置**窗口中，定位到**相变栏**。
- 3 在  $K_{s \rightarrow d}$  文本框中键入 “`K_Austenite_to_Pearlite(audc.T)`”。
- 4 在  $L_{s \rightarrow d}$  文本框中键入 “`L_Austenite_to_Pearlite(audc.T)`”。
- 5 定位到**相变应变栏**。选中**相变诱导塑性**复选框。
- 6 选中**目标相的塑性恢复**复选框。

### **奥氏体到贝氏体**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**奥氏体到贝氏体**。
- 2 在**相变的设置**窗口中，定位到**相变栏**。
- 3 在  $K_{s \rightarrow d}$  文本框中键入 “`K_Austenite_to_Bainite(audc.T)`”。
- 4 在  $L_{s \rightarrow d}$  文本框中键入 “`L_Austenite_to_Bainite(audc.T)`”。
- 5 定位到**相变应变栏**。选中**相变诱导塑性**复选框。
- 6 选中**目标相的塑性恢复**复选框。

### **奥氏体到马氏体**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**奥氏体到马氏体**。
- 2 在**相变的设置**窗口中，定位到**相变栏**。
- 3 在  $M_s$  文本框中键入 “`300[degC]`”。
- 4 定位到**相变应变栏**。选中**相变诱导塑性**复选框。
- 5 选中**目标相的塑性恢复**复选框。

### **网格 1**

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，单击**网格 1**。
- 2 在**网格的设置**窗口中，定位到**序列类型**栏。
- 3 从列表中选择**用户控制网格**。

### **大小**

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1) > 网格 1**节点下，单击**大小**。
- 2 在**大小的设置**窗口中，定位到**单元大小**栏。
- 3 从**预定义**列表中选择**超细**。

### **边界层 1**

在**网格工具栏**中单击  **边界层**。

### **边界层属性**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**边界层属性**。

- 2 选择“边界”3和4。
- 3 在**边界层属性的设置**窗口中，定位到**层栏**。
- 4 在**层数**文本框中键入“6”。
- 5 在**拉伸因子**文本框中键入“1.5”。
- 6 在**模型开发器**窗口中，右键单击**网格 1**并选择**全部构建**。

## 研究 1

### 步骤 1：瞬态

- 1 在**模型开发器**窗口的研究 1 节点下，单击**步骤 1：瞬态**。
- 2 在**瞬态**的设置窗口中，定位到**研究设置栏**。
- 3 在**输出时步**文本框中键入“range(0,5,600)”。
- 4 右键单击**研究 1 > 步骤 1：瞬态**并选择**获取以下步骤的初始值**。
- 5 右键单击**步骤 1：瞬态**并选择**获取以下步骤的初始值**。

## 研究 1

### 求解器配置

在**模型开发器**窗口中展开**研究 1 > 求解器配置**节点。

#### 解 1 (sol1)

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**研究 1 > 求解器配置 > 解 1 (sol1)**节点，然后单击**瞬态求解器 1**。
- 2 在**瞬态求解器**的设置窗口中，单击以展开**时间步进栏**。
- 3 从**求解器采用的步长**列表中选择**中级**。
- 4 在**研究工具栏**中单击  **计算**。

设置默认的结果显示单位。

## 结果

### 首选单位 1

- 1 在**结果工具栏**中单击  **配置**，然后选择**首选单位**。
- 2 在**首选单位**的设置窗口中，定位到**单位栏**。
- 3 单击  **添加物理量**。
- 4 在**物理量**对话框中，选择模型树中的**常规 > 温度 (K)**。
- 5 单击**确定**。
- 6 在**首选单位**的设置窗口中，定位到**单位栏**。

7 在表中输入以下设置：

物理量	单位	首选单位
温度	K	°C

8 单击 添加物理量。

9 在物理量对话框中，选择模型树中的**固体力学 > 应力张量 (N/m^2)**。

10 单击确定。

11 在首选单位的设置窗口中，定位到**单位**栏。

12 在表中输入以下设置：

物理量	单位	首选单位
应力张量	N/m^2	MPa

13 单击 应用。

**钢坯中心的相分数**

1 在结果工具栏中单击 一维绘图组。

2 在一维绘图组的设置窗口中，在**标签**文本框中键入“钢坯中心的相分数”。

3 单击以展开**标题栏**。从**标题类型**列表中选择**无**。

4 定位到**绘图设置**栏。

5 选中**y 轴标签**复选框。在关联文本框中键入“相分数”。

**点结果图 1**

1 右键单击**钢坯中心的相分数**并选择**点结果图**。

2 选择“点”1。

3 在**点结果图**的设置窗口中，单击**y 轴数据**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**组件 1 (comp1) > 奥氏体分解 > 奥氏体 > audc.phase1.xi - 相分数 - 1**。

4 单击以展开**着色和样式**栏。从**宽度**列表中选择2。

5 找到**线标记子栏**。从**标记**列表中选择**循环**。

6 从**定位**列表中选择**内插**。

7 单击以展开**图例栏**。选中**显示图例**复选框。

8 从**图例**列表中选择**手动**。

9 在表中输入以下设置：

图例
奥氏体

### 点结果图 2

- 1 右键单击点结果图 1并选择复制粘贴。
- 2 在点结果图的设置窗口中，定位到y 轴数据栏。
- 3 在表达式文本框中键入“`audc.phase2.xi`”。
- 4 定位到图例栏。在表中输入以下设置：

图例

铁素体

### 点结果图 3

- 1 在模型开发器窗口的结果 > 钢坯中心的相分数节点下，右键单击点结果图 1并选择复制粘贴。
- 2 在点结果图的设置窗口中，定位到y 轴数据栏。
- 3 在表达式文本框中键入“`audc.phase3.xi`”。
- 4 定位到图例栏。在表中输入以下设置：

图例

珠光体

### 点结果图 4

- 1 右键单击点结果图 1并选择复制粘贴。
- 2 在点结果图的设置窗口中，定位到y 轴数据栏。
- 3 在表达式文本框中键入“`audc.phase4.xi`”。
- 4 定位到图例栏。在表中输入以下设置：

图例

贝氏体

### 点结果图 5

- 1 右键单击点结果图 1并选择复制粘贴。
- 2 在点结果图的设置窗口中，定位到y 轴数据栏。
- 3 在表达式文本框中键入“`audc.phase5.xi`”。
- 4 定位到图例栏。在表中输入以下设置：

图例

马氏体

### **钢坯表面的相分数**

- 1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**钢坯中心的相分数**并选择**复制粘贴**。
- 2 在**模型开发器**窗口中，单击**钢坯中心的相分数 1**。
- 3 在**一维绘图组的设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“**钢坯表面的相分数**”。

### **点结果图 1**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**点结果图 1**。
- 2 在**点结果图的设置**窗口中，定位到**选择栏**。
- 3 选择  激活选择切换按钮。
- 4 选择“点” 3。

