

## **Экспериментальное исследование охлаждения высокотемпературной металлической заготовки из стали 40Х\***

*Приведены результаты натурного эксперимента, полученные при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки из стали 40Х потоком недогретой воды. Приведена методика проведения эксперимента. Показаны изменения характерной температуры поверхности заготовки, охлаждаемой потоком воды по времени.*

**Ключевые слова:** охлаждение; заготовка; поток газожидкостной среды; натурный эксперимент.

**S.S. Makarov, Can. Eng.,**

**K.E. Chekmyshev, M. Sc.**

(Institute of Mechanics of Urals Branch of RAS, 34, T. Baramzina Str., Izhevsk 426067)

## **Experimental investigation of high-temperature 40H steel blank cooling**

*The results of the full-scale experiment obtained at high-temperature 40H steel blank cooling with a flow of sub-cooled water are shown. To carry out experiments there is designed and assembled a device for a visual observation and fulfillment complex measurements of blank surface temperatures. For the 40H steel blank with a diameter of 24 mm, by the initial temperature of 800°C, moving in a cooling area at a speed of m/s the experimental measurements of a surface temperature at cooling with a water flow at a speed of m/s are carried out. The initial water temperature is 20°C. The measurements of a blank surface temperature were performed with the aid of a thermal imager of NEC TH9100 Pro WRI (Japan) type. There was not observed an intensive bleb steam formation in the flow of strong sub-cooled water. In the water flow at the blank border insignificant steam areas were observed which were carried away at once with a water flow. Changes of a typical temperature in a blank cooled with a water flow according to a time period are shown.*

**Keywords:** cooling; blank; gas-liquid medium flow; full-scale experiment.

### **Введение**

В металлургической и машиностроительной промышленности при производстве заготовок из металлов и сплавов с целью обеспечения их качества применяют различные виды термической обработки. Термическая обработка включает в себя нагрев заготовки с заданной скоростью до требуемой температуры; охлаждение в среде, обеспечивающей скорость охлаждения, при которой формируется структура материала с наилучшими технологическими и эксплуатационными свойствами.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-41-180211).

При этом технологические режимы нагрева и охлаждения определяют приближенными расчетами, либо опытным путем.

Следует отметить, что для нагрева в промышленности используют отработанные конструкции установок и нагревающих устройств с нормативными эксплуатационными условиями.

При нагреве металла используют электронагревающие устройства, обеспечивающие компактность и уменьшенные потери металла в окалину при общем малом времени нагрева.

При охлаждении используют устройства с широким спектром закалочных сред, таких, как эмульсии, масла, растворы, соли, керосин

и другие, необходимые для создания заданной скорости охлаждения.

Применение таких закалочных сред, несмотря на свою эффективность, требует соблюдения безопасности, санитарно-гигиенических условий труда, защиты окружающей среды. Поэтому, при выборе закалочных сред, предпочтение отводится воде, скорость охлаждения которой может изменяться в зависимости от температуры и режимов подачи от 5 до 20 раз [1].

Для охлаждения цилиндрических металлических заготовок широко применяются спрейерные устройства [2], позволяющие создавать одинаковые условия охлаждения по периметру заготовки за счет равномерного и симметричного подвода охлаждающей среды в виде быстро движущихся сплошных потоков жидкости.

В работе [3] приводятся результаты численного моделирования теплообмена при охлаждении металлической заготовки из стали 30ХГСН2А. Определены скорости охлаждения заготовки потоком газожидкостной среды при начальных температурах нагрева, характерных для высокотемпературных тел, на поверхности которых процесс охлаждения происходит с кипением жидкости. Анализ изменения интенсивности охлаждения в зависимости от скорости движения заготовки относительно потока охлаждающей среды показал, что движение заготовки оказывает незначительное влияние на скорость охлаждения по объему.

