

## **Прочностные (статические) и теплотехнические расчеты с нанесенными огнезащитными покрытиями**

## Прочностные (статические) расчеты

При расчете несущей способности железобетонных конструкций при пожаре следует учитывать изменение механических свойств бетона и арматуры в зависимости от их температуры, определяемой теплотехническим расчетом.

Статически определимые изгибаемые железобетонные конструкции в условиях пожара подвергаются воздействию высоких температур по-разному. Плоские элементы подвергаются одностороннему нагреву, стержневые – трехстороннему.

Общие положения расчета на огнестойкость строительных конструкций применимы и к железобетонным элементам. Однако для статически определимых конструкций предел огнестойкости может быть определен по критической температуре стальных элементов, что значительно упрощает расчет.

Статически определимые изгибаемые элементы в условиях пожара разрушаются, как правило, в результате обогривания пластического шарнира в середине пролета за счет снижения предела текучести или прочности нагреваемой растянутой арматуры до величины напряжений в ее сечении.

В общем виде статическая задача для изгибаемых конструкций решается с помощью уравнений статики. Для определения высоты сжатой зоны бетона в состоянии предельного равновесия конструкции при заданных условиях обогрева составляется уравнение моментов от внешних и внутренних сил относительно растянутой рабочей арматуры.

Рабочие напряжения в растянутой арматуре определяют из уравнения равновесия проекции внутренних и внешних сил, действующих в плоскости изгиба.

По соотношению рабочих напряжений и сопротивлений стали определяют коэффициент снижения прочности, а затем определяют критическую температуру растянутой арматуры.

### ПБ-2.84.12-8<sup>1</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 8,38^2}{8} = 82,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_l + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^2$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^3$$

<sup>1</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>2</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>3</sup> Там же

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 901,6 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{82,5 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1197}} = 15 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1197 \cdot 15 \cdot 26,5}{901,6} = 527,7 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{527,7}{1522} = 0,4$$

$$t_{s,cr} = 494^0 \text{ C}^4$$

### ПБ-2.64.15-8<sup>5</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 6,38^2}{8} = 47,8 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_l + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^6$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^7$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 1030,4 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{47,8 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1497}} = 6,8 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1497 \cdot 6,8 \cdot 26,5}{1030,4} = 261,8 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{261,8}{1522} = 0,18$$

$$t_{s,cr} = 550^0 \text{ C}^8$$

<sup>4</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

<sup>5</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>6</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>7</sup> Там же

<sup>8</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

**ПБ-2.64.12-8<sup>9</sup>**

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 6,38^2}{8} = 47,8 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_l + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{10}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{11}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 901,6 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{47,8 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1197}} = 8,6 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1197 \cdot 8,6 \cdot 26,5}{901,6} = 302,6 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{302,6}{1522} = 0,2$$

$$t_{s,cr} = 544^0 \text{ C}^{12}$$

**ПБ-2.61.15-8<sup>13</sup>**

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 6,08^2}{8} = 43,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_l + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{14}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{15}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

<sup>9</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>10</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>11</sup> Там же

<sup>12</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. - 656 с, ил.

<sup>13</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>14</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>15</sup> Там же

$$A_s = 1030,4 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{43,5 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1497}} = 6,2 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1497 \cdot 6,2 \cdot 26,5}{1030,4} = 238,7 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{238,7}{1522} = 0,2$$

$$t_{s,cr} = 544^0 \text{ C}^{16}$$

### ПБ-2.60.15-8<sup>17</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 5,08^2}{8} = 30,3 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_l + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{18}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{19}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 1030,4 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{30,3 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1497}} = 4,3 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1497 \cdot 4,3 \cdot 26,5}{1030,4} = 165,6 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{165,6}{1522} = 0,11$$

$$t_{s,cr} = 585^0 \text{ C}^{20}$$

### ПБ-2.60.12-8<sup>21</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 5,98^2}{8} = 42 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

<sup>16</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

<sup>17</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>18</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>19</sup> Там же

<sup>20</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

<sup>21</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

$$a = a_1 + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{22}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{23}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 901,6 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{42 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1197}} = 7,5 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1197 \cdot 7,5 \cdot 26,5}{901,6} = 263,9 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{263,9}{1522} = 0,17$$

$$t_{s,cr} = 555^0 \text{ C}^{24}$$

### ПБ-2.35.15-8<sup>25</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 3,08^2}{8} = 11,2 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_1 + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{26}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{27}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 1030,4 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{11,2 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1497}} = 1,6 \text{ мм}$$

<sup>22</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>23</sup> Там же

<sup>24</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. - 656 с, ил.

<sup>25</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>26</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>27</sup> Там же

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1497 \cdot 1,6 \cdot 26,5}{1030,4} = 61,6 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{61,6}{1522} = 0,04$$

$$t_{s,cr} = 650^0 \text{ C}^{28}$$

### ПБ-2.51.12-8<sup>29</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 5,08^2}{8} = 30,3 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_l + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{30}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{31}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 901,6 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{30,3 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1197}} = 5,4 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1197 \cdot 5,4 \cdot 26,5}{901,6} = 190 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{190}{1522} = 0,13$$

$$t_{s,cr} = 575^0 \text{ C}^{32}$$

### ПБ-2.28.12-8<sup>33</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 2,78^2}{8} = 9,1 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

<sup>28</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

<sup>29</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>30</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>31</sup> Там же

<sup>32</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

<sup>33</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

$$a = a_1 + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{34}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{35}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 901,6 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{9,1 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1197}} = 1,6 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1197 \cdot 1,6 \cdot 26,5}{901,6} = 56,3 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{56,3}{1522} = 0,04$$

$$t_{s,cr} = 650^0 \text{ C}^{36}$$

### ПБ-2.28.15-8<sup>37</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 2,78^2}{8} = 9,1 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_1 + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{38}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{39}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 1030,4 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{9,1 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1497}} = 1,3 \text{ мм}$$

<sup>34</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>35</sup> Там же

<sup>36</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. - 656 с, ил.

<sup>37</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>38</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>39</sup> Там же



$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1497 \cdot 1,3 \cdot 26,5}{1030,4} = 50,1 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{50,1}{1522} = 0,03$$

$$t_{s,cr} = 675^0 \text{ C}^{40}$$

### ПБ-2.61.15-12.5<sup>41</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{12,3 \cdot 5,98^2}{8} = 55 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$a = a_l + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{42}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{43}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 1030,4 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{55 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1497}} = 7,9 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1497 \cdot 7,9 \cdot 26,5}{1030,4} = 304,2 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{304,2}{1522} = 0,2$$

$$t_{s,cr} = 544^0 \text{ C}^{44}$$

### ПБ-2.61.12-8<sup>45</sup>

$$M_n = \frac{q_n l_0^2}{8} = \frac{9,4 \cdot 6,08^2}{8} = 43,4 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

<sup>40</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

<sup>41</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

<sup>42</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>43</sup> Там же

<sup>44</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

<sup>45</sup> ТУ-5842-001-01217316-15

$$a = a_1 + \frac{d}{2} = 35 + \frac{9}{2} = 39,5 \text{ мм}$$

$$h_f' = \frac{h - d_n}{2} = \frac{220 - 140}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$h_0 = h - a = 220 - 39,5 = 180,5 \text{ мм}$$

$$R_{bn} = 22 \text{ МПа}^{46}$$

$$R_{bu} = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} = \frac{22}{0,83} = 26,5 \text{ МПа}$$

$$R_{sn} = 1370 \text{ МПа}^{47}$$

$$R_{su} = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{1370}{0,9} = 1522 \text{ МПа}$$

$$A_s = 901,6 \text{ мм}^2$$

$$x_{tem} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \frac{M_n}{R_{bu} b_f'}} = 180,5 - \sqrt{180,5^2 - 2 \frac{43,4 \cdot 10^6}{26,5 \cdot 1197}} = 7,8 \text{ мм}$$

$$\sigma_{s,tem} = \frac{b_f' x_{tem} R_{bu}}{A_s} = \frac{1197 \cdot 7,8 \cdot 26,5}{1030,4} = 274,5 \text{ МПа}$$

$$\gamma_{s,tem} = \frac{\sigma_{s,tem}}{R_{su}} = \frac{274,5}{1522} = 0,18$$

$$t_{s,cr} = 550^0 \text{ C}^{48}$$

<sup>46</sup> СНиП 2.03.01-84\*

<sup>47</sup> Там же

<sup>48</sup> Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник/ В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин, - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003.- 656 с, ил.

### Теплотехнические расчеты

Испытания на огнестойкость образцов строительных конструкций проводятся при воздействии на их поверхность стандартного температурного режима пожара, определяемого в виде следующей зависимости:

$$T = T_0 + 345 \log_{10} \left( \frac{8}{60} \tau + 1 \right),$$

где  $T_0$  – начальная температура, °С;  $\tau$  – время от начала испытаний, с.

Граничные условия задачи описываются лучистым и конвективным теплообменом поверхности конструкции с окружающей средой:

где  $\alpha_k = 29$  Вт/м<sup>2</sup> – коэффициент конвективного теплообмена для обогреваемой поверхности<sup>49</sup>;

– приведенная степень черноты системы «обогревающая среда – поверхность конструкции»;

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} \text{ – постоянная Стефана - Больцмана;}$$

$T, T_s$  – температуры газовой фазы и поверхности конструкции, К.

Приведенная степень черноты системы «среда – поверхность конструкции» рассчитывается по формуле:

где  $\epsilon$  – эффективная степень черноты продуктов горения;  $\epsilon_s$  – степень черноты поверхности конструкции.

Тепловые свойства материалов, применяемые в расчете<sup>50</sup>:

Свойства рабочей арматуры (канаты класса К-7):

Плотность – 7850 кг/м<sup>3</sup>.

Теплопроводность – 58 Вт/(м·К).

Теплоемкость – 482 Дж/(кг·К).

Свойства бетона.

Плотность – 2400 кг/м<sup>3</sup>.

Теплоемкость – 840 Дж/(кг·К).

Теплопроводность – приведена в таблице:

Температура, °С	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
0	1,51
50	1,737
100	1,997
150	2,297
200	2,641
250	3,037
300	3,493
350	4,017
400	4,619

<sup>49</sup> Расчетно-экспериментальный метод определения предела огнестойкости несущих металлических конструкций с тонкослойными огнезащитными покрытиями: Методика. – ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2013.

<sup>50</sup> По данным, представленным Заказчиком

Температура, °С	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
450	5,312
500	6,109
550	7,025
600	8,079
650	9,291
700	10,684
750	12,287
800	14,13
850	16,25
900	18,687
950	21,49
1000	24,713
1050	28,42
1100	32,684
1150	37,586
1200	43,224

Свойства состава ПОЗ-В.

Плотность – 450 кг/м<sup>3</sup>.

Теплоемкость – 840 Дж/(кг·К).

Теплопроводность – приведена в таблице:

Температура, °С	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
0	0,07
50	0,081
100	0,093
150	0,106
200	0,122
250	0,141
300	0,162
350	0,186
400	0,214
450	0,246
500	0,283
550	0,326
600	0,375
650	0,431
700	0,495
750	0,57
800	0,655
850	0,753
900	0,866
950	0,996
1000	1,146
1050	1,318
1100	1,515
1150	1,742
1200	2,004

**Свойства воздуха в пустотах:**

Температура, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, кДж/(кг·К)
20	1,205	0,967	1,005
30	1,165	0,997	1,005
40	1,128	1,03	1,005
50	1,093	1,056	1,005
60	1,060	1,072	1,005
70	1,029	1,096	1,009
80	1,000	1,121	1,009
90	0,972	1,156	1,009
100	0,946	1,198	1,009
120	0,898	1,247	1,009
140	0,854	1,303	1,013
160	0,815	1,359	1,017
180	0,779	1,411	1,022
200	0,746	1,467	1,026
250	0,674	1,594	1,038
300	0,615	1,717	1,047
350	0,566	1,833	1,059
400	0,524	1,945	1,068
500	0,456	2,142	1,093
600	0,404	2,321	1,114
700	0,362	2,504	1,135
800	0,329	2,680	1,156
900	0,301	2,848	1,172
1000	0,277	3,012	1,185
1100	0,257	3,172	1,197
1200	0,239	3,415	1,210

Описанная модель теплообмена и характеристики материалов реализованы в программном комплексе ANSYS Mechanical Academic 17.0.

## Вывод

Результаты прочностных (статических) и теплотехнических расчетов приведены в таблице:

Конструкции	Обозначение <sup>51</sup>	Огнезащитное покрытие	Толщина огнезащитного покрытия	Критическая температура стали, °С <sup>52</sup>	$\tau_1$ , мин. <sup>53</sup>	$\tau_2$ , мин. <sup>54</sup>	$\tau_3$ , мин. <sup>55</sup>	$\tau_4$ , мин. <sup>56</sup>	Фактический предел огнестойкости, мин.
Плита перекрытия	ПБ-2.84.12-8	ПОЗ-В	3 мм	494	46,7	90,0	> 90	> 90	46,7
Плита перекрытия	ПБ-2.64.15-8	ПОЗ-В	3 мм	550	53,4	> 90	> 90	> 90	53,4
Плита перекрытия	ПБ-2.64.12-8	ПОЗ-В	3 мм	544	51,7	90,0	> 90	> 90	51,7
Плита перекрытия	ПБ-2.61.15-8	ПОЗ-В	3 мм	544	52,9	> 90	> 90	> 90	52,9
Плита перекрытия	ПБ-2.60.15-8	ПОЗ-В	3 мм	585	56,4	90,0	> 90	> 90	56,4
Плита перекрытия	ПБ-2.60.12-8	ПОЗ-В	3 мм	555	52,9	90,0	> 90	> 90	52,9
Плита перекрытия	ПБ-2.35.15-8	ПОЗ-В	3 мм	650	66,4	> 90	> 90	> 90	66,4
Плита перекрытия	ПБ-2.51.12-8	ПОЗ-В	3 мм	575	55,2	90,0	> 90	> 90	55,2
Плита перекрытия	ПБ-2.28.12-8	ПОЗ-В	3 мм	650	64,4	90,0	> 90	> 90	64,4
Плита перекрытия	ПБ-2.28.15-8	ПОЗ-В	3 мм	675	70,4	> 90	> 90	> 90	70,4
Плита перекрытия	ПБ-2.61.15-12.5	ПОЗ-В	3 мм	544	52,9	> 90	> 90	> 90	52,9
Плита перекрытия	ПБ-2.61.12-8	ПОЗ-В	3 мм	550	52,4	90,0	> 90	> 90	52,4

\*  $\tau_1$  – время достижения критической температуры стали;

$\tau_2$  – время превышения средней температуры необогреваемой поверхности плит перекрытия по более чем на 140 °С в сравнении с температурой конструкции до испытания;

$\tau_3$  – время превышения температуры в любой точке необогреваемой поверхности плит перекрытия более чем на 180 °С в сравнении с температурой конструкции до испытания;

$\tau_4$  – время превышения температуры в любой точке необогреваемой поверхности плит перекрытия более 220 °С.

<sup>51</sup> ту-5842-001-01217316-15

<sup>52</sup> Прочностной (статический) расчет.

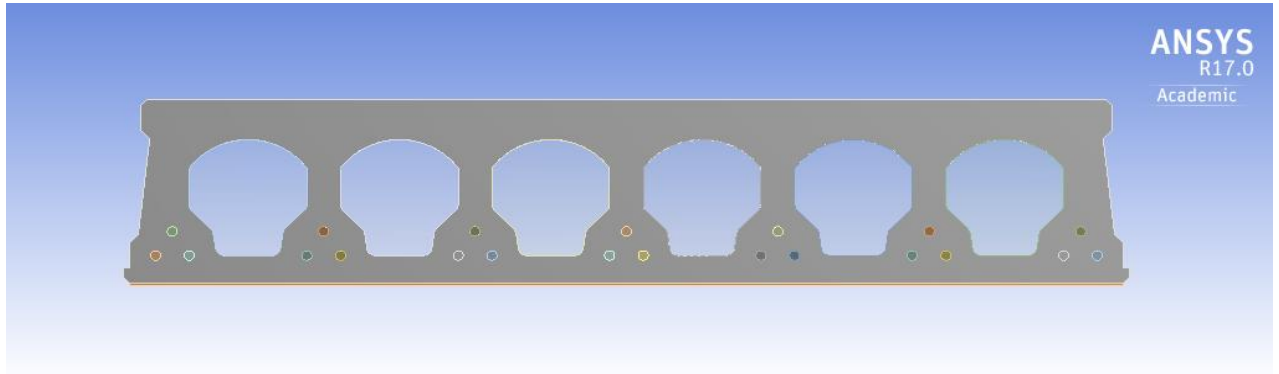
<sup>53</sup> Теплотехнический расчет.

<sup>54</sup> Теплотехнический расчет.

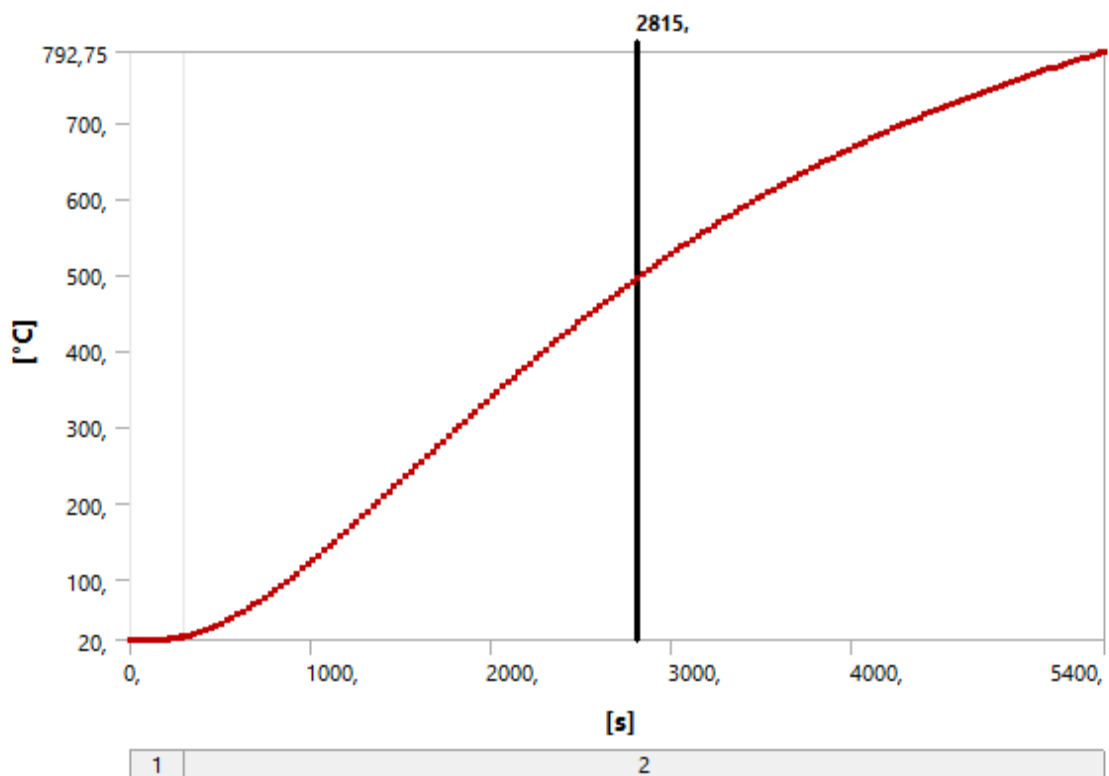
<sup>55</sup> Теплотехнический расчет.