### **点结果图 2**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**点结果图 2**。
- 2 在**点结果图的设置**窗口中，定位到**选择栏**。
- 3 选择  激活选择切换按钮。
- 4 选择“点” 3。

### **点结果图 3**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**点结果图 3**。
- 2 在**点结果图的设置**窗口中，定位到**选择栏**。
- 3 选择  激活选择切换按钮。
- 4 选择“点” 3。

### **点结果图 4**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**点结果图 4**。
- 2 在**点结果图的设置**窗口中，定位到**选择栏**。
- 3 选择  激活选择切换按钮。
- 4 选择“点” 3。

### **点结果图 5**

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**点结果图 5**。
- 2 在**点结果图的设置**窗口中，定位到**选择栏**。
- 3 选择  激活选择切换按钮。
- 4 选择“点” 3。
- 5 在**钢坯表面的相分数**工具栏中单击  绘制。

### **轴向应力分布**

- 1 在**结果**工具栏中单击  一维绘图组。

2 在一维绘图组的设置窗口中，在标签文本框中键入“轴向应力分布”。

3 定位到数据栏。从时间选择列表中选择最后一个。

#### 线结果图 1

1 右键单击轴向应力分布并选择线结果图。

2 选择“边界”2。

3 在线结果图的设置窗口中，单击y轴数据栏右上角的替换表达式。从菜单中选择组件1(comp1)>固体力学>应力>应力张量(空间坐标系)-N/m<sup>2</sup>>solid.sGpzz-应力张量, zz分量。

4 定位到y轴数据栏。从单位列表中选择MPa。

5 定位到x轴数据栏。从参数列表中选择表达式。

6 在表达式文本框中键入“R”。

7 单击以展开着色和样式栏。从宽度列表中选择2。

8 单击以展开质量栏。在轴向应力分布工具栏中单击 $\text{绘制}$ 。

#### 三维镜像 1

1 在结果工具栏中单击 $\text{更多数据集}$ ，然后选择三维镜像。

2 在三维镜像的设置窗口中，定位到平面数据栏。

3 从平面列表中选择XY平面。

#### 三维绘图组 17

1 在结果工具栏中单击 $\text{三维绘图组}$ 。

2 在三维绘图组的设置窗口中，定位到数据栏。

3 从数据集列表中选择三维镜像1。

4 单击以展开标题栏。从标题类型列表中选择无。

5 单击以展开绘图阵列栏。选中启用复选框。

6 从阵列轴列表中选择y。

7 从填充列表中选择绝对。

8 在填充长度文本框中键入“0.05”。

#### 轴向应力

1 右键单击三维绘图组17并选择表面。

2 在表面的设置窗口中，在标签文本框中键入“轴向应力”。

3 单击表达式栏右上角的替换表达式。从菜单中选择组件1(comp1)>固体力学>应力>应力张量(空间坐标系)-N/m<sup>2</sup>>solid.sGpzz-应力张量, zz分量。

4 定位到表达式栏。从单位列表中选择MPa。

### 等效塑性应变

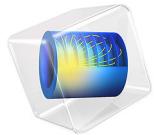
- 1 右键单击**轴向应力**并选择**复制粘贴**。
- 2 在**表面的设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“等效塑性应变”。
- 3 单击**表达式**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**组件 1 (comp1) > 固体力学 > 应变 > solid.opeGp - 等效塑性应变 - 1**。
- 4 定位到**着色和样式**栏。从**颜色表**列表中选择**Traffic**。

### 表面 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开结果 > 马氏体 , 3D (audc) 节点。
- 2 右键单击**表面 1**并选择**复制**。

### 马氏体相分数

- 1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**三维绘图组 17**并选择**粘贴表面**。
- 2 在**表面的设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“马氏体相分数”。



# Quenching of a Steel Billet

## *Introduction*

---

Quenching is a heat treating process that is used to tailor the microstructure, and to control distortions and residual stresses in steel components. If distortions can be minimized, postquenching manufacturing operations such as grinding can be avoided. From an endurance standpoint, compressive residual stresses at the surface of a component can be beneficial because the propensity for fatigue failure is reduced. A tendency is to try to use steel components as heat treated. This preserves beneficial compressive stresses on the surface, and reduces overall manufacturing costs.

In this example, a steel billet is considered. The billet is first heated to 900°C, and then quenched in oil. As the temperature decreases, the austenite decomposes into a combination of ferrite, pearlite, bainite, and martensite. The model shows how to define the temperature-dependent metallurgical phase transformations that are involved in this process, and how to compute the heterogeneous phase composition in the billet. During quenching, phase transformation strains produce stresses and deformations. The model shows how to compute these stresses and deformations by coupling the temperature-dependent phase transformations to an elastoplastic analysis. Effects such as traditional plasticity as well as transformation induced plasticity (TRIP) are included.

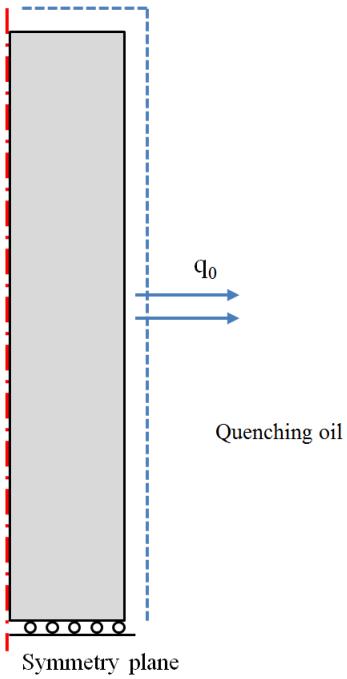
## *Model Definition*

---

The steel billet is a solid cylinder that is 20 cm in length and with a radius of 2 cm. The billet is quenched in oil, uniformly across its boundary, through a temperature-dependent heat-transfer coefficient. Because of symmetries, only half the billet is considered, in 2D axisymmetry. The billet is shown in [Figure 1](#). Thermal and mechanical boundary conditions are discussed below.

### **MATERIAL PROPERTIES**

The material properties of the steel billet are temperature-dependent, and also phase dependent. The Austenite Decomposition physics interface automatically averages these properties into effective properties that define a compound material. The compound material is used in the thermal and mechanical analyses.



*Figure 1: The axisymmetric model of the steel billet.*

#### PHASE TRANSFORMATION ANALYSIS

During cooling, the austenite can decompose into a combination of ferrite, pearlite, bainite, and martensite. The phase transformation into martensite is displacive and described by the Koistinen–Marburger model. The model states that the amount of martensite formed at the expense of austenite depends on the fraction of available austenite, and under-cooling below the so-called martensite start temperature  $M_s$ . On differential form, the model is given by

$$\dot{\xi}^d = -\xi^s \beta \dot{T}$$

where the rate at which the destination phase (martensite) forms is proportional to the temperature rate and the instantaneous fraction of the source phase (austenite), through the Koistinen–Marburger coefficient  $\beta$ . Note that martensite only forms during cooling, meaning that the temperature rate must be negative. The remaining diffusional phase transformations are modeled using the Leblond–Devaux model. This model is

characterized by a contributing term that is proportional to the available fraction of the source phase, and a retardation term that is proportional to the current fraction of formed destination phase. The proportionality is given by two temperature-dependent functions  $K$  and  $L$ .

$$\dot{\xi}^d = K(T)\xi^s - L(T)\xi^d$$

The parameters that are required to describe the austenite decomposition into ferrite, pearlite, and bainite are given in [Table 1](#), [Table 2](#), and [Table 3](#) below.