В работе [4] рассмотрена математическая модель сопряженной задачи конвективного теплообмена при охлаждении нагретого металлического цилиндра ламинарным потоком охлаждающей среды. Охлаждение происходит без кипения жидкости. В работе [5] предложена математическая модель сопряженного теплообмена в гетерогенной системе «твердое тело – газожидкостная среда» с учетом парообразования в охлаждающем продольном потоке жидкости у поверхности высокотемпературного металлического цилиндра. Численный алгоритм применен для исследования охлаждения металлической заготовки цилиндрической формы из конструкционной стали 30ХГСН2А [6].

В работе [7] получены результаты численного исследования параметров теплообмена при охлаждении газожидкостным потоком высокотемпературного металлического цилиндра с учетом парообразования. Определены значения температур цилиндра вдоль по-

верхности и по радиусу при охлаждении потоком охлаждающей среды со скоростью, характерной для ламинарного режима течения жидкости. Анализируется интенсивность изменения температуры поверхности металлического цилиндра в зависимости от начальной температуры, скорости потока жидкости и времени процесса охлаждения.

Целью настоящей работы является установление правомочности принятых предположений в работах [3 – 7] о незначительном влиянии паровой фазы в виде пузырьков пара в потоке сильно недогретой до насыщения воды на скорость охлаждения металлической заготовки и получение экспериментальных значений характерных температур по времени процесса охлаждения.

### Результаты натурного эксперимента

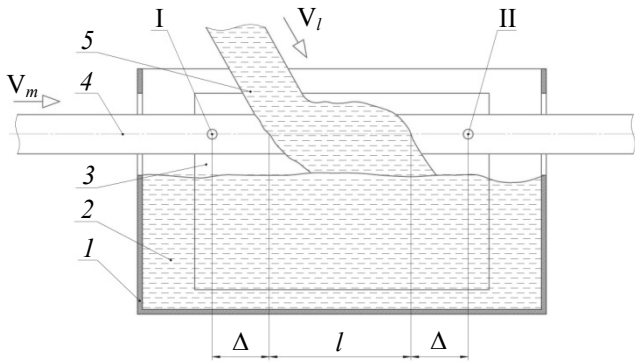
Для проведения натурных экспериментов спроектировано и собрано устройство, с помощью которого производилось визуальное наблюдение и комплексные замеры – лоток. На рис. 1 приведена фотография спроектированного и изготовленного для проведения эксперимента лотка.



Рис. 1. Лоток для проведения эксперимента

Лоток выполнен в виде ёмкости прямоугольной формы из нержавеющей стали со сквозными отверстиями для прохождения заготовки и смотровыми окнами, расположенными с двух боковых сторон. Крепление лотка осуществляется болтовыми соединениями к двум направляющим, которые монтируются на механический комплекс ВТМО ВО [8].

На рис. 2 приведена схема лотка с позициями (I) и (II), между которыми производится замер температуры охлаждаемой заготовки.



**Рис. 2. Схема области проведения эксперимента:**  
 1 – лоток; 2 – охлаждающая среда (вода); 3 – смотровое окно; 4 – заготовка; 5 – поток воды;  $v_m$  – скорость подачи заготовки;  $v_l$  – скорость подачи охлаждающей среды

Замеры температуры поверхности охлаждаемой заготовки производились при помощи тепловизора NEC TN9100 Pro WRI (Япония). Погрешность прибора в температурном диапазоне от 0 до 2000 °C при использовании стандартного объектива составляет  $\pm 2\%$ .

Так как замеры температуры заготовки производили тепловизором через слой воды, то получаемые значения будем считать как характерную температуру, определяемую интегрально в интервале от поверхности заготовки до внешней поверхности потока воды.

На рис. 3 приведена фотография процесса охлаждения заготовки.



**Рис. 3. Фото охлаждения заготовки**

Как показывают визуальные исследования, наличие паровой фазы в эксперименте наблюдалось в виде пара, который отводился в окружающую среду за счет испарения с нагретой поверхности заготовки, и уносимого потоком жидкости. Интенсивного пузырькового парообразования в потоке сильно недогретой

воды у поверхности заготовки не наблюдалось. В потоке воды у границы заготовки наблюдались незначительные паровые зоны, которые моментально уносились потоком воды.