<sup>56</sup> Теплотехнический расчет.

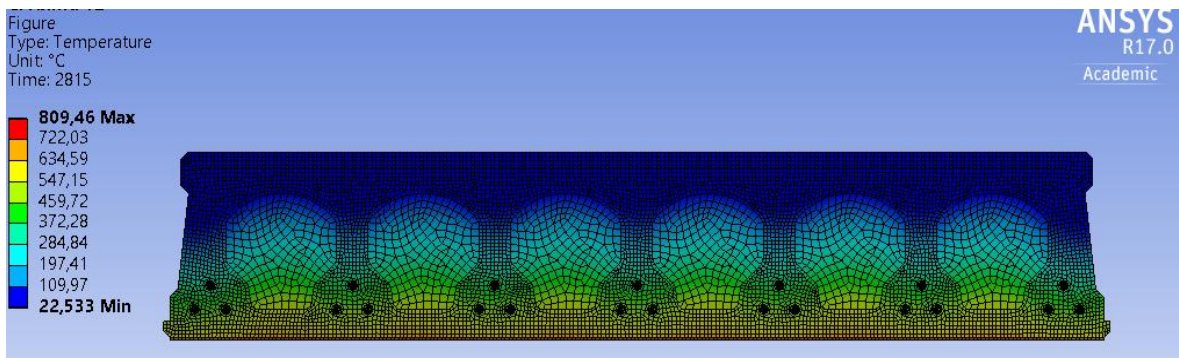
### ПБ-2.84.12-8



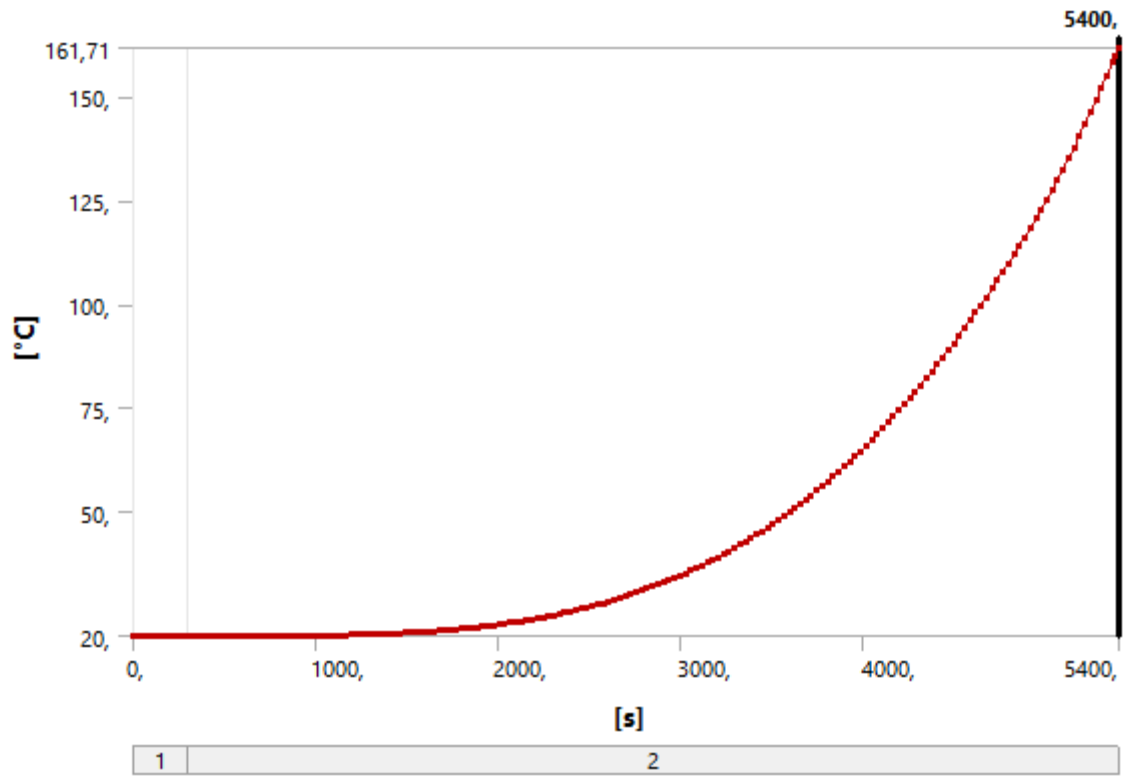
Сечение плиты



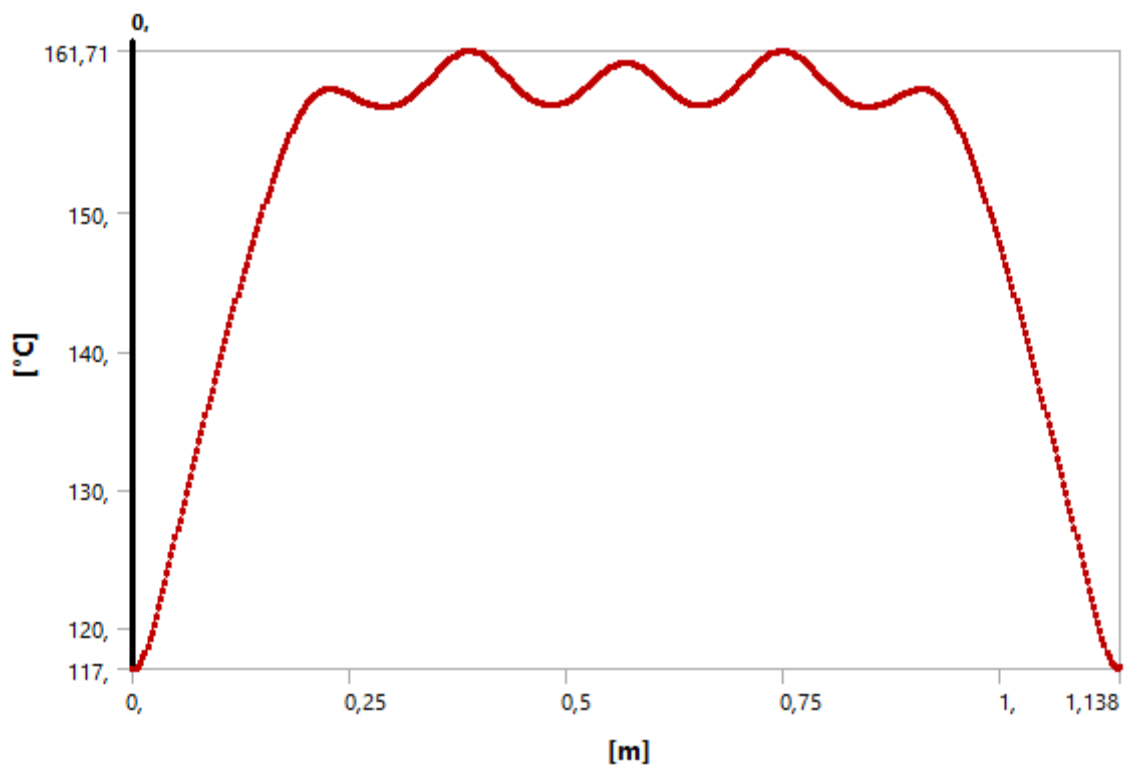
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали



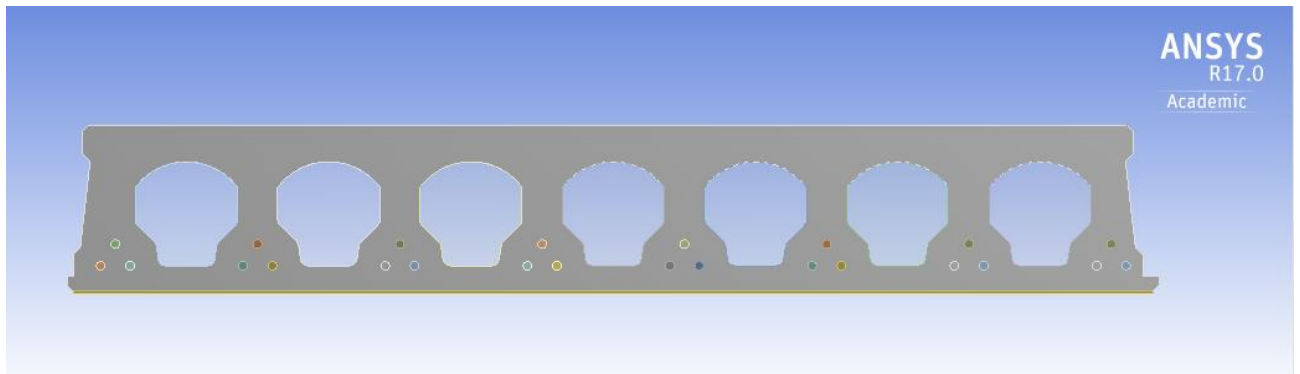
Максимальная температура необогреваемой поверхности



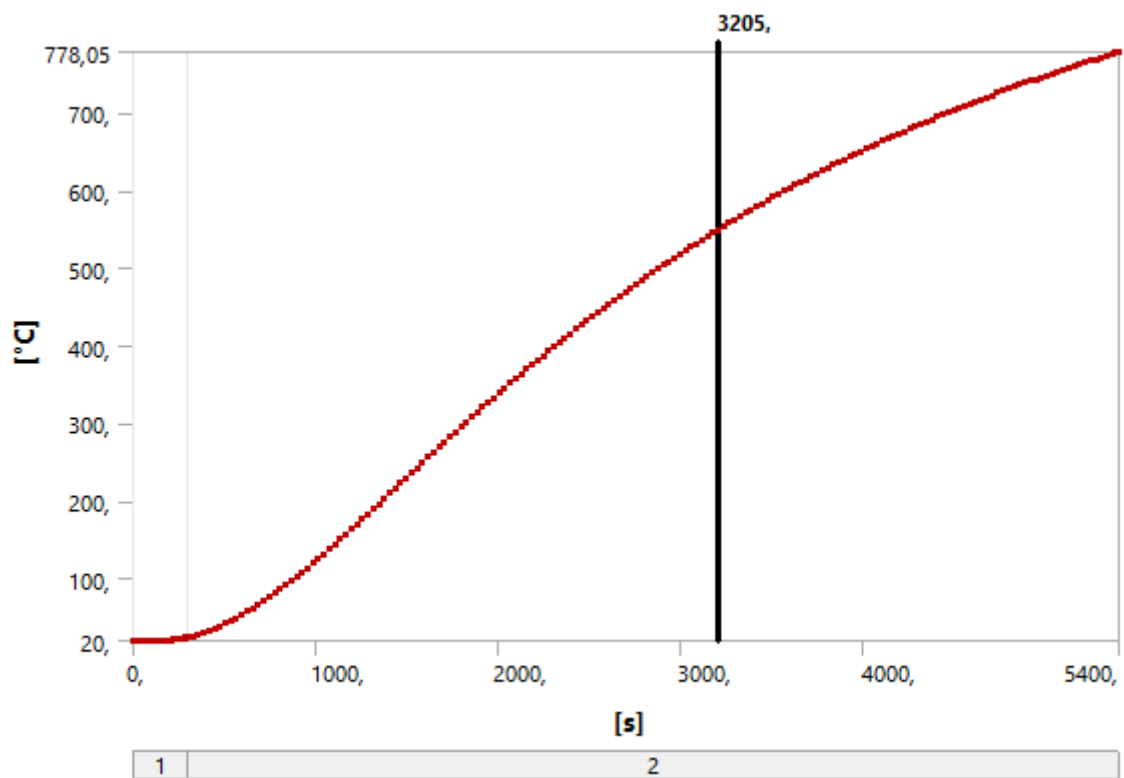
Распределение температур на необогреваемой поверхности



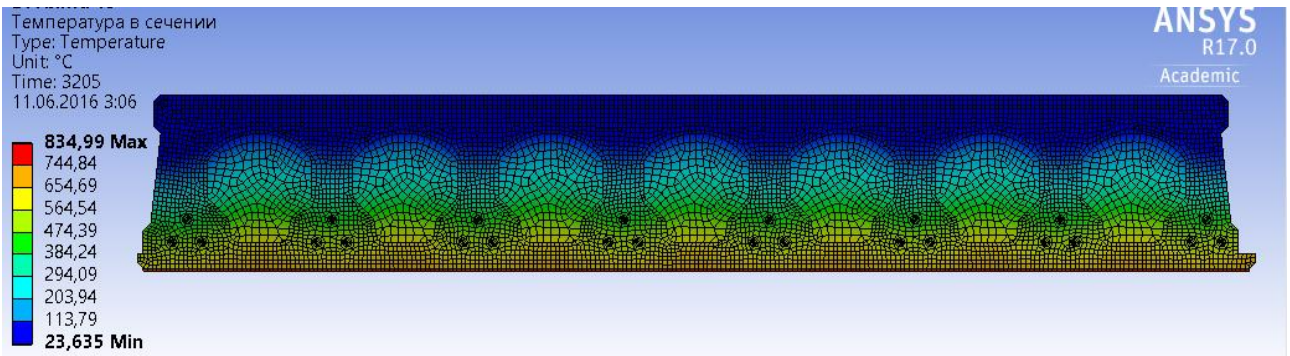
### ПБ-2.64.15-8



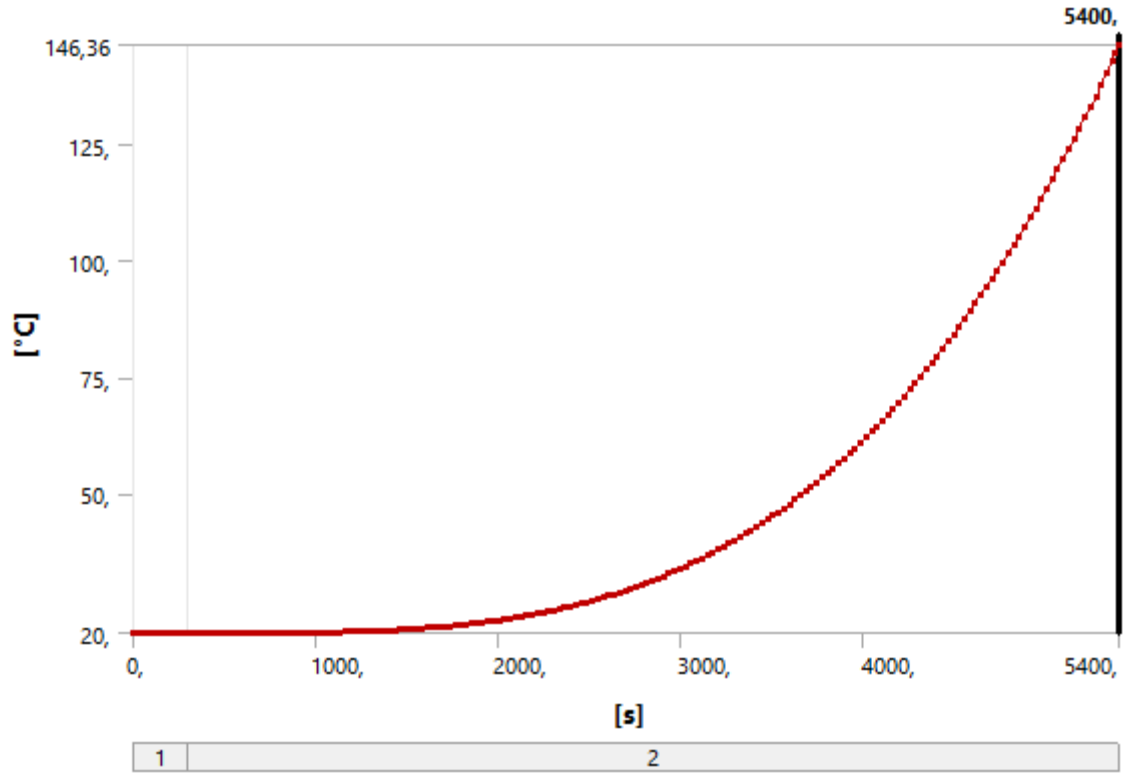
Сечение плиты



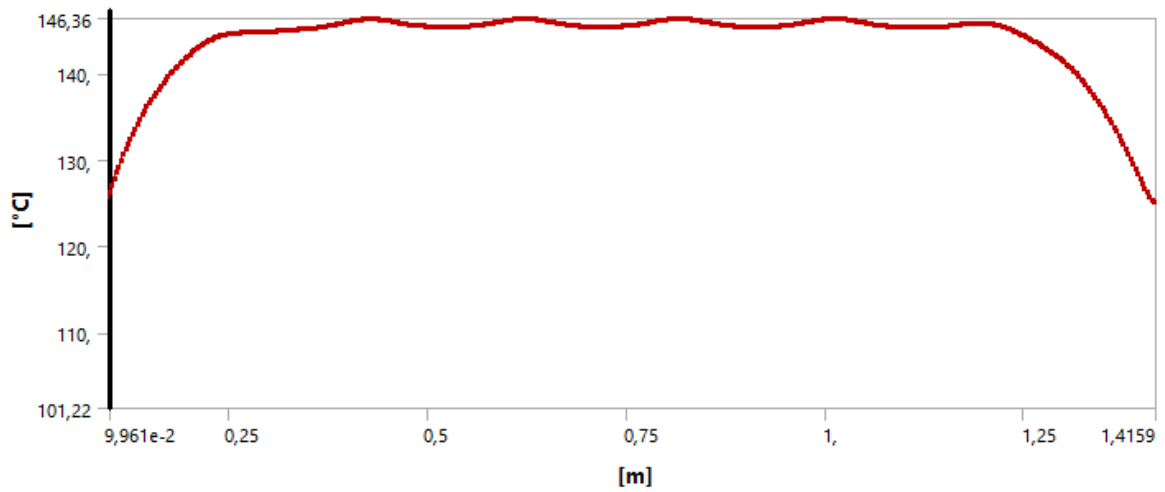
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали

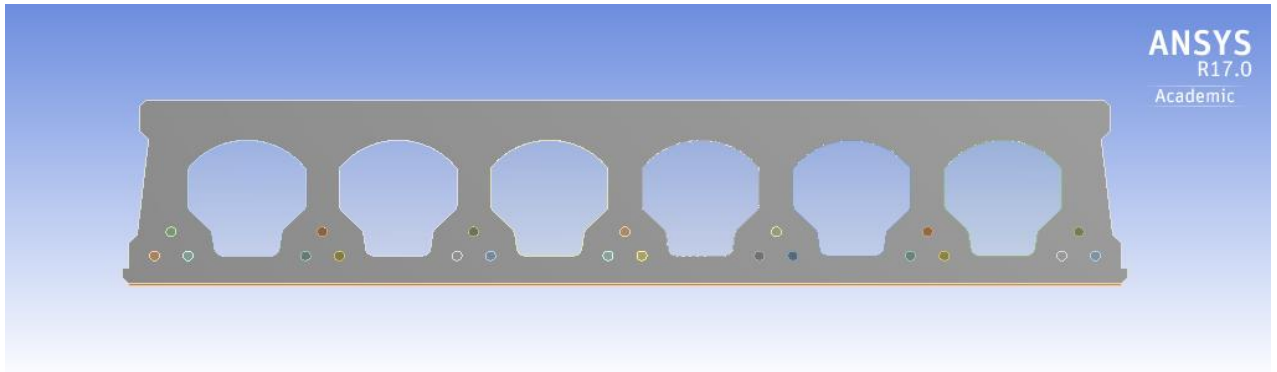


Максимальная температура необогреваемой поверхности

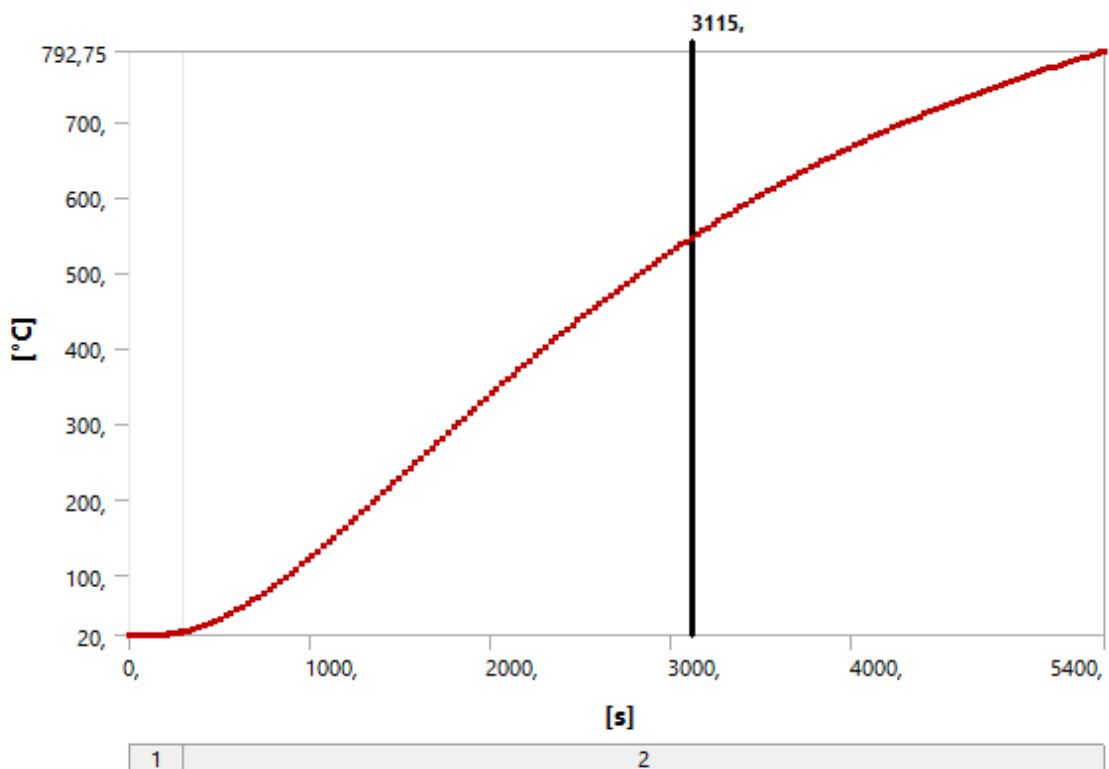


Распределение температур на необогреваемой поверхности

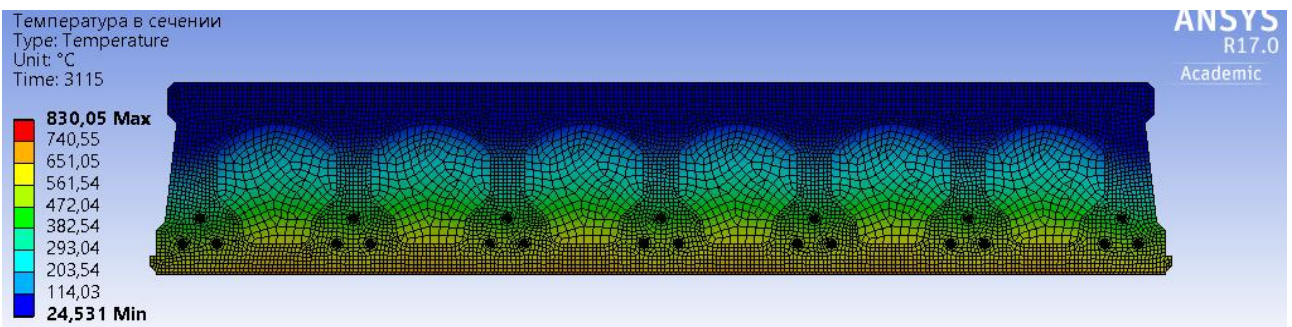
### ПБ-2.64.12-8



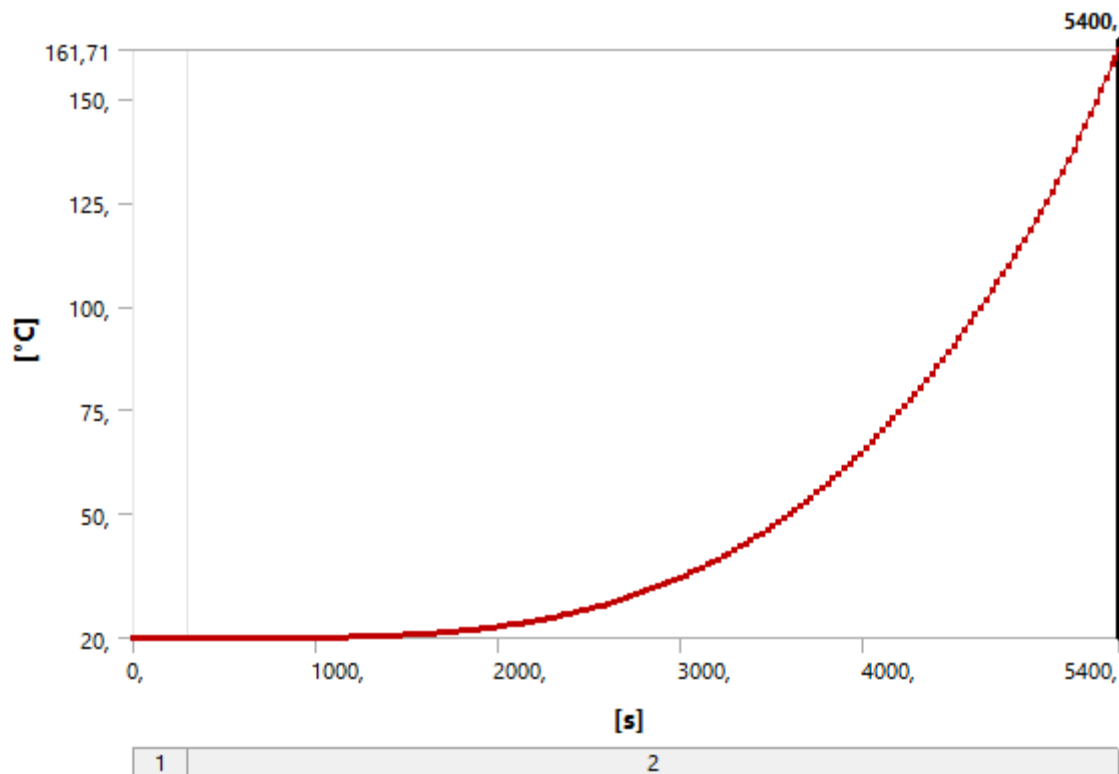
Сечение плиты



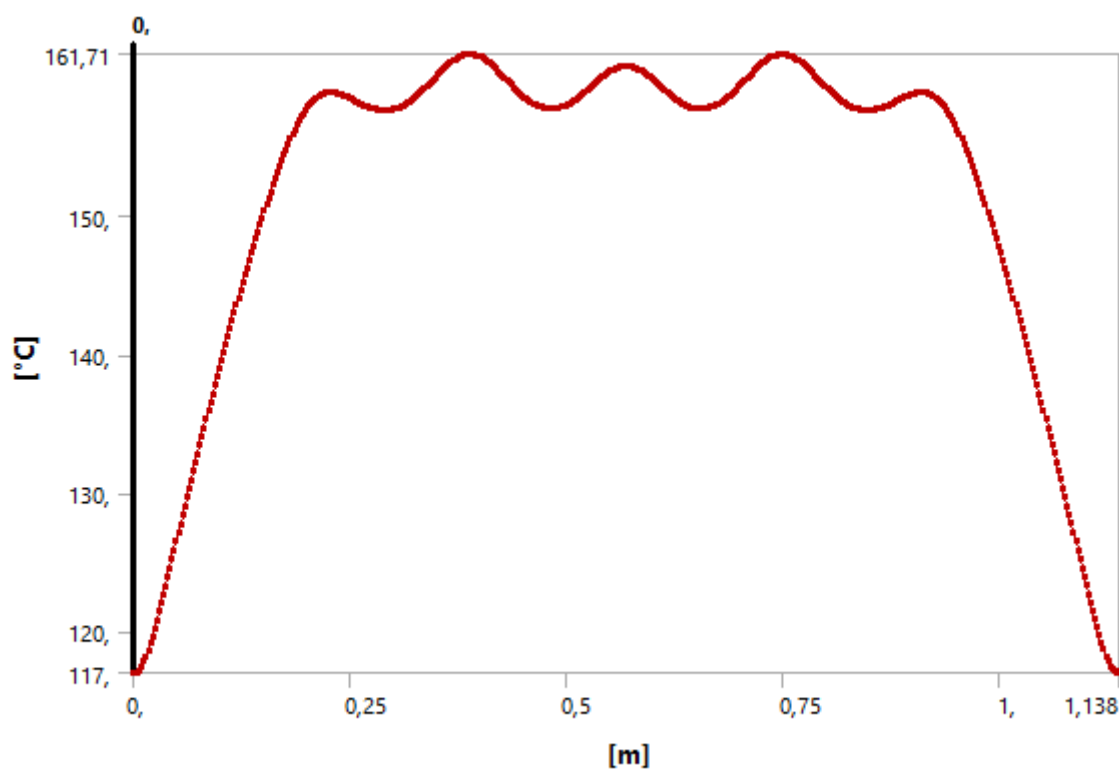
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали

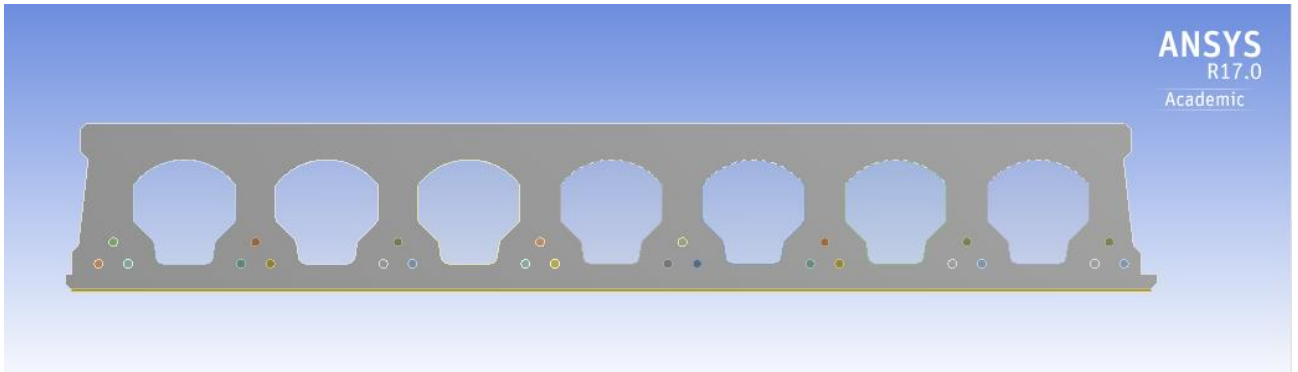


Максимальная температура необогреваемой поверхности

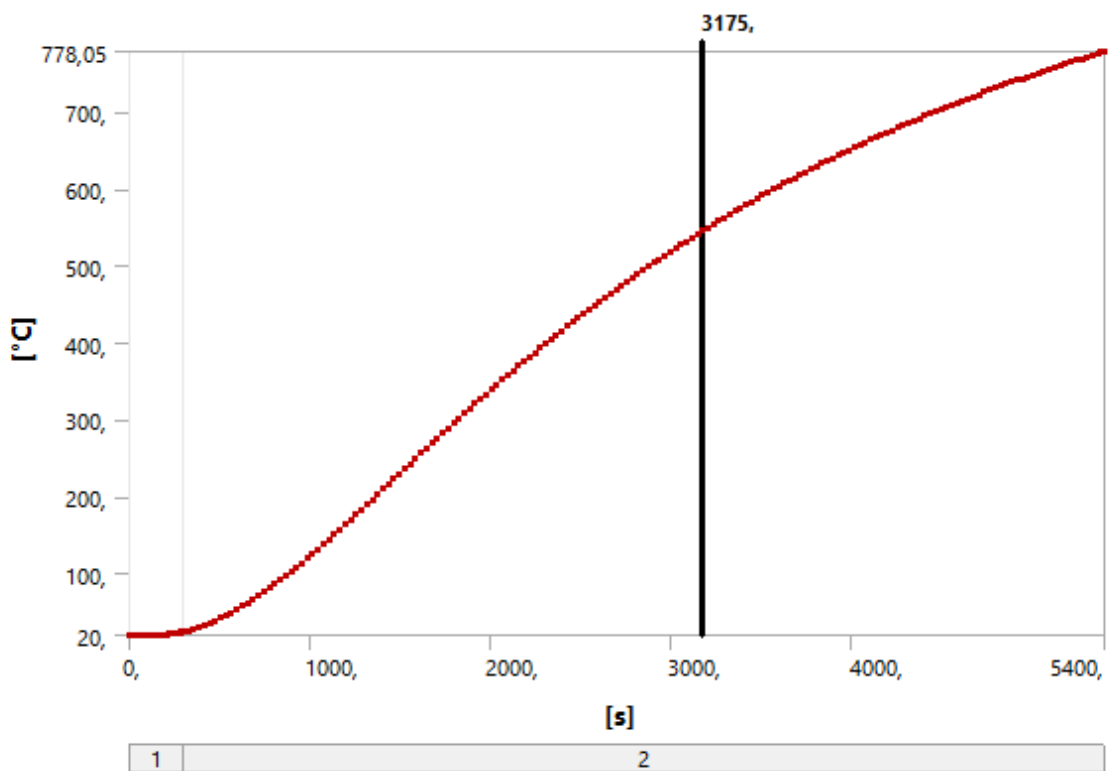


Распределение температур на необогреваемой поверхности

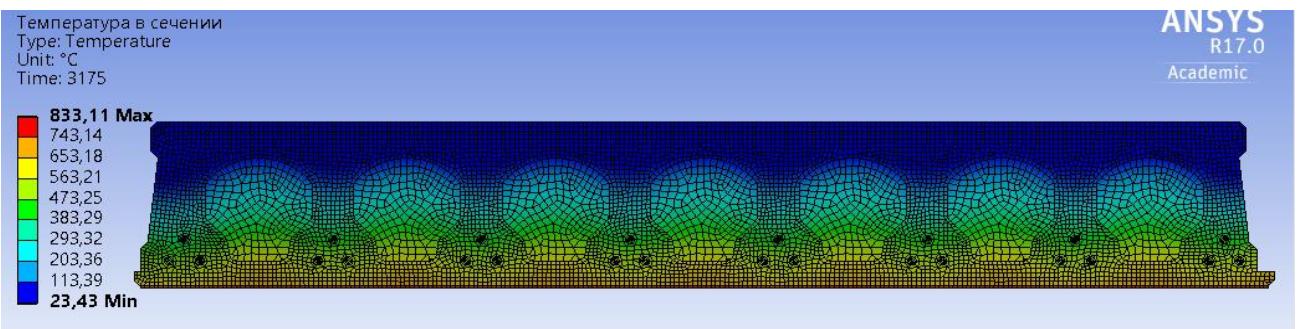
### ПБ-2.61.15-8



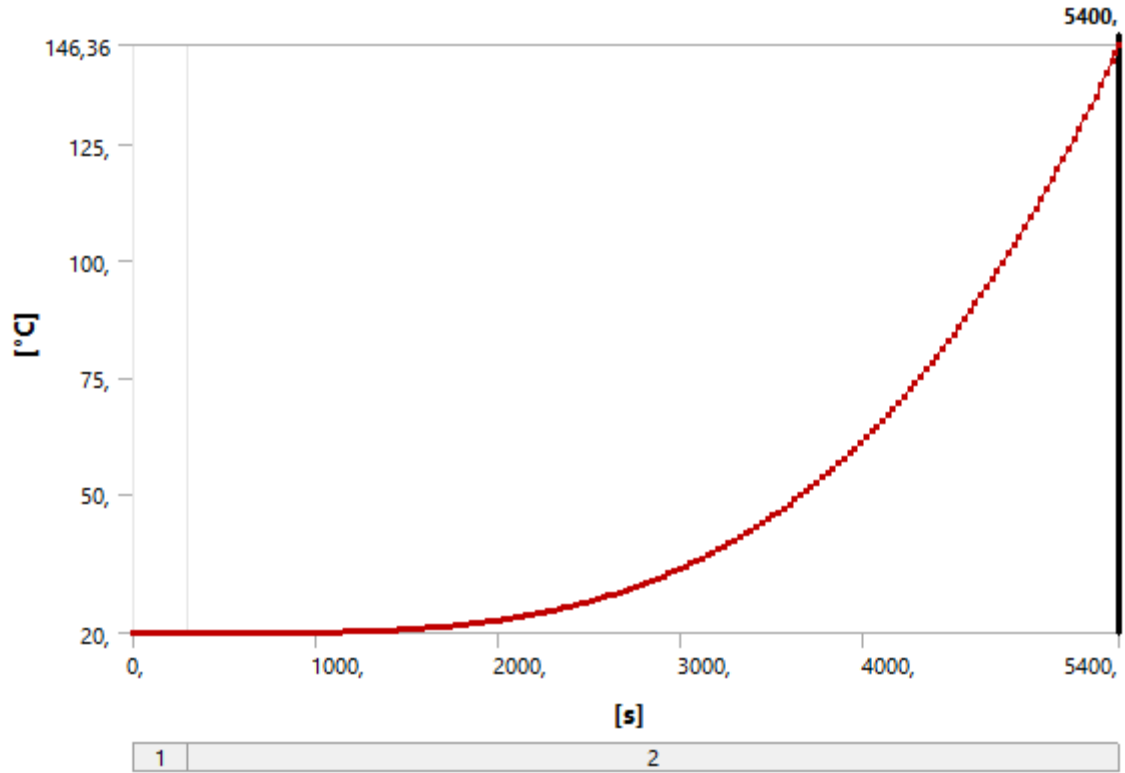
Сечение плиты



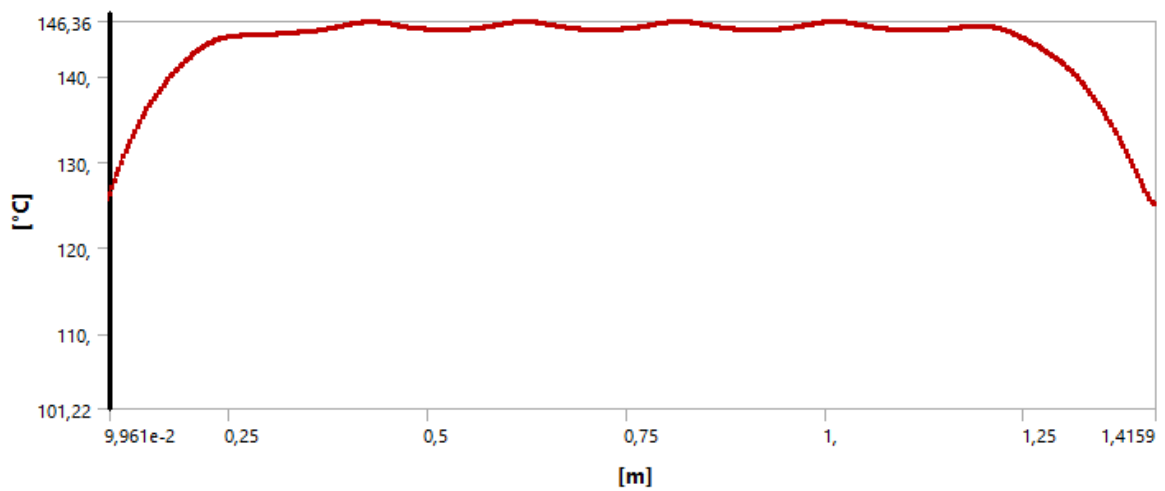
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали

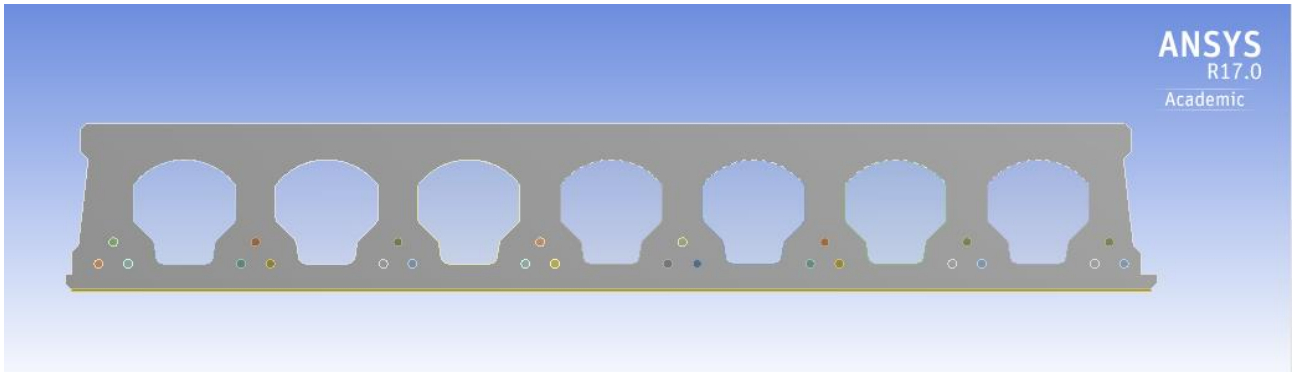


Максимальная температура необогреваемой поверхности

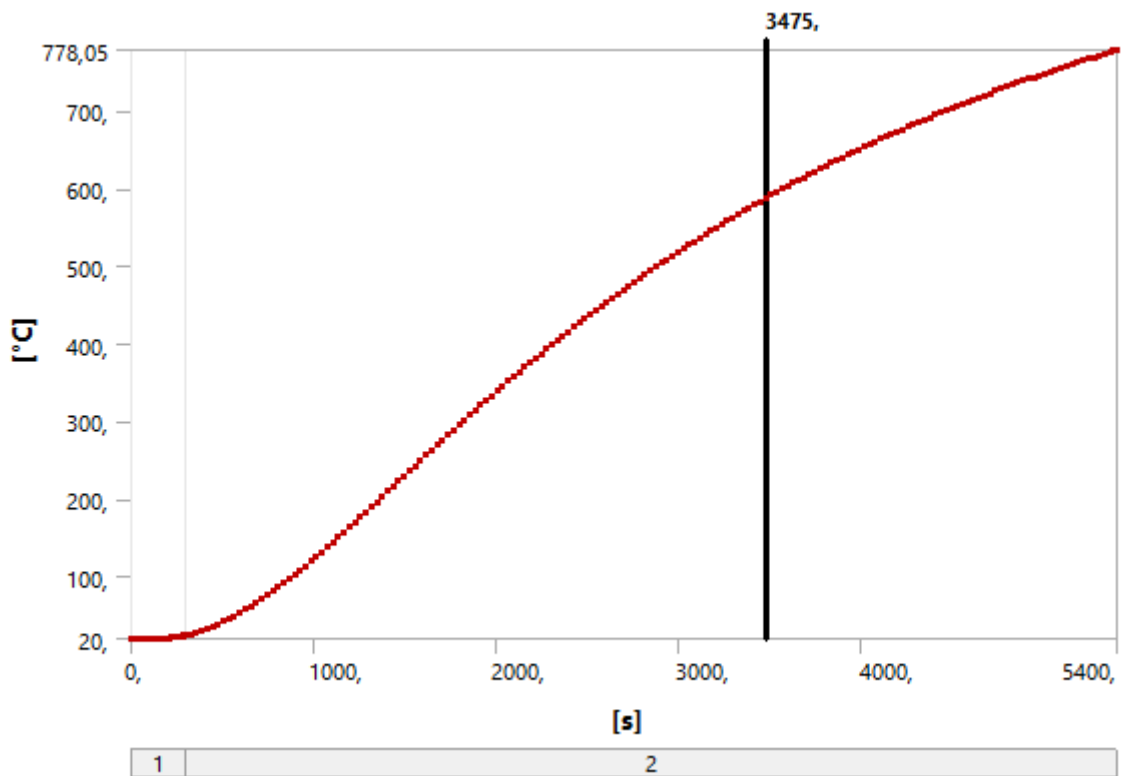


Распределение температур на необогреваемой поверхности

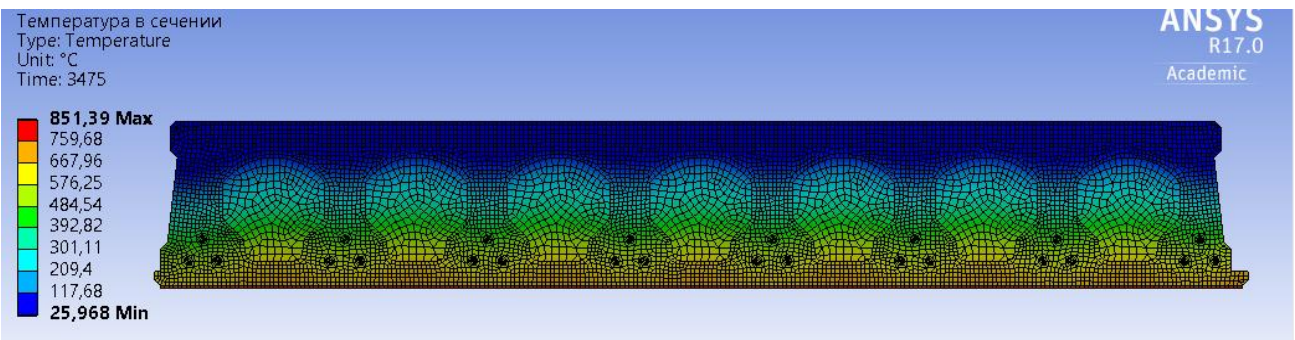
### ПБ-2.60.15-8



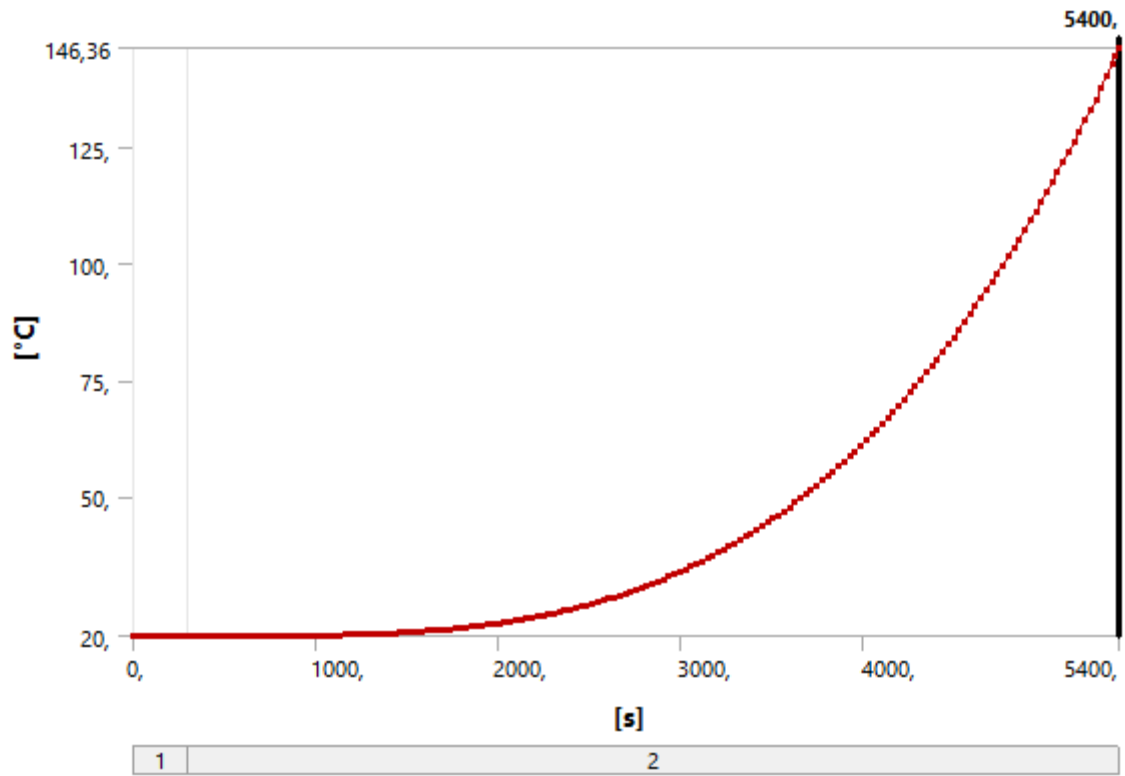
Сечение плиты



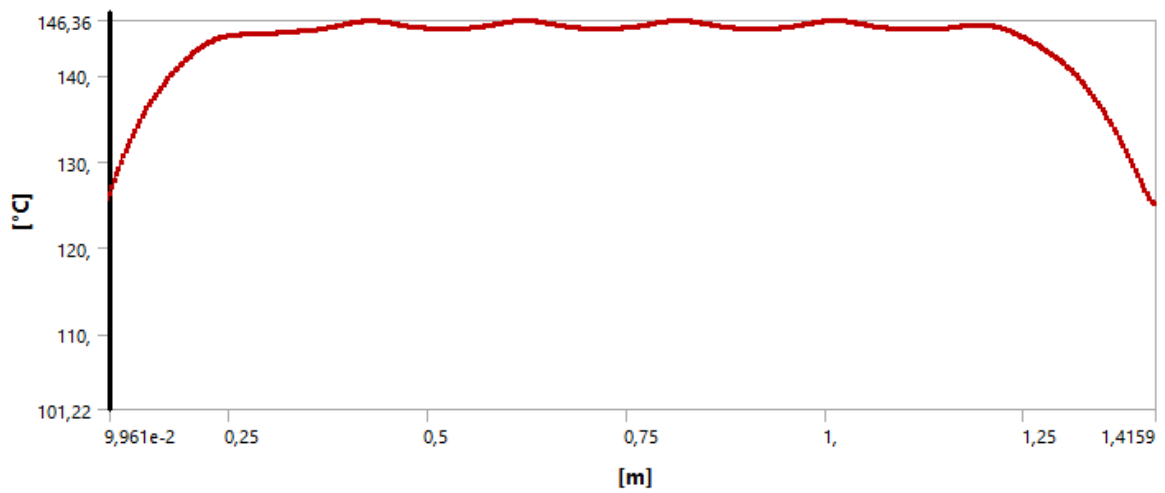
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали



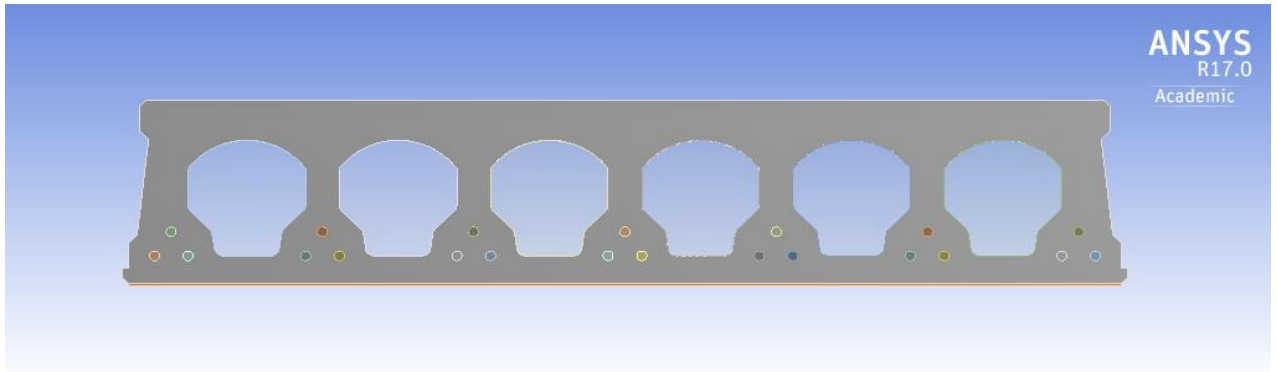
Максимальная температура необогреваемой поверхности



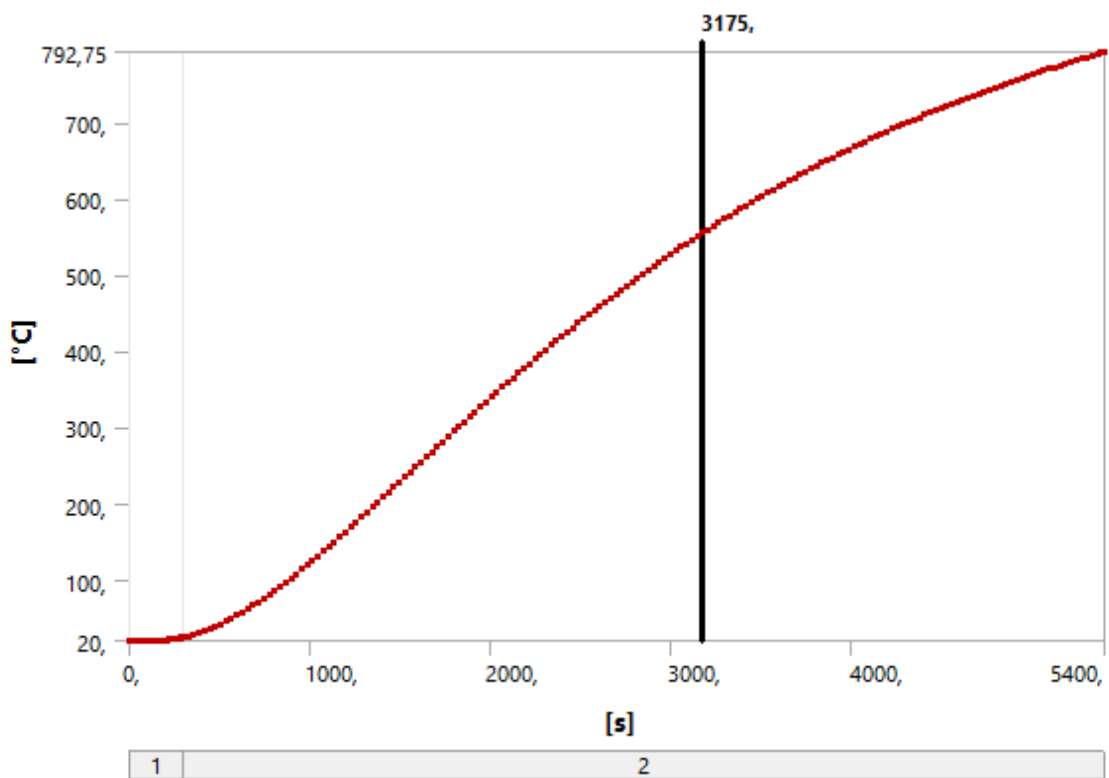
Распределение температур на необогреваемой поверхности