TABLE I: AUSTENITE TO FERRITE, TEMPERATURE-DEPENDENT FUNCTIONS.

Temperature (°C)	K (l/s)	L (l/s)
450	0	0
620	0.005	0.001
750	0	0

TABLE 2: AUSTENITE TO PEARLITE, TEMPERATURE-DEPENDENT FUNCTIONS.

Temperature (°C)	K (l/s)	L (l/s)
450	0	0
550	0.015	0.001
750	0	0

TABLE 3: AUSTENITE TO BAINITE, TEMPERATURE-DEPENDENT FUNCTIONS.

Temperature (°C)	K (l/s)	L (l/s)
450	0	0
620	0.005	0.001
750	0	0

Martensite forms at the expense of the available fraction of source phase (austenite), and the two parameters that define this phase transformation are given in [Table 4](#).

TABLE 4: AUSTENITE TO MARTENSITE PARAMETERS.

Parameter	Value
$M_s$	300°C
$\beta$	0.011 /K

## THERMAL ANALYSIS

The heat transport in the bar is described by the heat equation:

$$\rho C_p \dot{T} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

where  $T$  is the temperature,  $k$  represents the thermal conductivity,  $\rho$  denotes the density,  $C_p$  denotes the specific heat capacity, and  $Q$  is a heat source. The thermal conductivity, the density, and the specific heat capacity are in general temperature dependent, but in the presence of metallurgical phase transformations, they also depend on the current phase composition. For example, the thermal conductivity of austenite is different from that of ferrite, and as the phase fractions evolve, so will the thermal conductivity of the compound material. In the present thermal analysis, phase transformation latent heat is neglected so that  $Q = 0$ . The densities, specific heat capacities and heat conductivities of the individual metallurgical phases are given in [Table 5](#).

TABLE 5: TEMPERATURE-DEPENDENT THERMAL MATERIAL PROPERTIES.

Temperature (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/(kg·K))	$k$ (W/(m·K))
<b>Austenite</b>			
0	7930	520	15
300		560	20
600		590	22
900		620	25
<b>Ferrite, Pearlite, Bainite</b>			
0	7850	480	50
300		570	42
600		640	35
900		700	26
<b>Martensite</b>			
0	7850	480	44
300		570	38
600		640	30
900		650	24

In the model, it is assumed that ferrite, pearlite, and bainite share thermal properties. Furthermore, from a thermal diffusivity standpoint, it is assumed that the densities of the individual phases are temperature independent.

#### *Boundary Conditions*

The quenching oil is not modeled explicitly, but it is replaced by a temperature-dependent heat-transfer coefficient  $h$  that is used to prescribe a heat flux as

$$q_0 = h(T)(T_{\text{ext}} - T)$$

where  $T_{\text{ext}} = 80^\circ\text{C}$  is the temperature of the quenching oil. The heat-transfer properties of the quenching oil are shown in [Table 6](#).

TABLE 6: HEAT-TRANSFER COEFFICIENT OF THE QUENCHING OIL.

Temperature (°C)	<b>h (W/(m<sup>2</sup>·K))</b>
0	200
300	200
500	2800
650	750
1300	750

### MECHANICAL ANALYSIS

The quenching process is time dependent, but from a structural-mechanics point of view it is quasi static, and modeled as such. Stresses and strains are computed using material properties of the compound material defined by the phase composition and the constitutive behavior of the individual phases.

#### Material Properties

As in thermal analysis, the mechanical analysis involves material properties that are temperature as well as phase composition dependent. In this model, the elastoplastic behavior of the individual metallurgical phases is taken to be linear elastic with linear hardening. The mechanical material properties are shown in [Table 7](#). The linear elastic behavior is given by the Young's moduli ( $E$ ) and Poisson's ratios ( $\nu$ ) of the phases, and the plastic behavior is given by initial yield stresses ( $\sigma_{\text{ys}0}$ ) and isotropic hardening moduli ( $h$ ). In this model, the elastic behavior is assumed to be equal between phases. Note that the secant coefficients of thermal expansion ( $\alpha$ ) are not averaged into a compound material property, but are instead used to compute the thermal strain tensor of each metallurgical phase. The thermal strain tensors are averaged into a thermal strain of the compound material.

TABLE 7: TEMPERATURE-DEPENDENT MECHANICAL MATERIAL PROPERTIES.

Temperature (°C)	<b>E (GPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b><math>\sigma_{\text{ys}0}</math> (MPa)</b>	<b>h (GPa)</b>	<b><math>\alpha</math> (1/K)</b>
<b>Austenite</b>					
0	210	0.3	200	1	$22 \cdot 10^{-6}$
300	180		135	15	
600	165		40	11	

TABLE 7: TEMPERATURE-DEPENDENT MECHANICAL MATERIAL PROPERTIES.

Temperature (°C)	E (GPa)	v	$\sigma_{ys0}$ (MPa)	h (GPa)	$\alpha$ (1/K)
900	120		36	0.6	
Ferrite, Pearlite, Bainite					$15 \cdot 10^{-6}$
0	210	0.3	400	1	
300	180		200	15	
600	165		150	11	
900	120		35	0.6	
Martensite					$14 \cdot 10^{-6}$
0	210	0.3	1600	1	
300	180		1500	15	
600	165		1400	11	
900	120		100	0.6	

To complete the description of the phase properties, a volume reference temperature  $T_{ref}$  has to be defined for each metallurgical phase. The choice of volume reference temperature is to an extent arbitrary. In this model, the heating stage (austenitization) is not considered explicitly, so the volume reference temperature is set to the austenitization temperature (900°C). This means that the billet is strain free at this temperature. To account for the strains that follow from thermal expansion and austenitization of the (unknown) base phase composition, an initial strain is applied.

#### *Boundary Conditions*

Only half the billet is modeled, and a displacement symmetry boundary condition is applied to the midplane.

#### *Transformation Induced Plasticity (TRIP)*

In general, phase transformations occur while the material is subjected to a mechanical stress. This gives rise to so-called transformation induced plasticity, or TRIP. In essence, an inelastic straining of the material results from stresses that are below the yield stress, and would not cause plastic flow in a classical plasticity sense. In this model, the TRIP effect is included in each phase transformation. Two parameters are required to describe the effect: the parameter  $K_{s \rightarrow d}^{\text{TRIP}}$  and the saturation function  $\Phi$ . For simplicity, and with no additional experimental support, both are used with their default values for every phase transformation in the model.