При проведении эксперимента исследовались различные режимы охлаждения при скорости подачи воды  $v_l = 0,1 \dots 1,1$  м/с и скорости движения заготовки  $v_m = 0,001 \dots 0,01$  м/с. Для оценки изменения температуры охлаждаемой заготовки выбраны следующие условия:  $v_l = 0,2$  м/с;  $v_m = 0,008$  м/с. Температура воды 20 °C. Начальная температура нагретой в индукторе заготовки составляет 800 °C. Температура окружающей среды 12 °C. Заготовка из стали 40X [9]. Диаметр заготовки 24 мм. Длина зоны контакта потока воды с заготовкой  $l = 45$  мм. Замер температуры производился в интервале между точками I и II,  $\Delta = \pm 5$  мм (см. рис. 2).

На рис. 4 приведены значения характерной температуры фиксированной экспериментальной точки на поверхности перемещающейся металлической заготовки на участке от точки (I) до точки (II) по времени охлаждения.

Из приведенных экспериментальных замеров видно, что температура поверхности заготовки в точке I, расположенной на удалении 15...30 см от индуктора (рис. 4, а) отличается от начальной в меньшую сторону на 3...5 %. Начальный профиль температуры по длине экспериментального участка неравномерен, значения температуры изменяются по длине на 10 %. После подачи охлаждающей среды (рис. 4, б) характерная температура поверхности снижается со скоростью 1500...1600 °C/с и затем, температурный профиль принимает вид (рис. 4, в), который сохраняется до конца времени охлаждения. Средняя скорость охлаждения поверхности составляет 100 °C/с. Видно (рис. 4, г), что в точке II температура поверхности несколько возрастает, это связано с подводом тепла от внутренних слоев заготовки и отсутствием на поверхности охлаждающей воды.

На рис. 5 представлена диаграмма изменения характерной температуры поверхности охлаждаемой заготовки потоком воды на участке протяженностью 55 мм (см. рис. 2), за период времени 6,8 с.

Видно, что полученные экспериментальными замерами значения характерной температуры поверхности заготовки в зоне охлаждения (указаны точками на рис. 5) снижаются за непродолжительный период времени 1,0...2,0 с и затем меняется незначительно  $\pm 10\%$ .