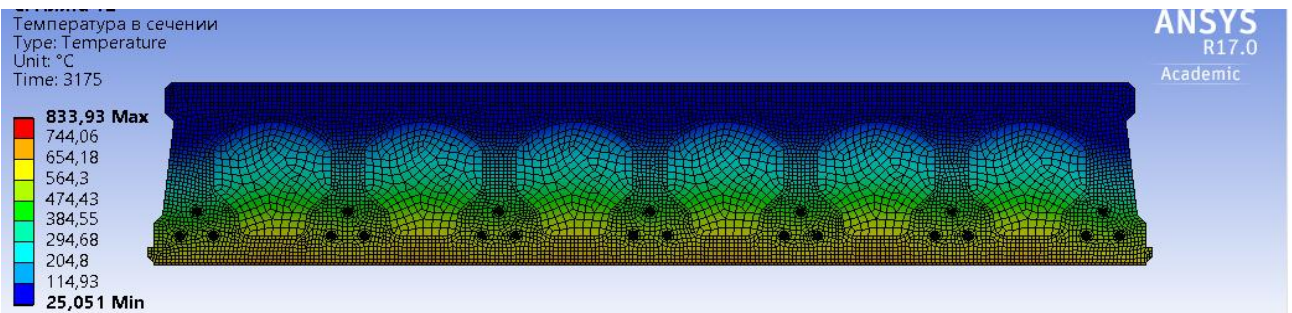
### ПБ-2.60.12-8



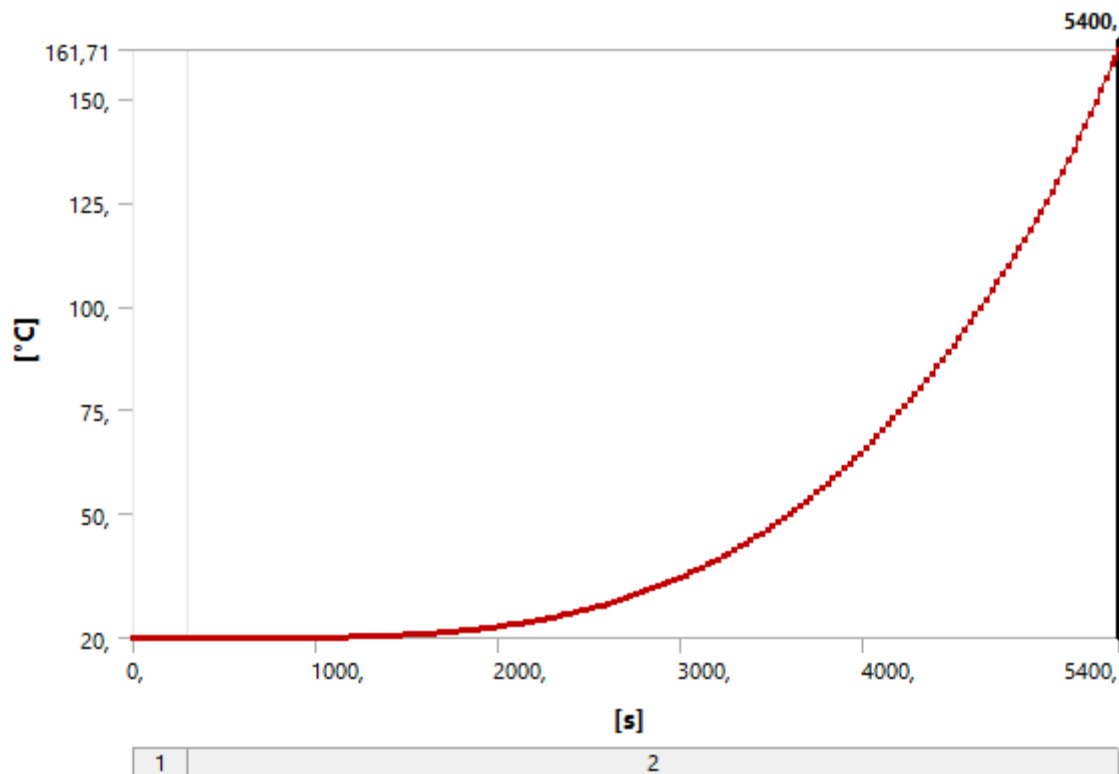
Сечение плиты



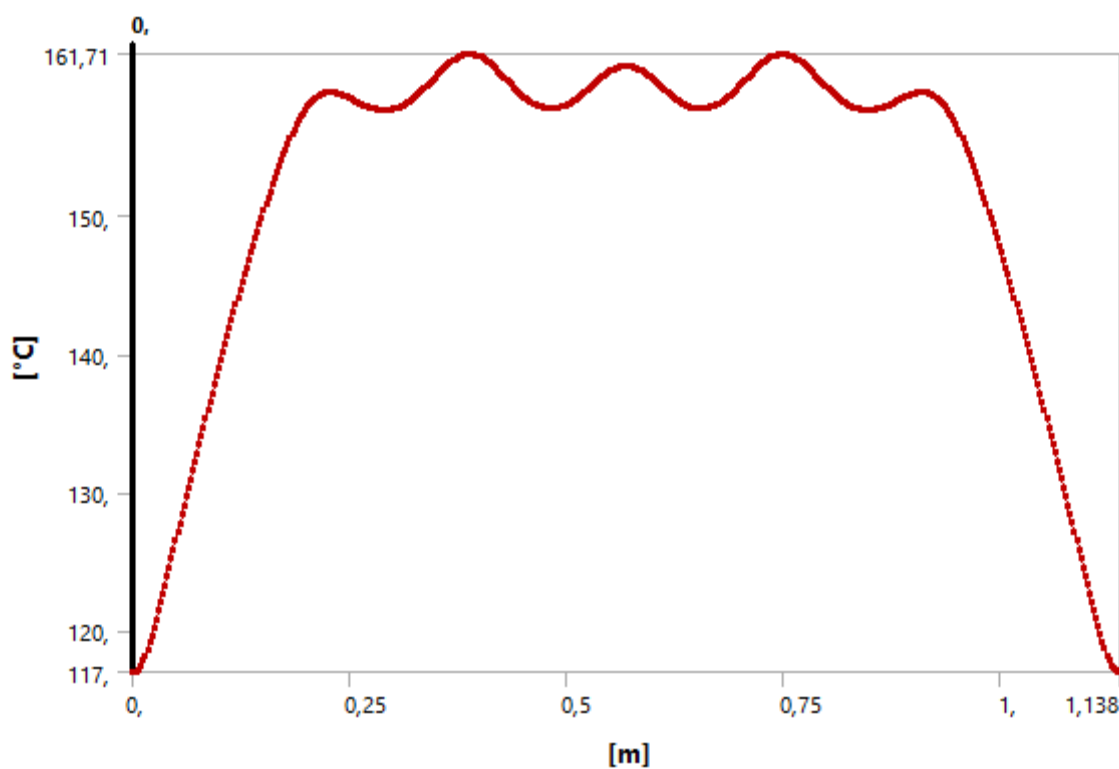
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали

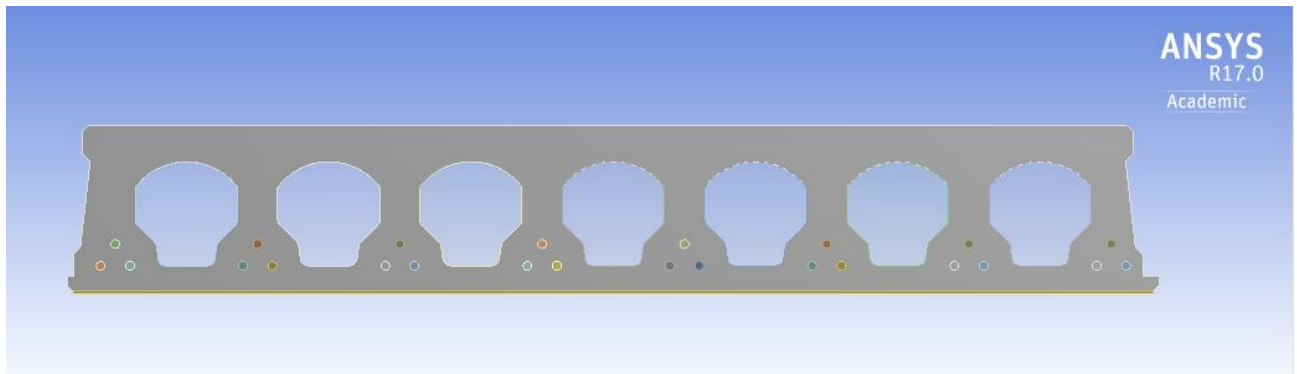


Максимальная температура необогреваемой поверхности

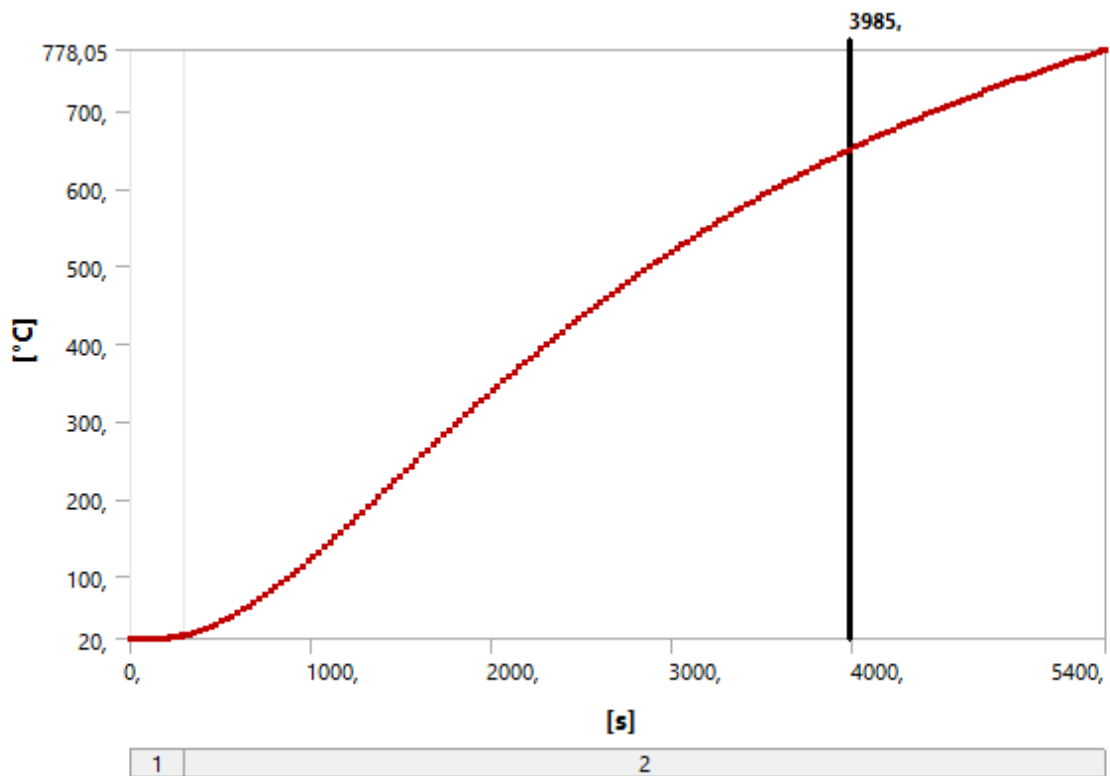


Распределение температур на необогреваемой поверхности

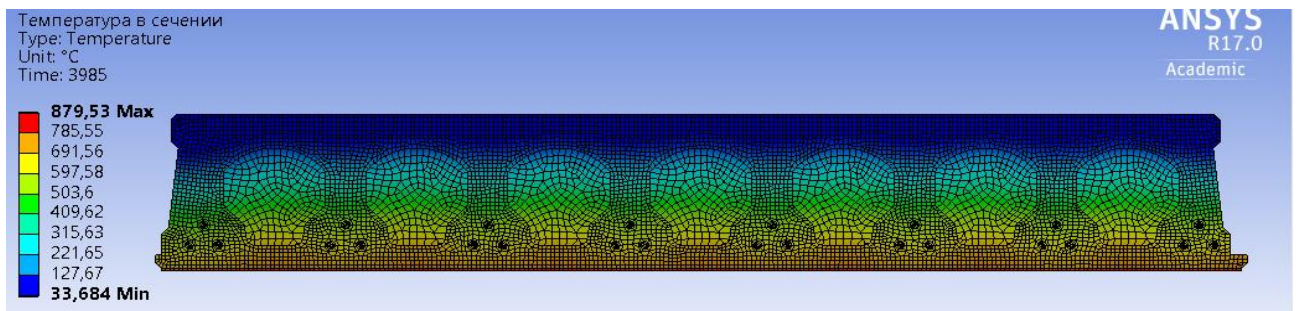
### ПБ-2.35.15-8



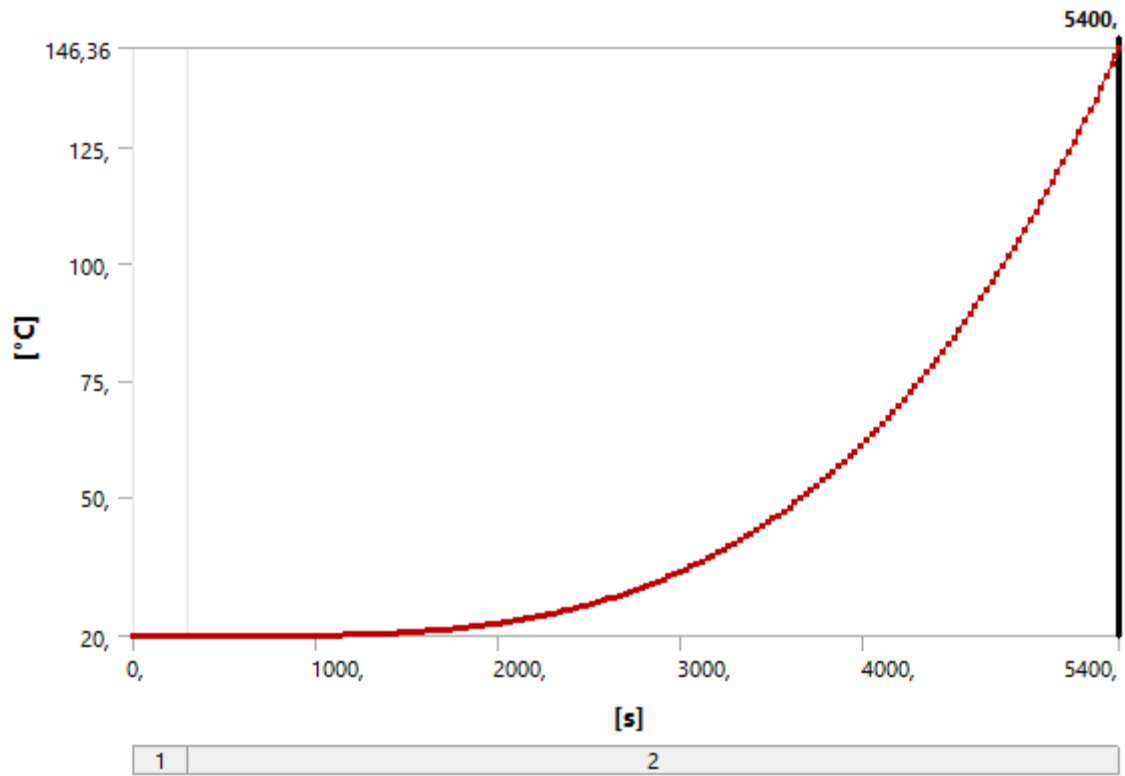
Сечение плиты



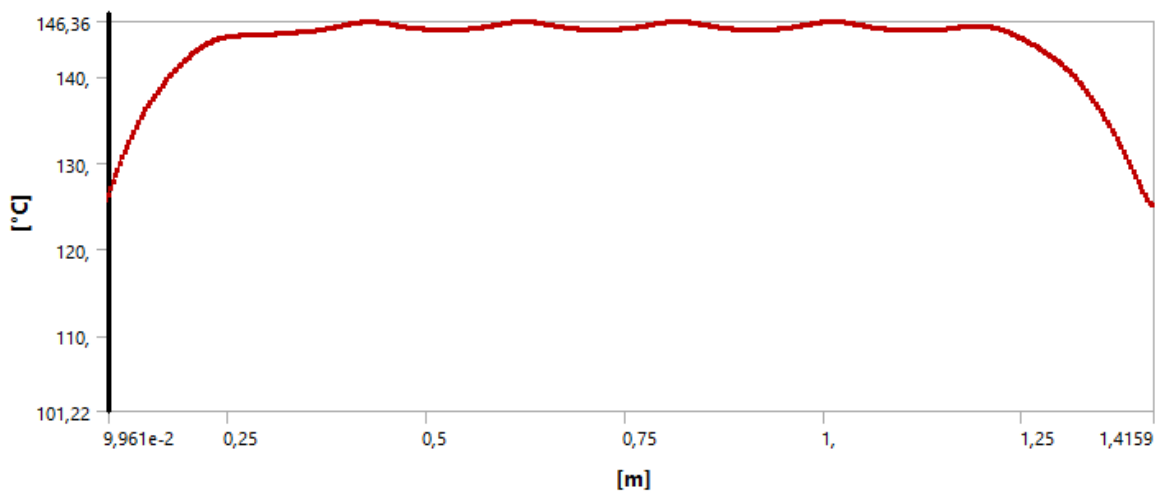
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали

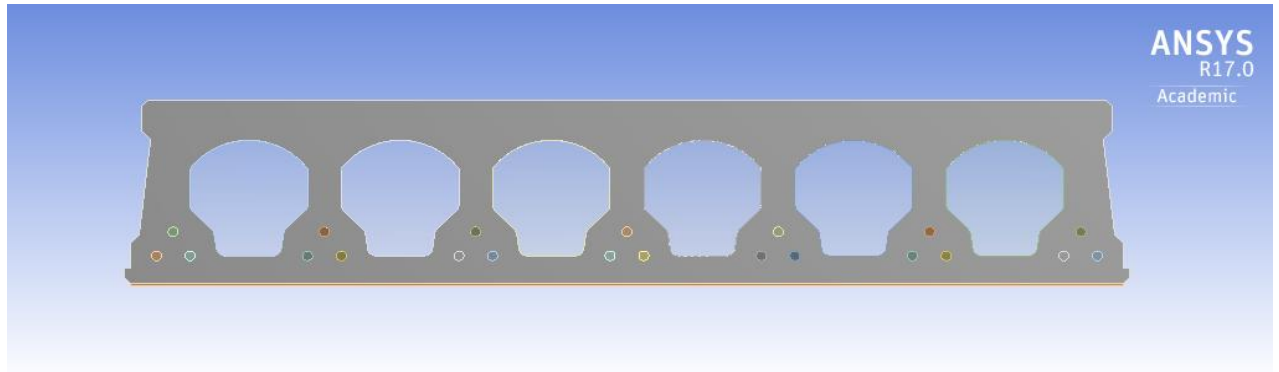


Максимальная температура необогреваемой поверхности

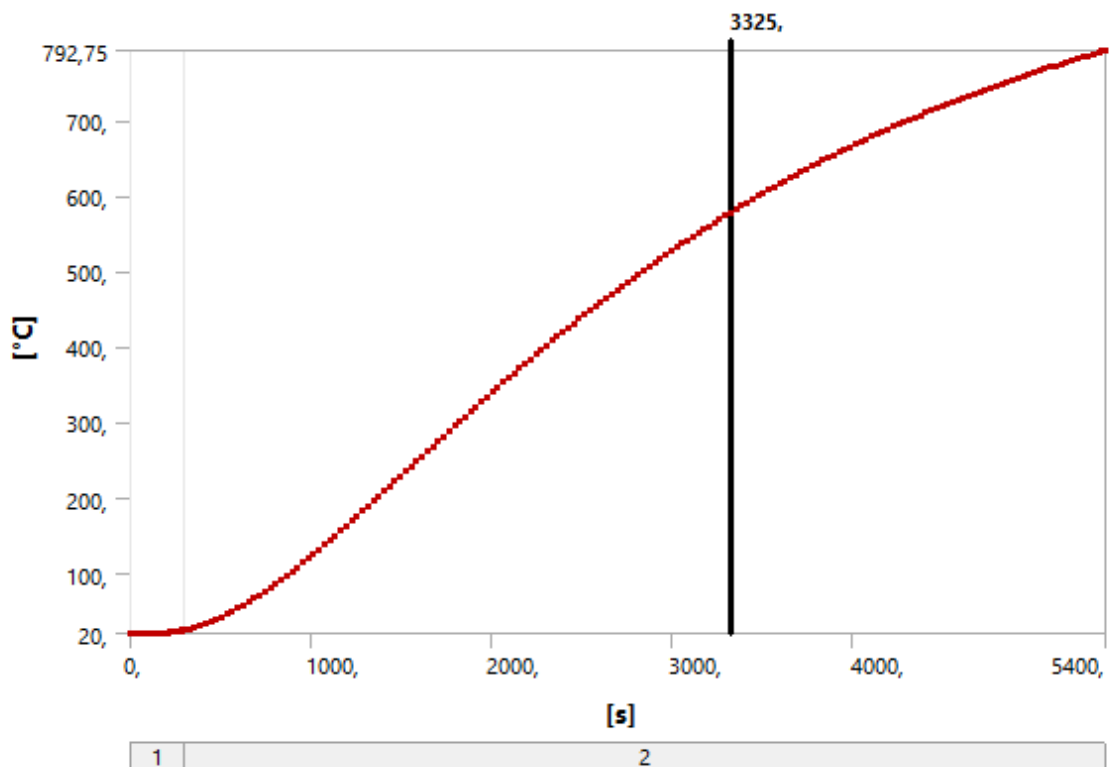


Распределение температур на необогреваемой поверхности

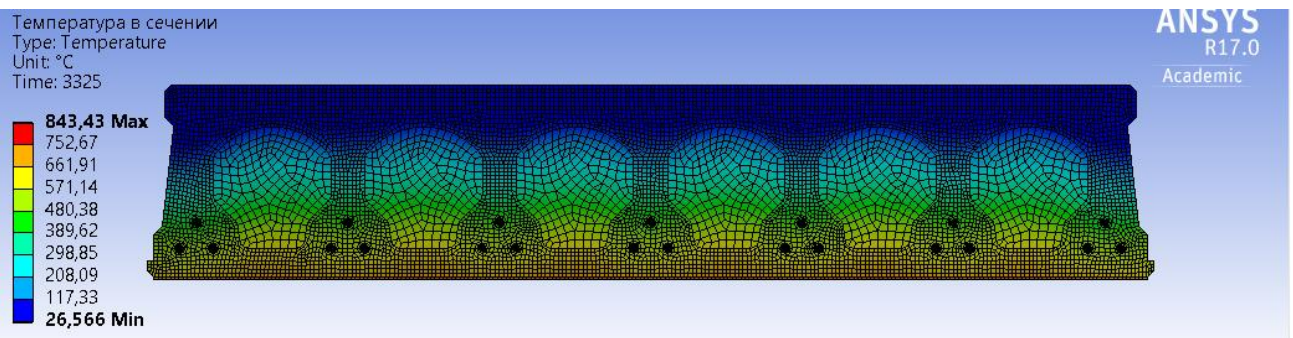
## ПБ-2.51.12-8



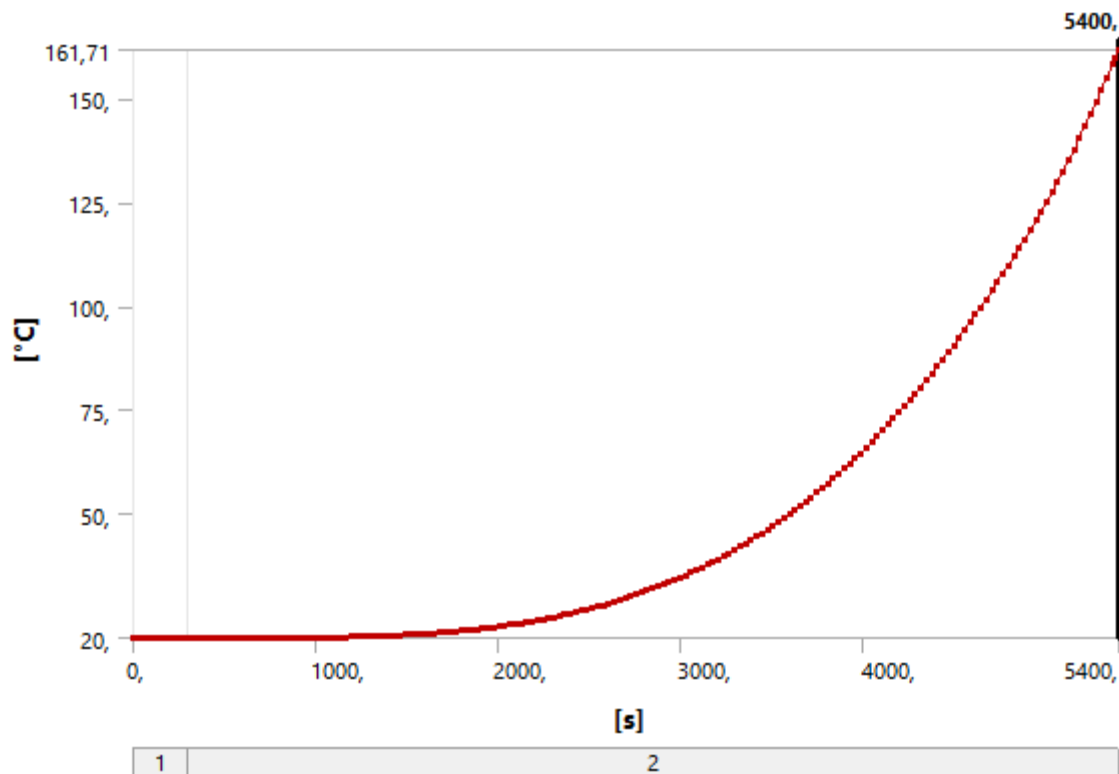
Сечение плиты



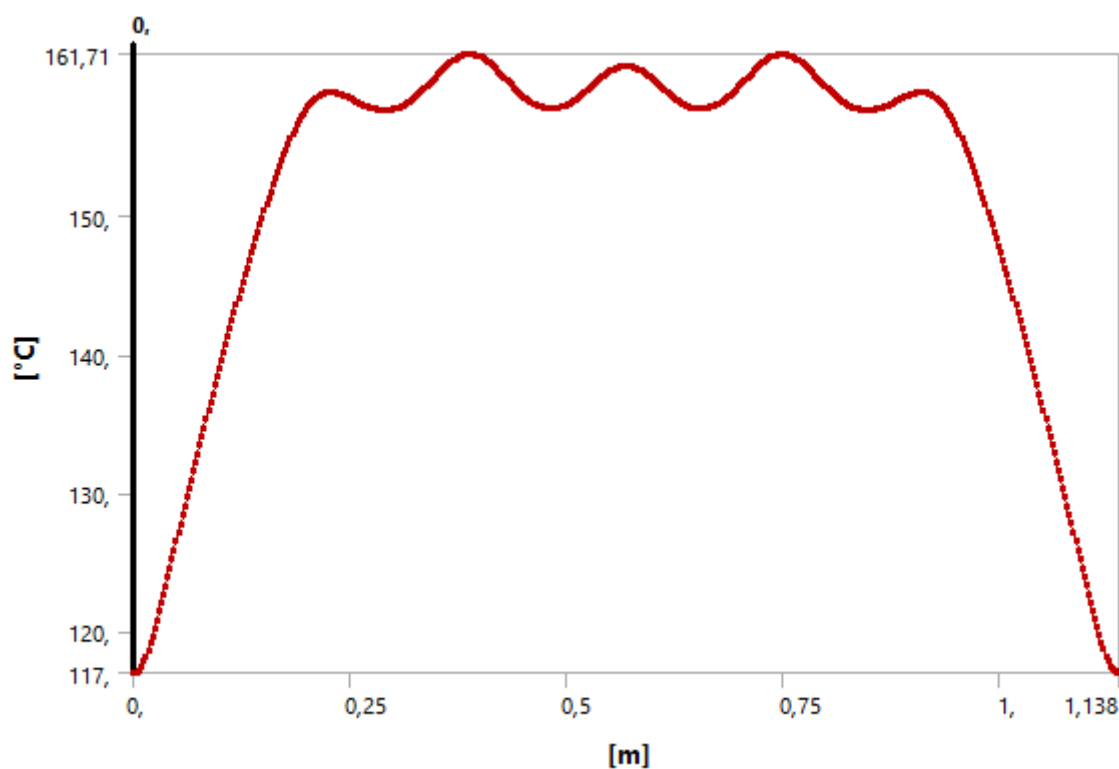
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали

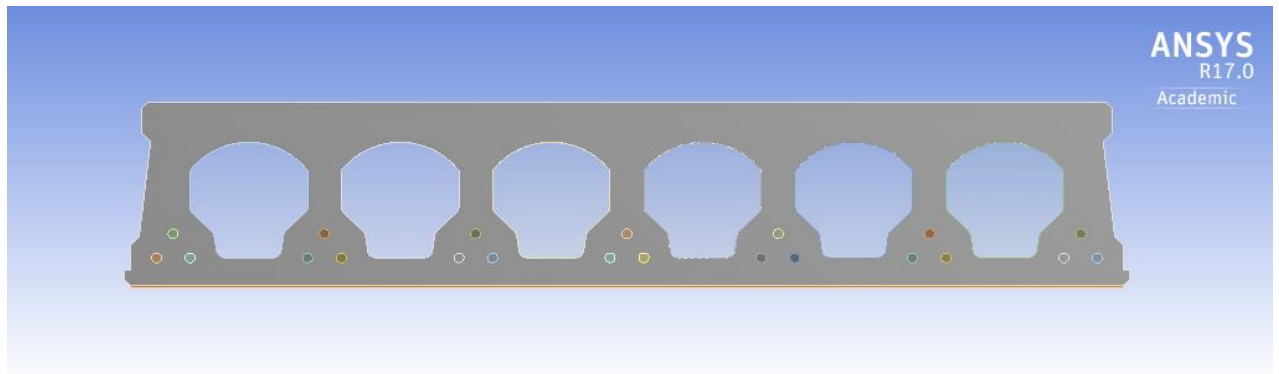


Максимальная температура необогреваемой поверхности

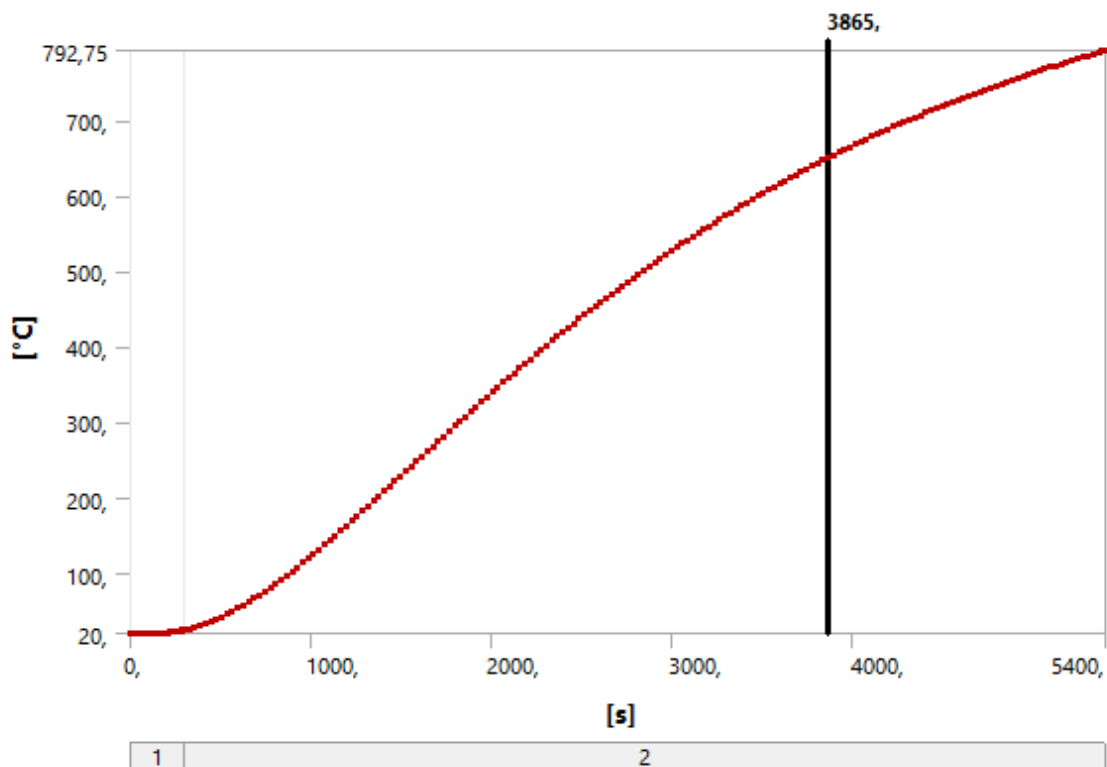


Распределение температур на необогреваемой поверхности

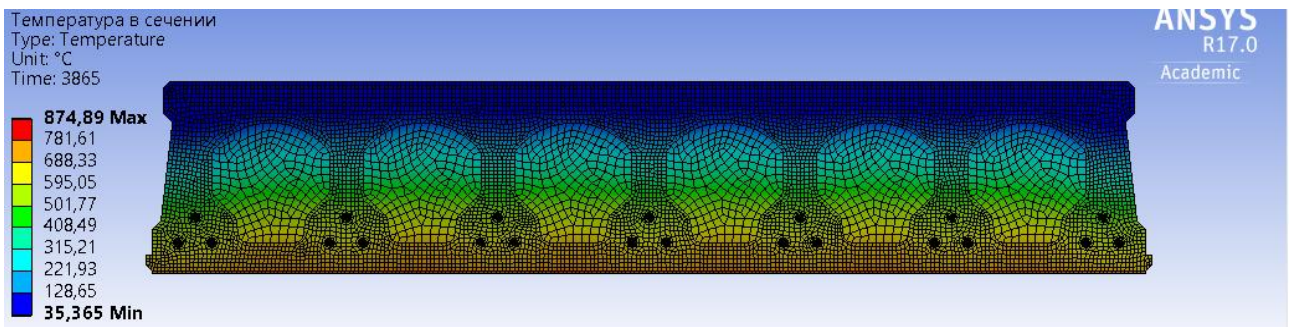
### ПБ-2.28.12-8



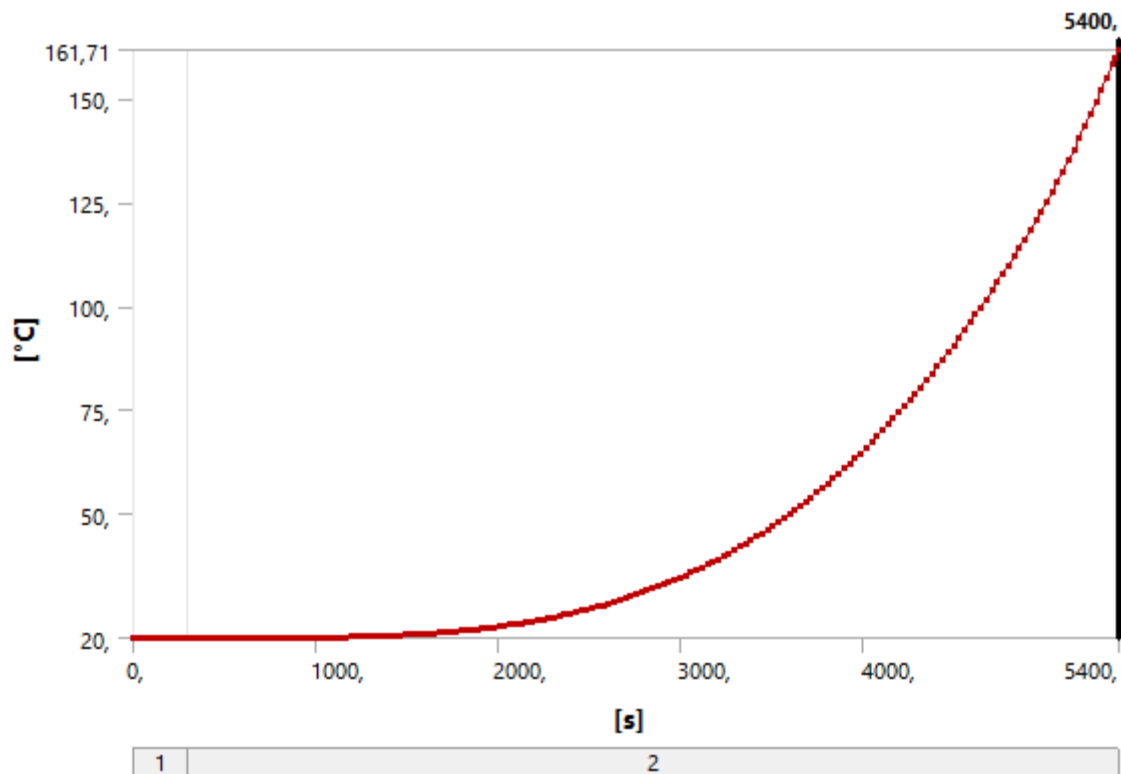
Сечение плиты



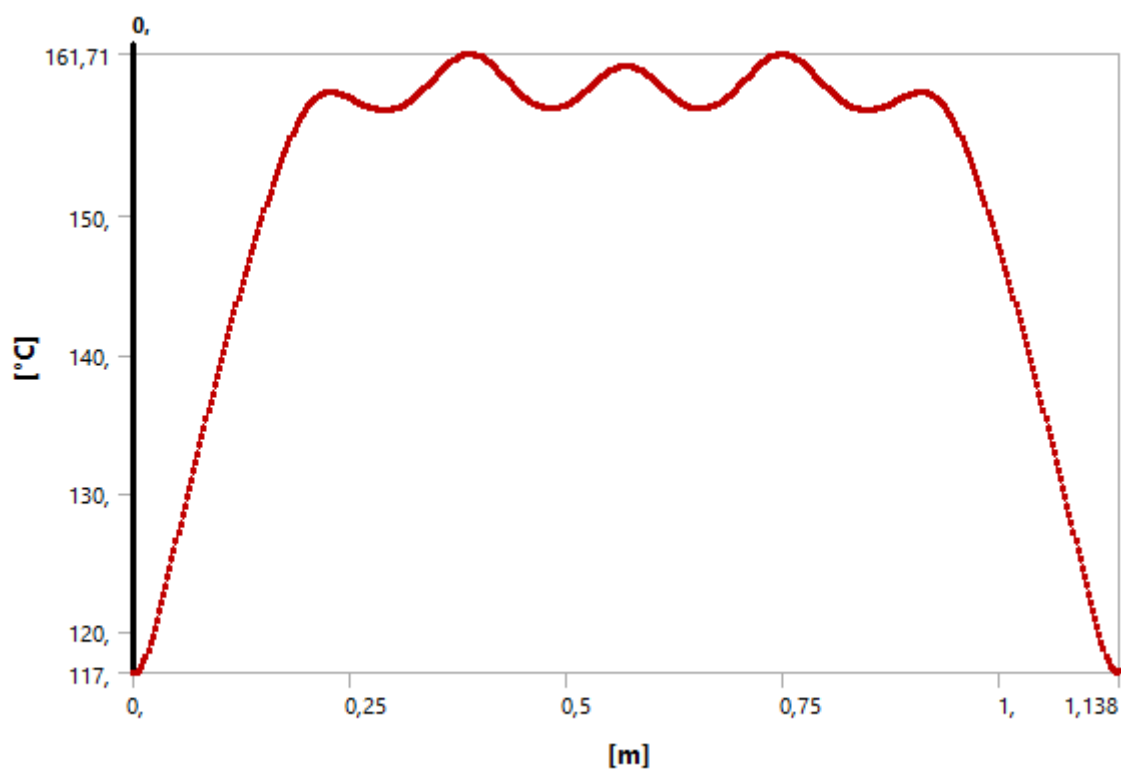
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали



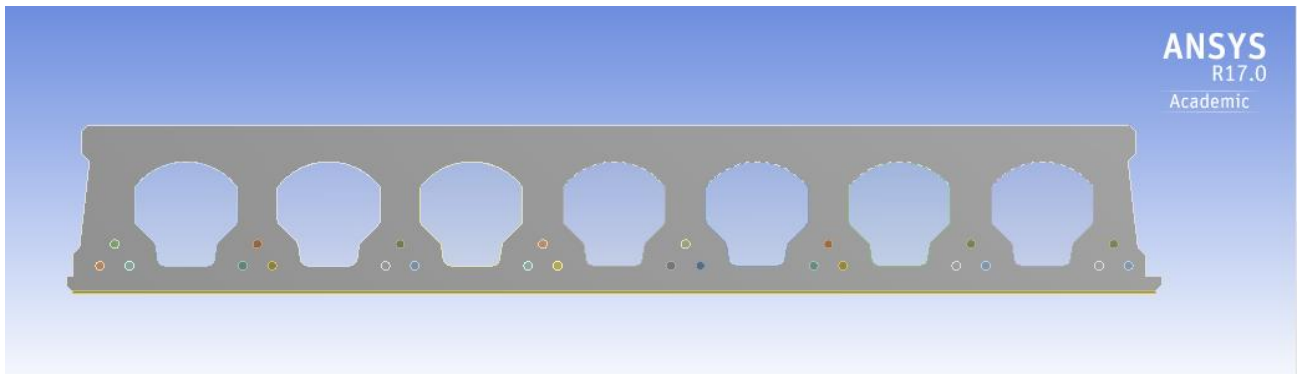
Максимальная температура необогреваемой поверхности



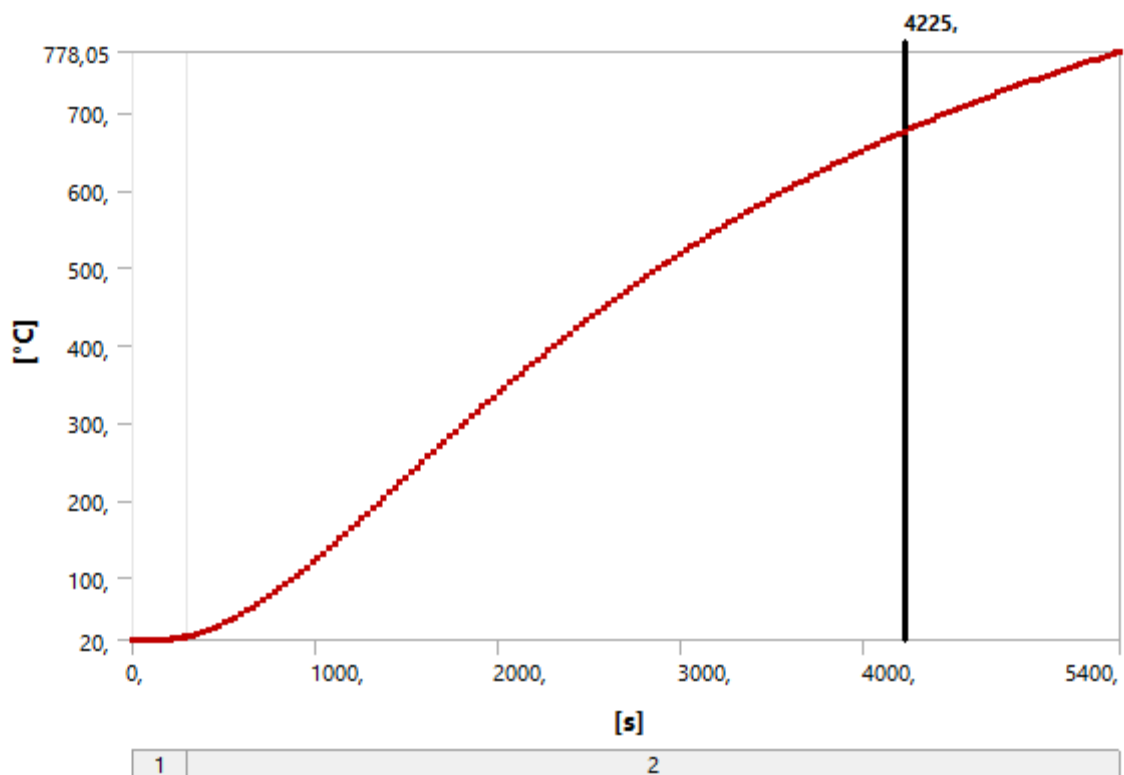
Распределение температур на необогреваемой поверхности



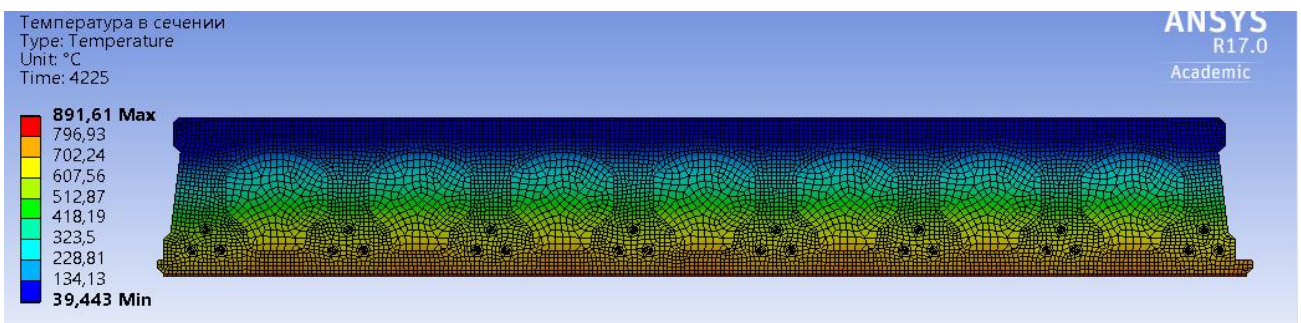
### ПБ-2.28.15-8



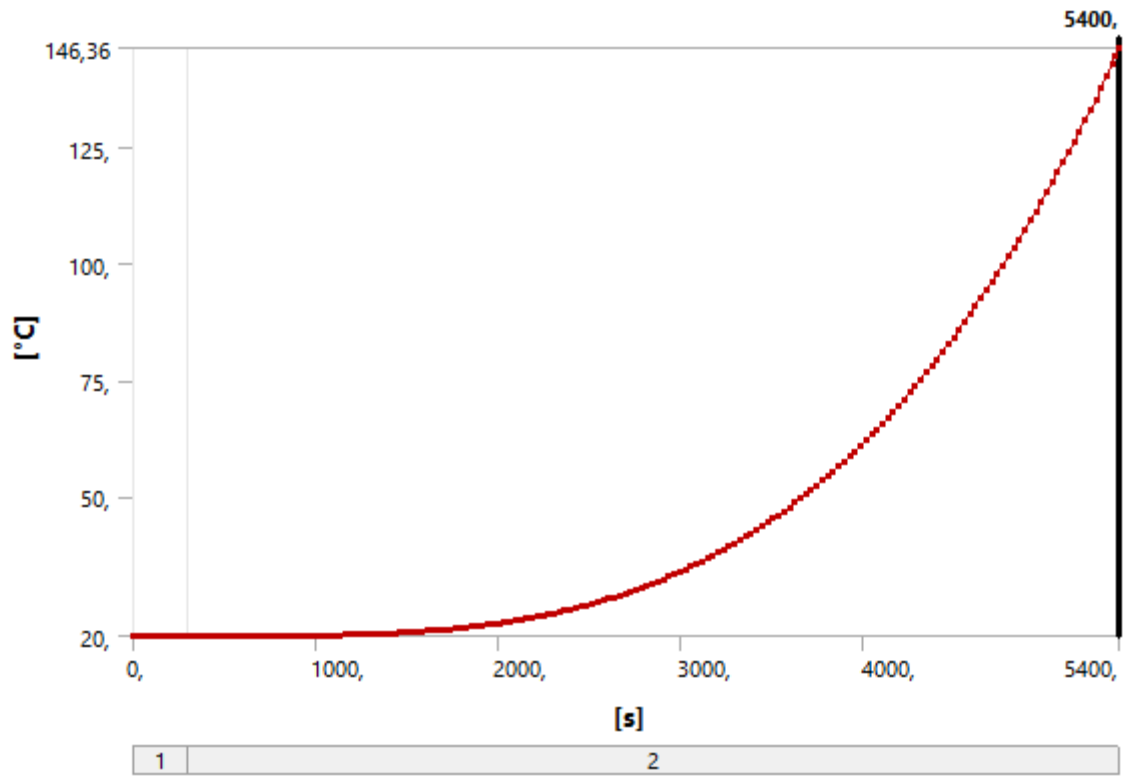
Сечение плиты



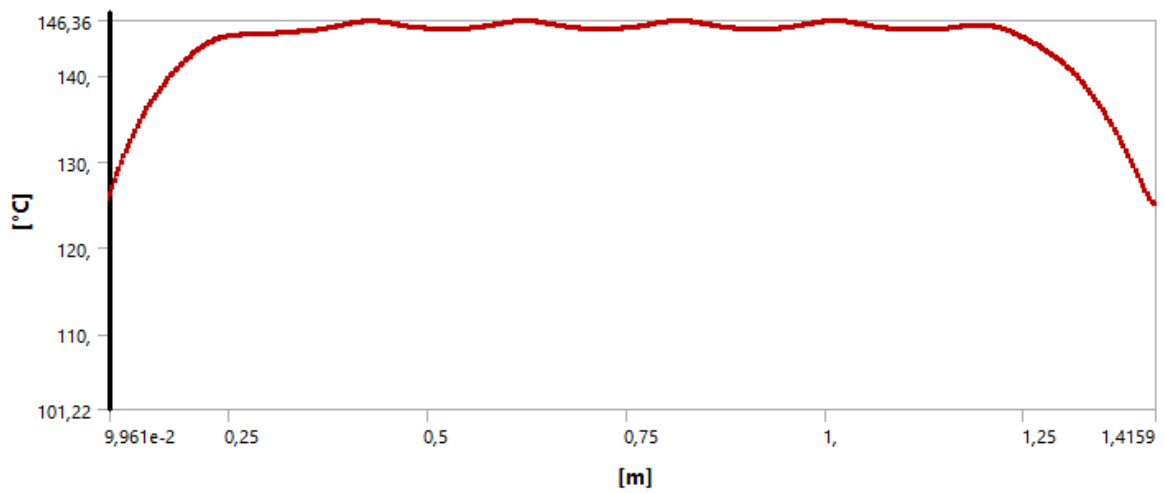
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали

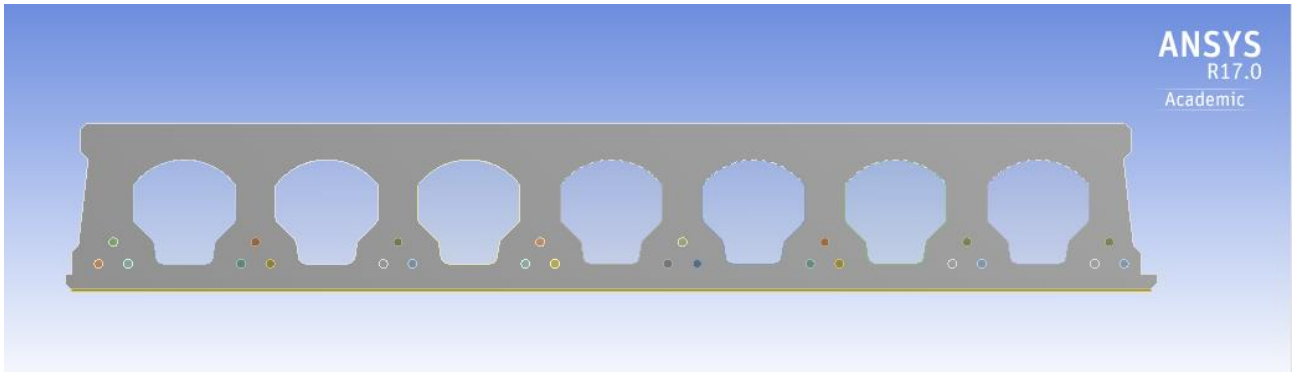


Максимальная температура необогреваемой поверхности

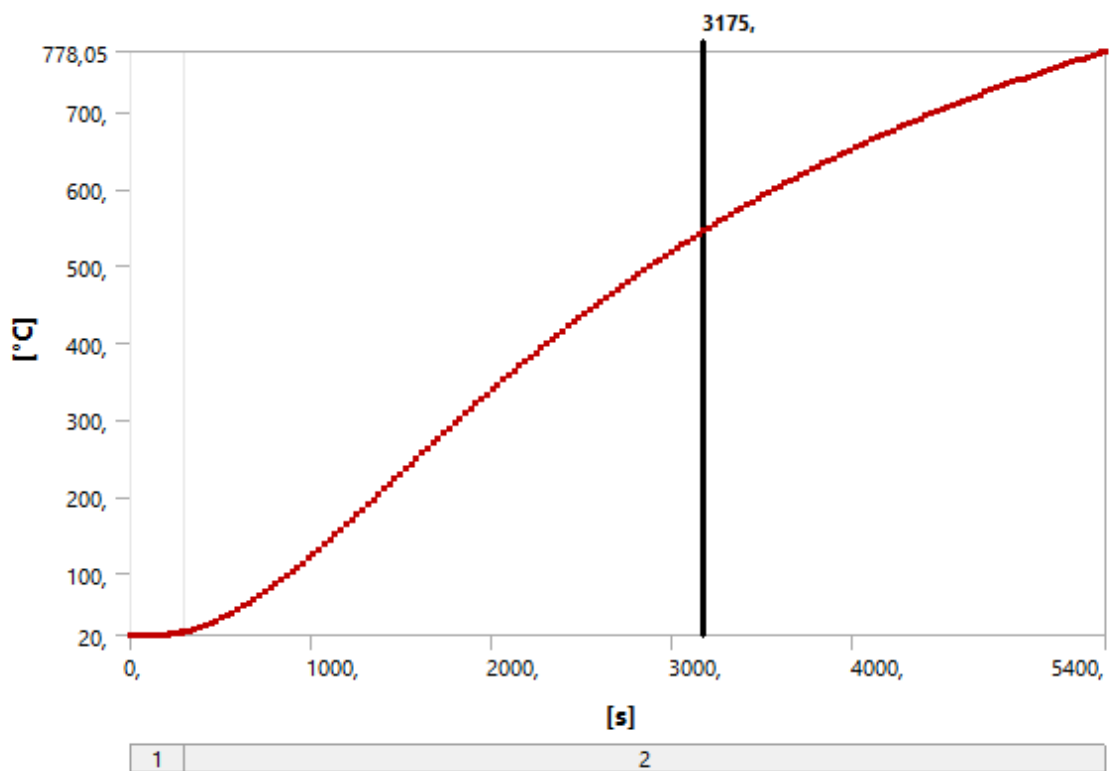


Распределение температур на необогреваемой поверхности

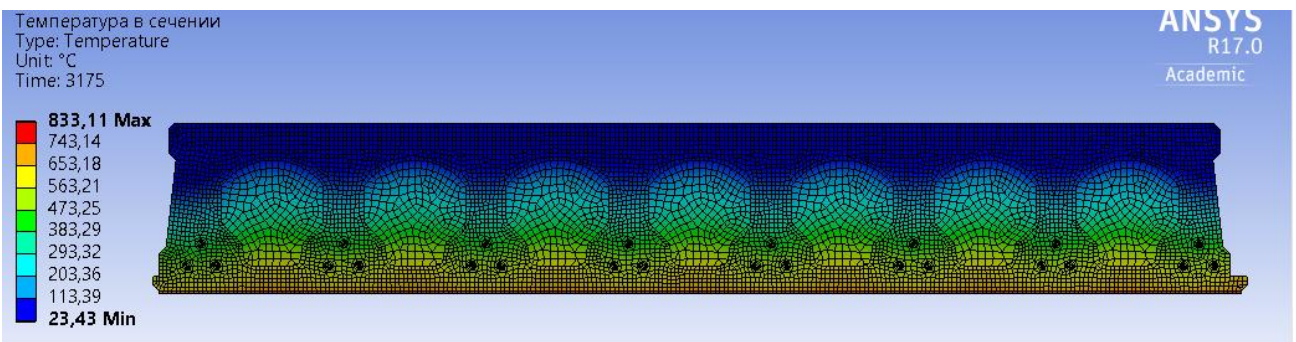
## ПБ-2.61.15-12.5



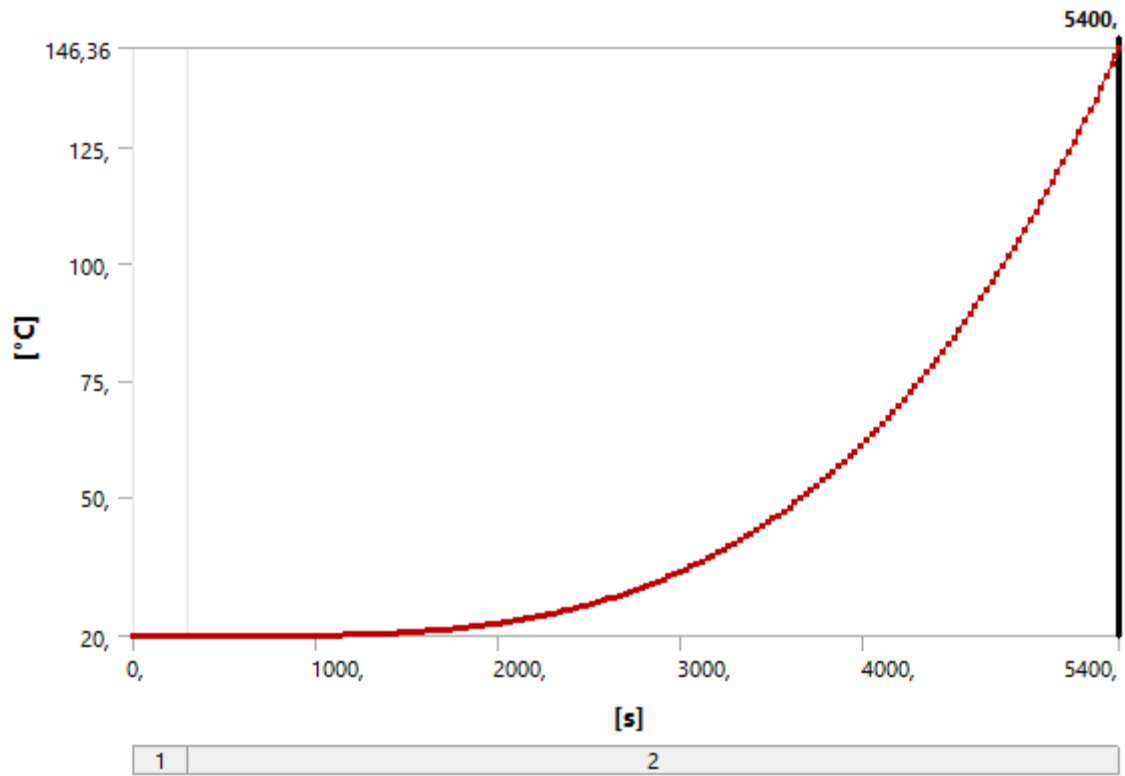
Сечение плиты



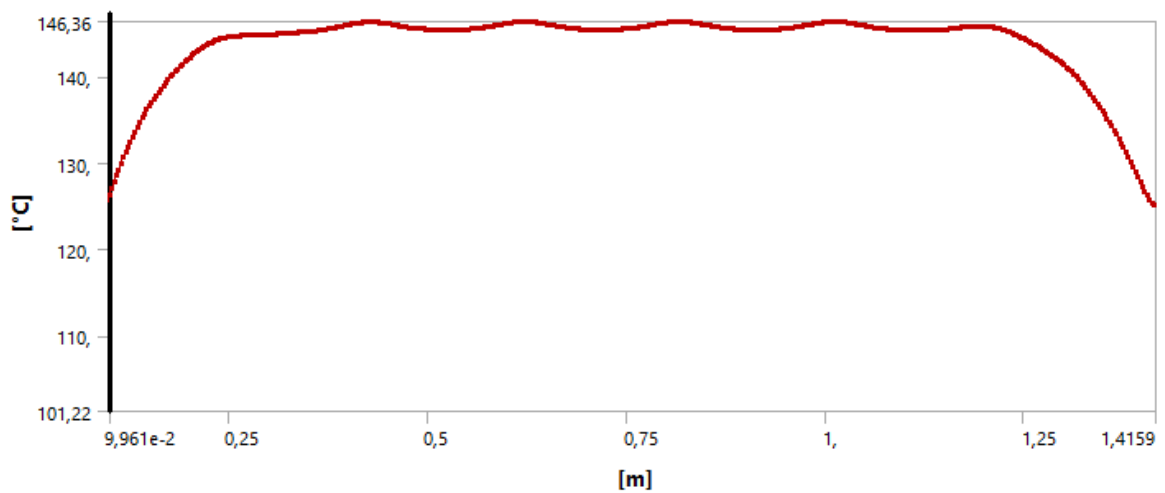
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали

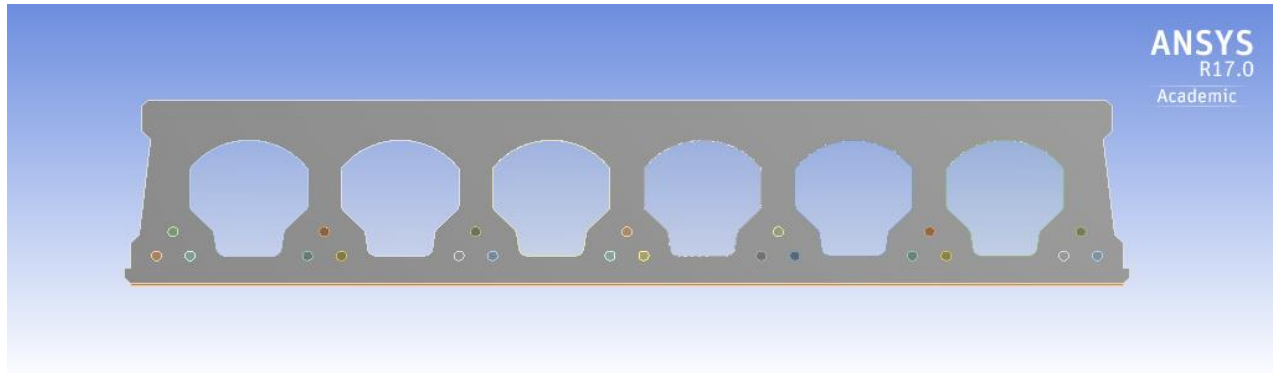


Максимальная температура необогреваемой поверхности

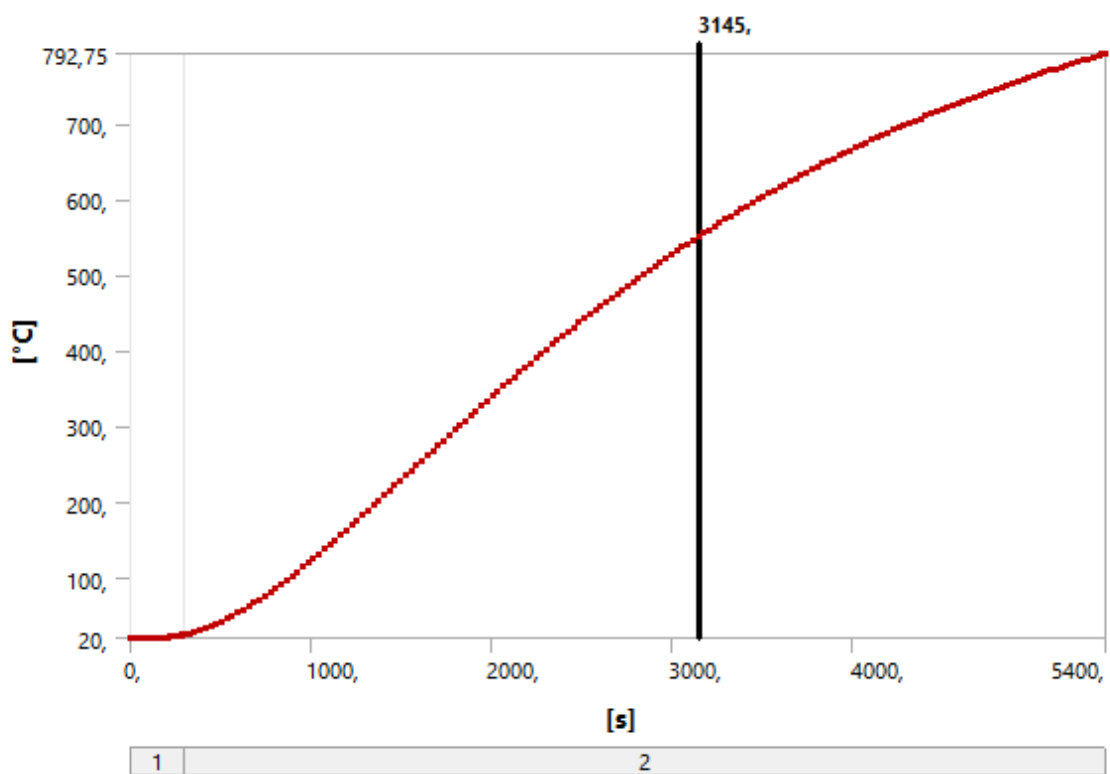


Распределение температур на необогреваемой поверхности

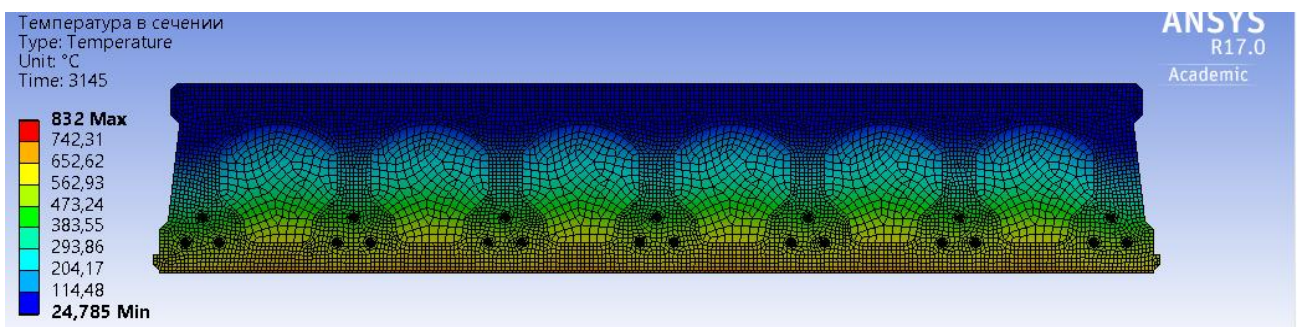
### ПБ-2.61.12-8



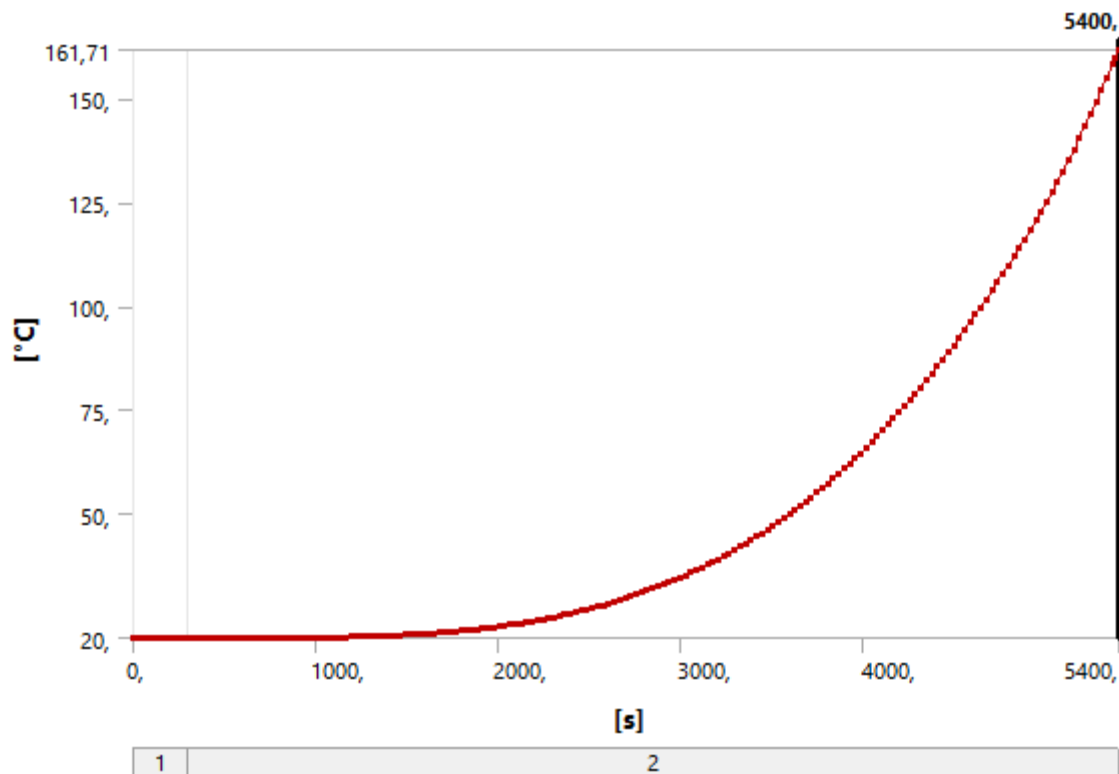
Сечение плиты



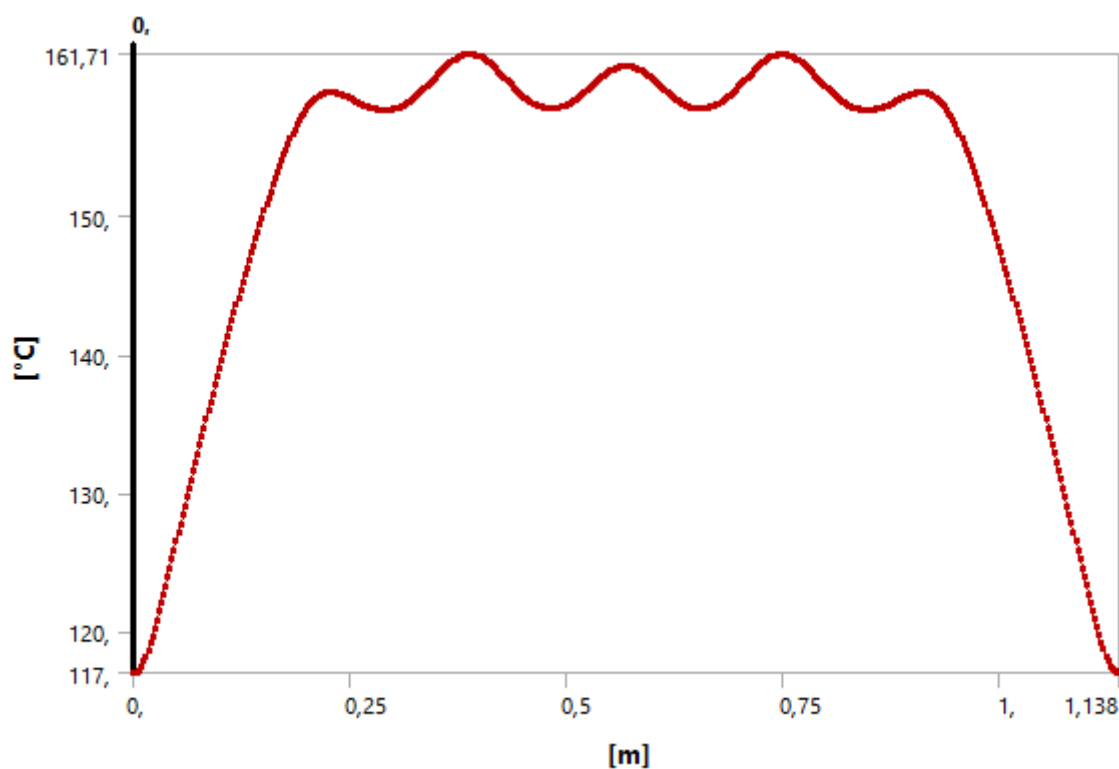
Время достижения критической температуры стали



Поле температур на момент достижения критической температуры стали



Максимальная температура необогреваемой поверхности



Распределение температур на необогреваемой поверхности