#### *Phase Plasticity*

It is possible to allow for plasticity in the individual phases. By default, the equivalent plastic strain of the individual phases follows that of the compound material. That is to say,

the equivalent plastic strain of a given phase in the Austenite Decomposition interface is equal to the equivalent plastic strain of a Plasticity node under Solid Mechanics. This equivalence is established through the Phase Transformation Strain multiphysics coupling. For the vanishing austenite, this is a reasonable modeling assumption. However, for phases that appear gradually and devoid of prior plastic straining, this assumption is questionable. Following Ref. 1, this deficiency can be remedied by allowing for plastic recovery of the destination phase. This is done for every destination phase in the model.

#### *Initial Strains from Heating and Austenitization*

To account for the strains that follow from thermal expansion and austenitization of the (unknown) base phase composition, an initial strain is applied. The initial strain is given by

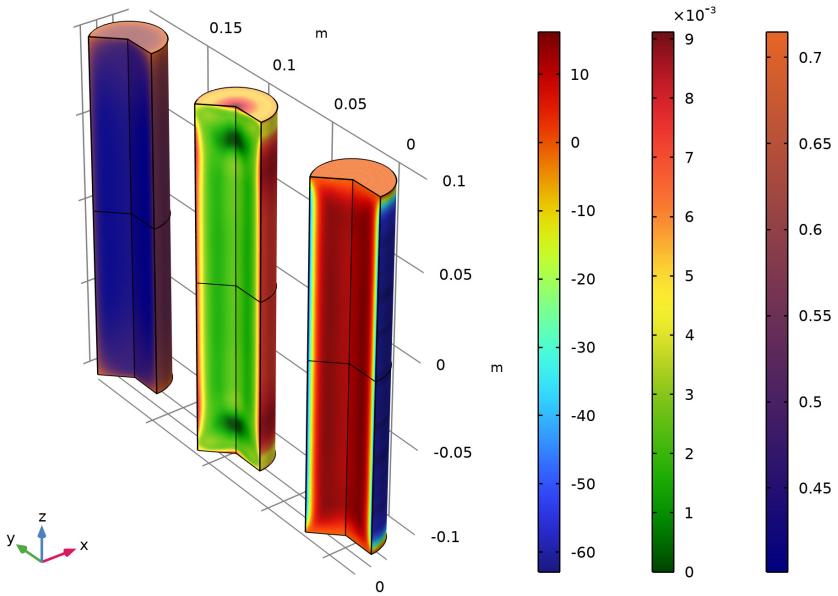
$$\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

---

#### *Results and Discussion*

When the billet is cooled, the austenite decomposes into a combination of ferrite, pearlite, bainite, and martensite. Because of the inhomogeneous rate of cooling, the resulting phase composition will differ throughout the billet. For example, the ends of the billet experience a higher rate of cooling than the mid section. This suggests that the ferritic, pearlitic, and bainitic phase transformations are reduced in favor of the transformation to martensite, as this transformation is controlled by the amount of undercooling beneath the start temperature  $M_s$ , see [Figure 2](#) (left).

During cooling, the material in the billet undergoes straining. Thermal strains result from the change in temperature, and mechanical stresses cause transformation induced plasticity (TRIP). Stresses exceed the initial yield stress of the compound material. This can be seen in [Figure 2](#) (middle), where the largest equivalent plastic strain is observed on the surface of the billet. The quenching simulation computes residual stresses. In [Figure 2](#) (right), the axial stress is shown. Note that the stresses are compressive on the surface of the billet. This is usually beneficial from a fatigue standpoint.



*Figure 2: Phase fraction of martensite (left), equivalent plastic strain (middle), and axial tensile stress (right).*

The evolving phase composition is shown for two locations at the mid plane of the billet: [Figure 3](#) shows the phase composition on the surface, and [Figure 4](#) the phase composition at the billet center. Comparing these phase compositions, the final fraction of martensite is higher at the surface than at the center of the billet. At the surface, the cooling rate is governed by the heat-transfer coefficient and the temperature difference between the surface and the quenching oil. If the oil is able to provide a high enough rate of cooling, diffusion controlled phase transformations are limited in favor of the displacive martensitic transformation. In contrast, the cooling rate of a material point at the center of the billet is limited by the thermal diffusivity of the material. It is common to add certain alloying elements to the material to alter the phase transformation characteristics. This way certain diffusion-controlled phase transformations can be reduced or even suppressed.

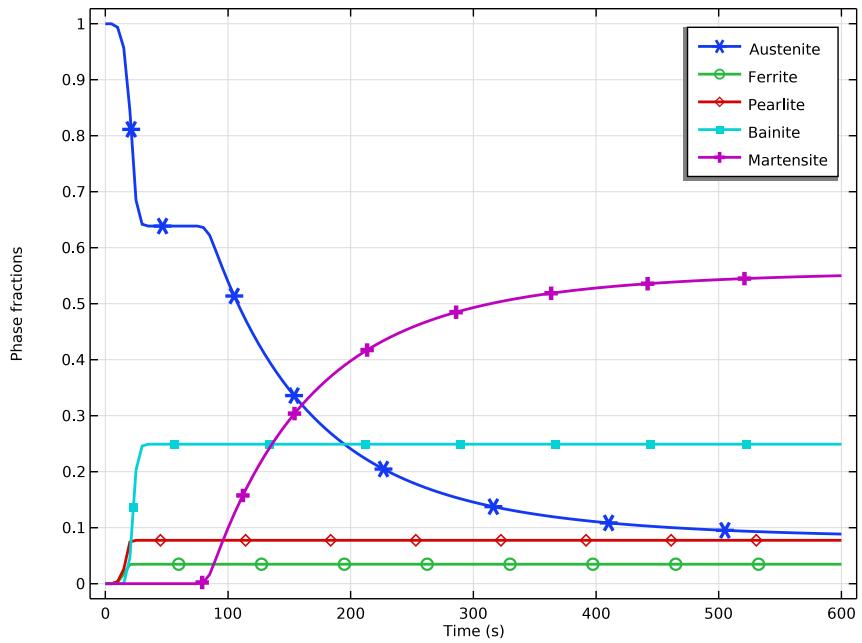


Figure 3: Phase composition on the surface of the steel billet middle.