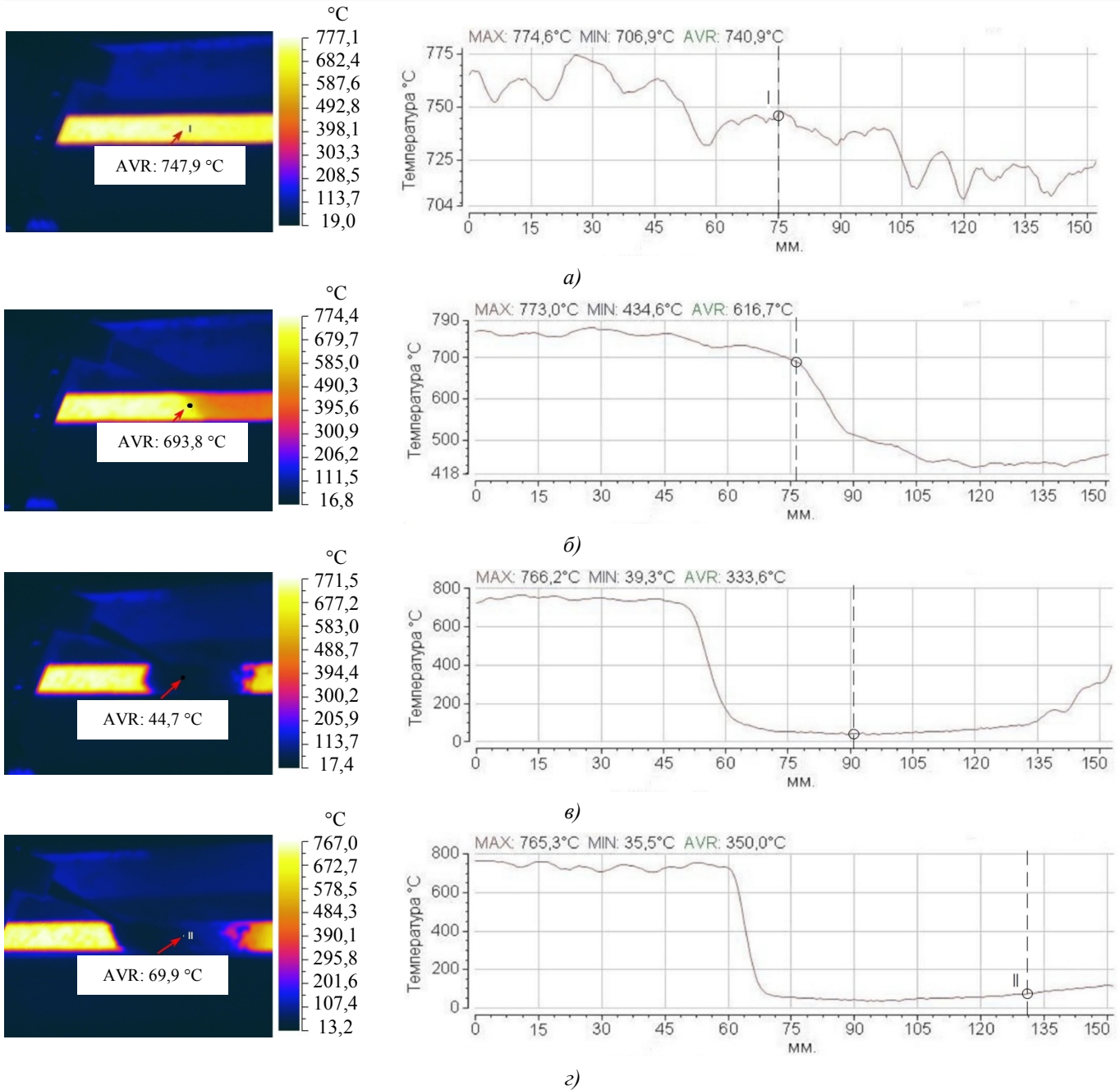


Рис. 4. Характерная температура заготовки на участке от I до II

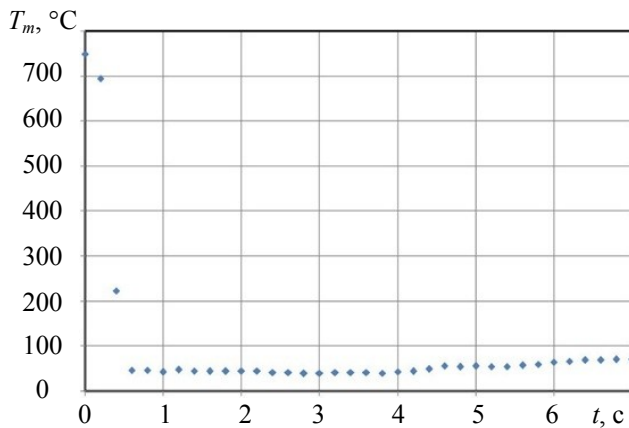


Рис. 5. Характерная температура поверхности заготовки, охлаждаемой потоком воды

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты натурного эксперимента подтверждают правомочность принятых в работах [3 – 7] предположений о незначительном влиянии паровой фазы в виде пузырьков пара в потоке сильно недогретой воды на скорость охлаждения. Анализ результатов натурного эксперимента показывает, что для рассматриваемых режимов охлаждения, за временной интервал порядка 1,0...2,0 с, характерная температура поверхности металлической заготовки снижается до температуры насыщения, что хорошо согласуется с полу-