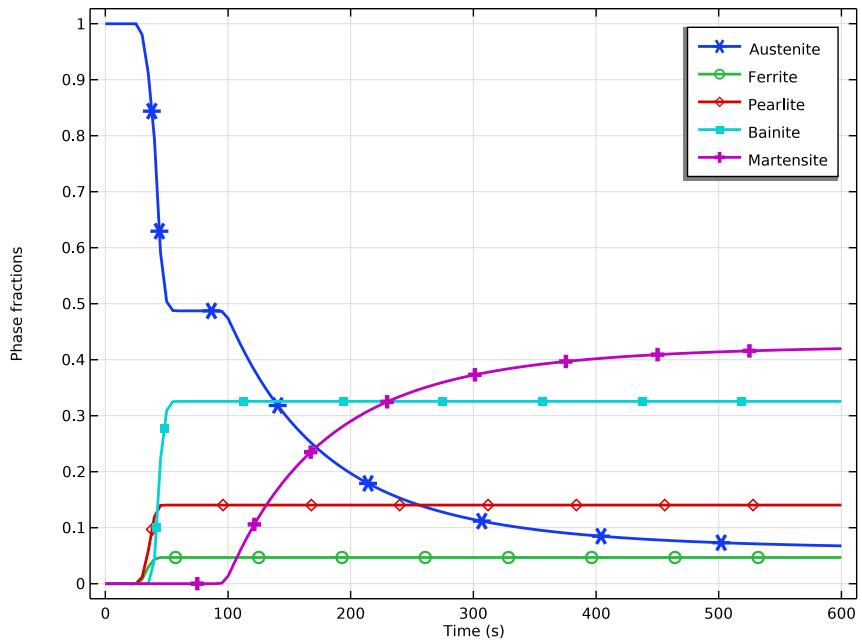


Figure 4: Phase composition at the billet center.

## References

---

1. J.B. Leblond, “Mathematical modelling of transformation plasticity in steels II: Coupling with strain hardening phenomena,” *Int. J. Plast.*, vol. 5, pp. 573–591, 1989.
- 

**Application Library path:** Metal\_Processing\_Module/Steel\_Quenching/quenching\_of\_a\_steel\_billet

---

## Modeling Instructions

---

From the **File** menu, choose **New**.

### NEW

In the **New** window, click **Model Wizard**.

## MODEL WIZARD

- 1 In the **Model Wizard** window, click  **2D Axisymmetric**.
- 2 In the **Select Physics** tree, select **Heat Transfer > Metal Processing > Steel Quenching**.
- 3 Click **Add**.
- 4 Click  **Study**.
- 5 In the **Select Study** tree, select **General Studies > Time Dependent**.
- 6 Click  **Done**.

## GEOMETRY I

Create a node group that contains the temperature dependent data for the transformation of austenite to ferrite.

## GLOBAL DEFINITIONS

### Austenite to Ferrite

- 1 In the **Model Builder** window, right-click **Global Definitions** and choose **Node Group**.
- 2 In the **Settings** window for **Group**, type **Austenite to Ferrite** in the **Label** text field.

### Interpolation 1 (int1)

- 1 In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Global > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type **K\_Austenite\_to\_Ferrite**.
- 4 Click  **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file **quenching\_of\_a\_steel\_billet\_K\_Austenite\_to\_Ferrite.txt**.
- 6 Locate the **Interpolation and Extrapolation** section. From the **Interpolation** list, choose **Piecewise cubic**.
- 7 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 8 In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
K_Austenite_to_Ferrite	1/s

### *Interpolation 2 (int2)*

- 1 In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Global > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type `L_Austenite_to_Ferrite`.
- 4 Click  **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file `quenching_of_a_steel_billet_L_Austenite_to_Ferrite.txt`.
- 6 Locate the **Interpolation and Extrapolation** section. From the **Interpolation** list, choose **Piecewise cubic**.
- 7 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 8 In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
<code>L_Austenite_to_Ferrite</code>	1/s

Create node groups and interpolation functions in a similar fashion for the austenite transformation into pearlite and bainite. Load the appropriate functions from file.

Read temperature dependent data for the Young's modulus.

### *Interpolation 7 (int7)*

- 1 In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Global > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type `EYoung`.
- 4 Click  **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file `quenching_of_a_steel_billet_EYoung.txt`.
- 6 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 7** In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
EYoung	GPa

Read temperature dependent data for the heat transfer coefficient of the quenching oil.

*Interpolation 8 (int8)*

- 1** In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Global > Interpolation**.
- 2** In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3** In the **Function name** text field, type **htc**.
- 4** Click  **Load from File**.
- 5** Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file **quenching\_of\_a\_steel\_billet\_htcOil.txt**.
- 6** Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 7** In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
htc	W/ (m <sup>2</sup> *K)

Create the geometry for the billet.

**GEOMETRY I**

*Rectangle 1 (rl)*

- 1** In the **Geometry** toolbar, click  **Rectangle**.
- 2** In the **Settings** window for **Rectangle**, locate the **Size and Shape** section.
- 3** In the **Width** text field, type **0.02**.
- 4** In the **Height** text field, type **0.1**.
- 5** In the **Geometry** toolbar, click  **Build All**.

**AUSTENITE DECOMPOSITION (AUDC)**

Ignore phase transformation latent heat in the model, but include traditional plasticity and TRIP.

- 1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1)** click **Austenite Decomposition (audc)**.
- 2 In the **Settings** window for **Austenite Decomposition**, locate the **Heat Transfer** section.
- 3 Clear the **Enable phase transformation latent heat** checkbox.
- 4 Locate the **Solid Mechanics** section. Select the **Enable phase plasticity** checkbox.  
The volume reference temperatures for the phases are taken to be equal.  
Enter the material data for austenite. First, create the required phase materials.
- 5 Locate the **Material Properties** section. Click **Create Compound Material** in the upper-right corner of the section.

#### *Austenite*

- 1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (comp1) > Austenite Decomposition (audc)** click **Austenite**.
- 2 In the **Settings** window for **Metallurgical Phase**, locate the **Phase Material** section.
- 3 Click **Create Phase Material** in the upper-right corner of the section.
- 4 Locate the **Mechanical Properties** section. From the **Isotropic hardening model** list, choose **Linear**.

#### *Ferrite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Ferrite**.
- 2 In the **Settings** window for **Metallurgical Phase**, locate the **Phase Material** section.
- 3 Click **Create Phase Material** in the upper-right corner of the section.
- 4 Locate the **Mechanical Properties** section. From the **Isotropic hardening model** list, choose **Linear**.

#### *Pearlite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Pearlite**.
- 2 In the **Settings** window for **Metallurgical Phase**, locate the **Phase Material** section.
- 3 Click **Create Phase Material** in the upper-right corner of the section.
- 4 Locate the **Mechanical Properties** section. From the **Isotropic hardening model** list, choose **Linear**.

#### *Bainite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Bainite**.
- 2 In the **Settings** window for **Metallurgical Phase**, locate the **Phase Material** section.
- 3 Click **Create Phase Material** in the upper-right corner of the section.

- 4** Locate the **Mechanical Properties** section. From the **Isotropic hardening model** list, choose **Linear**.

*Martensite*

- 1** In the **Model Builder** window, click **Martensite**.
- 2** In the **Settings** window for **Metallurgical Phase**, locate the **Phase Material** section.
- 3** Click **Create Phase Material** in the upper-right corner of the section.
- 4** Locate the **Mechanical Properties** section. From the **Isotropic hardening model** list, choose **Linear**.

**GLOBAL DEFINITIONS**

In the **Model Builder** window, expand the **Component 1 (comp1) > Materials** node.

*Austenite (mat2)*

In the **Model Builder** window, expand the **Global Definitions > Materials** node.

*Interpolation 1 (int1)*

- 1** In the **Model Builder** window, expand the **Austenite (mat2)** node.
- 2** Right-click **Global Definitions > Materials > Austenite (mat2) > Basic (def)** and choose **Functions > Interpolation**.
- 3** In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 4** In the **Function name** text field, type **k**.
- 5** Click  **Load from File**.
- 6** Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file **quenching\_of\_a\_steel\_billet\_kAustenite.txt**.
- 7** Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 8** In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
k	W/ (m*K)

*Austenite (mat2)*

- 1** In the **Model Builder** window, under **Global Definitions > Materials > Austenite (mat2)** click **Basic (def)**.

- 2 In the **Settings** window for **Basic**, locate the **Model Inputs** section.
- 3 Click **Select Quantity**.
- 4 In the **Physical Quantity** dialog, type temperature in the text field.
- 5 In the tree, select **General > Temperature (K)**.
- 6 Click **OK**.

*Interpolation 2 (int2)*

- 1 In the **Home** toolbar, click **Functions** and choose **Global > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type Cp.
- 4 Click **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file `quenching_of_a_steel_billet_CpAustenite.txt`.
- 6 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 7 In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
Cp	J / (kg*K)

*Austenite (mat2)*

- 1 In the **Model Builder** window, under **Global Definitions > Materials > Austenite (mat2)** click **Basic (def)**.
- 2 In the **Settings** window for **Basic**, locate the **Output Properties** section.
- 3 In the table, enter the following settings:

Property	Variable	Expression
Thermal conductivity	k_iso ; kii = k_iso, kij = 0	k(T)
Density	rho	7930
Heat capacity at constant pressure	Cp	Cp(T)

- 4 In the **Model Builder** window, under **Global Definitions > Materials > Austenite (mat2)** click **Thermal expansion (ThermalExpansion)**.
- 5 In the **Settings** window for **Thermal Expansion**, locate the **Output Properties** section.

- 6** In the table, enter the following settings:

Property	Variable	Expression
Coefficient of thermal expansion	alpha_iso ; alphaii = alpha_iso, alphaij = 0	2.2e-5

- 7** In the **Model Builder** window, under **Global Definitions > Materials > Austenite (mat2)** click **Young's modulus and Poisson's ratio (Enu)**.

- 8** In the **Settings** window for **Young's Modulus and Poisson's Ratio**, locate the **Model Inputs** section.

- 9** Click **Select Quantity**.

- 10** In the **Physical Quantity** dialog, select **General > Temperature (K)** in the tree.

- 11** Click **OK**.

- 12** In the **Settings** window for **Young's Modulus and Poisson's Ratio**, locate the **Output Properties** section.

- 13** In the table, enter the following settings:

Property	Variable	Expression
Young's modulus	E	EYoung(T)
Poisson's ratio	nu	0.3

- 14** In the **Model Builder** window, under **Global Definitions > Materials > Austenite (mat2)** click **Elastoplastic material model (ElastoplasticModel)**.

- 15** In the **Settings** window for **Elastoplastic Material Model**, locate the **Model Inputs** section.

- 16** Click **Select Quantity**.

- 17** In the **Physical Quantity** dialog, select **General > Temperature (K)** in the tree.

- 18** Click **OK**.

#### *Interpolation 1 (int1)*

- 1** In the **Home** toolbar, click **Functions** and choose **Global > Interpolation**.

- 2** In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.

- 3** In the **Function name** text field, type **sY**.

- 4** Click **Load from File**.

- 5** Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file **quenching\_of\_a\_steel\_billet\_sYAustenite.txt**.

- 6** Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 7** In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
sY	MPa

*Interpolation 2 (int2)*

- 1 In the **Home** toolbar, click  **Functions** and choose **Global > Interpolation**.
- 2 In the **Settings** window for **Interpolation**, locate the **Definition** section.
- 3 In the **Function name** text field, type h.
- 4 Click  **Load from File**.
- 5 Browse to the model's Application Libraries folder and double-click the file `quenching_of_a_steel_billet_hardeningAustenite.txt`.
- 6 Locate the **Units** section. In the **Argument** table, enter the following settings:

Argument	Unit
t	degC

- 7** In the **Function** table, enter the following settings:

Function	Unit
h	GPa

*Austenite (mat2)*

- 1 In the **Model Builder** window, under **Global Definitions > Materials > Austenite (mat2)** click **Elastoplastic material model (ElastoplasticModel)**.
- 2 In the **Settings** window for **Elastoplastic Material Model**, locate the **Output Properties** section.
- 3 In the table, enter the following settings:

Property	Variable	Expression
Initial yield stress	sigmags	sY(T)
Isotropic tangent modulus	Et	h(T)

Enter the material data in a similar fashion for ferrite, pearlite, bainite, and martensite.

## **HEAT TRANSFER IN SOLIDS (HT)**

### *Initial Values I*

- 1 In the **Model Builder** window, under **Component 1 (compl) > Heat Transfer in Solids (ht)** click **Initial Values I**.
- 2 In the **Settings** window for **Initial Values**, locate the **Initial Values** section.
- 3 In the  $T$  text field, type  $900[\text{degC}]$ .

### *Symmetry I*

- 1 In the **Physics** toolbar, click  **Boundaries** and choose **Symmetry**.
- 2 Select Boundary 2 only.

### *Heat Flux I*

- 1 In the **Physics** toolbar, click  **Boundaries** and choose **Heat Flux**.
- 2 Select Boundaries 3 and 4 only.
- 3 In the **Settings** window for **Heat Flux**, locate the **Heat Flux** section.
- 4 From the **Flux type** list, choose **Convective heat flux**.
- 5 In the  $h$  text field, type  $\text{htc}(T)$ .
- 6 In the  $T_{\text{ext}}$  text field, type  $80[\text{degC}]$ .

## **SOLID MECHANICS (SOLID)**

### *Linear Elastic Material I*

In the **Model Builder** window, under **Component 1 (compl) > Solid Mechanics (solid)** click **Linear Elastic Material I**.

### *Plasticity I*

- 1 In the **Physics** toolbar, click  **Attributes** and choose **Plasticity**.  
Use the hardening behavior of the compound material.
- 2 In the **Settings** window for **Plasticity**, locate the **Plasticity Model** section.
- 3 Find the **Isotropic hardening model** subsection. From the list, choose **Hardening function**.

### *Linear Elastic Material I*

In the **Model Builder** window, click **Linear Elastic Material I**.

### *Initial Stress and Strain I*

- 1 In the **Physics** toolbar, click  **Attributes** and choose **Initial Stress and Strain**.
- 2 In the **Settings** window for **Initial Stress and Strain**, locate the **Initial Stress and Strain** section.

**3** Specify the  $\epsilon_0$  matrix as

0.005	0	0
0	0.005	0
0	0	0.005

*Symmetry Plane 1*

- 1** In the **Physics** toolbar, click  **Boundaries** and choose **Symmetry Plane**.
- 2** Select Boundary 2 only.