ченными результатами [3] модельных решений. Это позволяет в дальнейшем для анализа параметров теплового состояния высокотемпературных заготовок применять методы математического моделирования и разработанные численные алгоритмы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полевой, С. Н., Евдокимов, В. Д. Упрочнение машиностроительных материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1994. – 496 с.
2. А. с. № 579322 СССР. Устройства для охлаждения прокатных изделий /Черненко В.Т., Узлов И.Г., Худик В.Т., Поляков С.Н., Бухиник Е.Н., Манько В.В., Кугушин А.А., Казырский О.Л., Ереметов А.М. 1977.
3. Макаров, С.С., Дементьев, В.Б. Численное моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки из стали 30ХГСН2А // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 9 (75). – С. 3–8.
4. Макаров С.С., Карпов А.И., Макарова Е.В. Математическая модель конвективного теплообмена при взаимодействии потока охлаждающей жидкости,двигающегося вдоль поверхности нагретого металлического цилиндра // Химическая физика и мезоскопия. – 2016. – Т. 18. – № 1. – С. 32–40.
5. Липанов, А.М., Макаров, С.С., Карпов, А.И., Макарова, Е.В. Численное исследование охлаждения высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24. – № 1. – С. 53–59. doi: 10.1134/S0869864317010061.
6. Makarov S.S., Dement'yev V.B., Makarova E.V. Mathematical modeling of cooling high-temperature cylindrical workpieces // Procedia Engineering, 2016, vol. 150, pp. 393–399. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.734
7. Макаров, С.С. Численное моделирование процесса охлаждения металлического цилиндра потоком газожидкостной среды,двигающимся горизонтально в кольцевом канале // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 324 – 331.
8. Четкарёв, В. А., Дементьев, В. Б., Шаврин, О. И. Анализ и оптимизация технологий упрочнения металло-

продукции методом ВТМО. – Ижевск: Институт прикладной механики УрОРАН, 1996. – 136 с.

9. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В.Г.Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Изд-во Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

## REFERENCES

1. Polevoy, S.N., Yevdokimov, V.D. *Engineering Material Strengthening: Reference Book*. – М.: Mechanical Engineering, 1994. – pp. 496.
2. Author's Certificate No. 579322 the USSR. *Devices for Rolled Product Cooling* / Chernenko V.T., Uzlov I.G., Khudik V.T., Polyakov S.N., Bukhinik E.N., Manko V.V., Kugushin A.A., Kazyrsky O.L., Yeremetov A.M. 1977.
3. Makarov, S.S., Dementiev, V.B. Digital heat exchange simulation at cooling high-temperature metal blank of steel 30ChGSN2A // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.9 (75). – pp. 3-8.
4. Makarov S.S., Karpov A.I., Makarova E.V. Simulator of convective heat exchange at interaction of cooling liquid flow moving along a surface of heated metal cylinder // *Chemical Physics and Mesoscopy*. -2016. – Vol. 18. – No.1. – pp. 32-40.
5. Lipanov, A.M., Makarov, S.S., Karpov, A.I., Makarov, E.V. Numerical investigation of cooling high-temperature metal cylinder with gas-liquid medium flow // *Thermo-physics and Airflow Mechanics*. – Vol.24. – No.1. – pp. 53-59. doi: 10.1134/S0869864317010061.
6. Makarov S.S., Dement'yev V.B., Makarova E.V. Mathematical modeling of cooling high-temperature cylindrical workpieces // *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 393–399. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.734
7. Makarov, S.S. Numerical simulation of metal cylinder cooling process with flow of gas liquid medium moving horizontally in ring channel // *Scientific Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2017. – Vol. 17. – No.2. – pp. 324-331.
8. Chetkarev, V.A., Dementiev, V.B., Shavrin, O.I. *Analysis and Optimization of Techniques for Metal Produce Strengthening by Method of VTMO*. – Izhevsk: Institute of Applied Mechanics of Urals Branch of RAS, 1996. – pp. 136.
9. *Steel and Alloys. Grade Catalogue* / under the editorship of V.G. Sorokin, M.A. Gervasiev. – М.: Internet Engineering Publishers, 2001. – pp. 608.

Рецензент д.т.н. А.И. Коришунов