### AUSTENITE DECOMPOSITION (AUDC)

*Austenite*

- 1** In the **Model Builder** window, under **Component 1 (compl) > Austenite Decomposition (audc)** click **Austenite**.
- 2** In the **Settings** window for **Metallurgical Phase**, locate the **Model Input** section.
- 3** Click  **Create Model Input** for **Volume reference temperature**.

### SHARED PROPERTIES

*Model Input 1*

- 1** In the **Model Builder** window, under **Component 1 (compl) > Definitions > Shared Properties** click **Model Input 1**.
- 2** In the **Settings** window for **Model Input**, locate the **Definition** section.
- 3** In the text field, type `900[degC]`.

### AUSTENITE DECOMPOSITION (AUDC)

*Austenite to Ferrite*

- 1** In the **Model Builder** window, under **Component 1 (compl) > Austenite Decomposition (audc)** click **Austenite to Ferrite**.
- 2** In the **Settings** window for **Phase Transformation**, locate the **Phase Transformation** section.
- 3** In the  $K_{s \rightarrow d}$  text field, type `K_Austenite_to_Ferrite(audc.T)`.
- 4** In the  $L_{s \rightarrow d}$  text field, type `L_Austenite_to_Ferrite(audc.T)`.
- 5** Locate the **Phase Transformation Strain** section. Select the **Transformation-induced plasticity** checkbox.
- 6** Select the **Plastic recovery for destination phase** checkbox.

#### *Austenite to Pearlite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Austenite to Pearlite**.
- 2 In the **Settings** window for **Phase Transformation**, locate the **Phase Transformation** section.
- 3 In the  $K_{s \rightarrow d}$  text field, type `K_Austenite_to_Pearlite(audc.T)`.
- 4 In the  $L_{s \rightarrow d}$  text field, type `L_Austenite_to_Pearlite(audc.T)`.
- 5 Locate the **Phase Transformation Strain** section. Select the **Transformation-induced plasticity** checkbox.
- 6 Select the **Plastic recovery for destination phase** checkbox.

#### *Austenite to Bainite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Austenite to Bainite**.
- 2 In the **Settings** window for **Phase Transformation**, locate the **Phase Transformation** section.
- 3 In the  $K_{s \rightarrow d}$  text field, type `K_Austenite_to_Bainite(audc.T)`.
- 4 In the  $L_{s \rightarrow d}$  text field, type `L_Austenite_to_Bainite(audc.T)`.
- 5 Locate the **Phase Transformation Strain** section. Select the **Transformation-induced plasticity** checkbox.
- 6 Select the **Plastic recovery for destination phase** checkbox.

#### *Austenite to Martensite*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Austenite to Martensite**.
- 2 In the **Settings** window for **Phase Transformation**, locate the **Phase Transformation** section.
- 3 In the  $M_s$  text field, type `300[degC]`.
- 4 Locate the **Phase Transformation Strain** section. Select the **Transformation-induced plasticity** checkbox.
- 5 Select the **Plastic recovery for destination phase** checkbox.

#### **MESH I**

- 1 In the **Model Builder** window, under **Component I (compI)** click **Mesh I**.
- 2 In the **Settings** window for **Mesh**, locate the **Sequence Type** section.
- 3 From the list, choose **User-controlled mesh**.

#### *Size*

- 1 In the **Model Builder** window, under **Component I (compI) > Mesh I** click **Size**.

**2** In the **Settings** window for **Size**, locate the **Element Size** section.

**3** From the **Predefined** list, choose **Extra fine**.

#### *Boundary Layers 1*

In the **Mesh** toolbar, click  **Boundary Layers**.

#### *Boundary Layer Properties*

**1** In the **Model Builder** window, click **Boundary Layer Properties**.

**2** Select Boundaries 3 and 4 only.

**3** In the **Settings** window for **Boundary Layer Properties**, locate the **Layers** section.

**4** In the **Number of layers** text field, type 6.

**5** In the **Stretching factor** text field, type 1.5.

**6** In the **Model Builder** window, right-click **Mesh 1** and choose **Build All**.

### **STUDY 1**

#### *Step 1: Time Dependent*

**1** In the **Model Builder** window, under **Study 1** click **Step 1: Time Dependent**.

**2** In the **Settings** window for **Time Dependent**, locate the **Study Settings** section.

**3** In the **Output times** text field, type range (0,5,600).

**4** Right-click **Study 1 > Step 1: Time Dependent** and choose **Get Initial Value for Step**.

**5** Right-click **Step 1: Time Dependent** and choose **Get Initial Value for Step**.

### **STUDY 1**

#### *Solver Configurations*

In the **Model Builder** window, expand the **Study 1 > Solver Configurations** node.

#### *Solution 1 (sol1)*

**1** In the **Model Builder** window, expand the **Study 1 > Solver Configurations > Solution 1 (sol1)** node, then click **Time-Dependent Solver 1**.

**2** In the **Settings** window for **Time-Dependent Solver**, click to expand the **Time Stepping** section.

**3** From the **Steps taken by solver** list, choose **Intermediate**.

**4** In the **Study** toolbar, click  **Compute**.

Set preferred units for result presentation.

## RESULTS

### Preferred Units I

- 1 In the **Results** toolbar, click **Configurations** and choose **Preferred Units**.
- 2 In the **Settings** window for **Preferred Units**, locate the **Units** section.
- 3 Click **Add Physical Quantity**.
- 4 In the **Physical Quantity** dialog, select **General > Temperature (K)** in the tree.
- 5 Click **OK**.
- 6 In the **Settings** window for **Preferred Units**, locate the **Units** section.
- 7 In the table, enter the following settings:

Quantity	Unit	Preferred unit
Temperature	K	°C

- 8 Click **Add Physical Quantity**.
- 9 In the **Physical Quantity** dialog, select **Solid Mechanics > Stress tensor (N/m^2)** in the tree.
- 10 Click **OK**.
- II In the **Settings** window for **Preferred Units**, locate the **Units** section.
- I2 In the table, enter the following settings:

Quantity	Unit	Preferred unit
Stress tensor	N/m <sup>2</sup>	MPa

- I3 Click **Apply**.

### Phase fractions at the billet center

- I In the **Results** toolbar, click **ID Plot Group**.
- 2 In the **Settings** window for **ID Plot Group**, type **Phase fractions at the billet center** in the **Label** text field.
- 3 Click to expand the **Title** section. From the **Title type** list, choose **None**.
- 4 Locate the **Plot Settings** section.
- 5 Select the **y-axis label** checkbox. In the associated text field, type **Phase fractions**.

### Point Graph I

- I Right-click **Phase fractions at the billet center** and choose **Point Graph**.
- 2 Select Point 1 only.

- 3 In the **Settings** window for **Point Graph**, click **Replace Expression** in the upper-right corner of the **y-Axis Data** section. From the menu, choose **Component 1 (compl) > Austenite Decomposition > Austenite > audc.phase1.xi - Phase fraction - 1.**
- 4 Click to expand the **Coloring and Style** section. From the **Width** list, choose **2**.
- 5 Find the **Line markers** subsection. From the **Marker** list, choose **Cycle**.
- 6 From the **Positioning** list, choose **Interpolated**.
- 7 Click to expand the **Legends** section. Select the **Show legends** checkbox.
- 8 From the **Legends** list, choose **Manual**.
- 9 In the table, enter the following settings:

---

**Legends**

Austenite

*Point Graph 2*

- 1 Right-click **Point Graph 1** and choose **Duplicate**.
- 2 In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **y-Axis Data** section.
- 3 In the **Expression** text field, type `audc.phase2.xi`.
- 4 Locate the **Legends** section. In the table, enter the following settings:

---

**Legends**

Ferrite

*Point Graph 3*

- 1 In the **Model Builder** window, under **Results > Phase fractions at the billet center** right-click **Point Graph 1** and choose **Duplicate**.
- 2 In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **y-Axis Data** section.
- 3 In the **Expression** text field, type `audc.phase3.xi`.
- 4 Locate the **Legends** section. In the table, enter the following settings:

---

**Legends**

Pearlite

*Point Graph 4*

- 1 Right-click **Point Graph 1** and choose **Duplicate**.
- 2 In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **y-Axis Data** section.
- 3 In the **Expression** text field, type `audc.phase4.xi`.

- 4** Locate the **Legends** section. In the table, enter the following settings:

---

**Legends**

---

Bainite

---

*Point Graph 5*

- 1** Right-click **Point Graph 1** and choose **Duplicate**.
- 2** In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **y-Axis Data** section.
- 3** In the **Expression** text field, type `audc.phase5.xi`.
- 4** Locate the **Legends** section. In the table, enter the following settings:

---

**Legends**

---

Martensite

---

*Phase fractions at the billet surface*

- 1** In the **Model Builder** window, right-click **Phase fractions at the billet center** and choose **Duplicate**.
- 2** In the **Model Builder** window, click **Phase fractions at the billet center 1**.
- 3** In the **Settings** window for **ID Plot Group**, type **Phase fractions at the billet surface** in the **Label** text field.

*Point Graph 1*

- 1** In the **Model Builder** window, click **Point Graph 1**.
- 2** In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **Selection** section.
- 3** Click to select the  **Activate Selection** toggle button.
- 4** Select Point 3 only.

*Point Graph 2*

- 1** In the **Model Builder** window, click **Point Graph 2**.
- 2** In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **Selection** section.
- 3** Click to select the  **Activate Selection** toggle button.
- 4** Select Point 3 only.

*Point Graph 3*

- 1** In the **Model Builder** window, click **Point Graph 3**.
- 2** In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **Selection** section.
- 3** Click to select the  **Activate Selection** toggle button.
- 4** Select Point 3 only.

#### *Point Graph 4*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Point Graph 4**.
- 2 In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **Selection** section.
- 3 Click to select the  **Activate Selection** toggle button.
- 4 Select Point 3 only.

#### *Point Graph 5*

- 1 In the **Model Builder** window, click **Point Graph 5**.
- 2 In the **Settings** window for **Point Graph**, locate the **Selection** section.
- 3 Click to select the  **Activate Selection** toggle button.
- 4 Select Point 3 only.
- 5 In the **Phase fractions at the billet surface** toolbar, click  **Plot**.

#### *Axial stress profile*

- 1 In the **Results** toolbar, click  **ID Plot Group**.
- 2 In the **Settings** window for **ID Plot Group**, type **Axial stress profile** in the **Label** text field.
- 3 Locate the **Data** section. From the **Time selection** list, choose **Last**.

#### *Line Graph 1*

- 1 Right-click **Axial stress profile** and choose **Line Graph**.
- 2 Select Boundary 2 only.
- 3 In the **Settings** window for **Line Graph**, click **Replace Expression** in the upper-right corner of the **y-Axis Data** section. From the menu, choose **Component 1 (compl) > Solid Mechanics > Stress > Stress tensor (spatial frame) - N/m<sup>2</sup> > solid.sGpzz - Stress tensor, zz-component**.
- 4 Locate the **y-Axis Data** section. From the **Unit** list, choose **MPa**.
- 5 Locate the **x-Axis Data** section. From the **Parameter** list, choose **Expression**.
- 6 In the **Expression** text field, type **R**.
- 7 Click to expand the **Coloring and Style** section. From the **Width** list, choose **2**.
- 8 Click to expand the **Quality** section. In the **Axial stress profile** toolbar, click  **Plot**.

#### *Mirror 3D 1*

- 1 In the **Results** toolbar, click  **More Datasets** and choose **Mirror 3D**.
- 2 In the **Settings** window for **Mirror 3D**, locate the **Plane Data** section.
- 3 From the **Plane** list, choose **XY-planes**.

### *3D Plot Group 17*

- 1 In the **Results** toolbar, click  **3D Plot Group**.
- 2 In the **Settings** window for **3D Plot Group**, locate the **Data** section.
- 3 From the **Dataset** list, choose **Mirror 3D 1**.
- 4 Click to expand the **Title** section. From the **Title type** list, choose **None**.
- 5 Click to expand the **Plot Array** section. Select the **Enable** checkbox.
- 6 From the **Array axis** list, choose **y**.
- 7 From the **Padding** list, choose **Absolute**.
- 8 In the **Padding length** text field, type **0.05**.

### *Axial stress*

- 1 Right-click **3D Plot Group 17** and choose **Surface**.
- 2 In the **Settings** window for **Surface**, type **Axial stress** in the **Label** text field.
- 3 Click **Replace Expression** in the upper-right corner of the **Expression** section. From the menu, choose **Component 1 (compl1) > Solid Mechanics > Stress > Stress tensor (spatial frame) - N/m<sup>2</sup> > solid.sGpzz - Stress tensor, zz-component**.
- 4 Locate the **Expression** section. From the **Unit** list, choose **MPa**.

### *Equivalent plastic strain*

- 1 Right-click **Axial stress** and choose **Duplicate**.
- 2 In the **Settings** window for **Surface**, type **Equivalent plastic strain** in the **Label** text field.
- 3 Click **Replace Expression** in the upper-right corner of the **Expression** section. From the menu, choose **Component 1 (compl1) > Solid Mechanics > Strain > solid.epeGp - Equivalent plastic strain - 1**.
- 4 Locate the **Coloring and Style** section. From the **Color table** list, choose **Traffic**.

### *Surface 1*

- 1 In the **Model Builder** window, expand the **Results > Martensite, 3D (audc)** node.
- 2 Right-click **Surface 1** and choose **Copy**.

### *Martensite phase fraction*

- 1 In the **Model Builder** window, right-click **3D Plot Group 17** and choose **Paste Surface**.
- 2 In the **Settings** window for **Surface**, type **Martensite phase fraction** in the **Label** text field.



