

УДК539.37

**Ю. В. Ощепкова**

УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук Ю. В. Юдин

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИЗ СТАЛИ 9Х2МФ**

### **АННОТАЦИЯ**

Исследовано влияние параметров предварительной термической обработки на свойства рабочих валков. Построены математические модели влияния дифференцированной термической обработки на служебные свойства валков – твердость, глубину закаленного слоя, временные напряжения. Показано влияние регулируемых параметров режима закалки (температура предварительного подогрева, время нагрева, время начального охлаждения, время циклических отогревов и окончательного охлаждения) на служебные свойства валков.

*Ключевые слова:* валки, термическая обработка, твердость, глубина закаленного слоя, временные напряжения

### **ABSTRACT**

The parameters of heat pretreatment on the properties of the work rolls were researching in the paper. The mathematical models of differentiated heat treatment on the service properties (hardness, hardened layer depth, time stress) were made. The controlled properties of heat treatment are the temperature of heat pretreatment, the time of heating, the time of cooling, the time cyclic heating and the final cooling.

*Keywords:* rolls, heat treatment, hardness, depth of the tempered layer, temporary tension

Одной из наиболее ответственных технологических операций в производстве прокатных валков является их термическая обработка. Она состоит из двух этапов: предварительной термической обработки (выполняемой непосредственно послековки) и окончательной (например, закалка ТВЧ). В качестве предварительной термической обработки применяется дифференцированная термическая обработка (ДТО).

Одной из стадий ДТО является градиентный нагрев с последующим водокапельным охлаждением. Предварительный объемный подогрев валка осуществляется до температур 250...600 °С. В процессе ДТО валок

нагревается в печи скоростного нагрева. При этом нагревается только приповерхностный слой бочки вала, а шейки остаются достаточно холодными. Скорость нагрева поверхности может достигать 700 °С/ч. После выдержки при температуре закалки 50...80 мин валок передается в установку регулируемого водокапельного охлаждения и охлаждается по заданному режиму [1]. В результате происходит закалка только бочки, а шейки вала остаются в исходном структурном состоянии [2].

Проведено имитационное моделирование режимов предварительной термической обработки валков диаметром 600 мм из стали 9Х2МФ.

Моделирование состояло из двух этапов. На первом этапе было исследовано влияние факторов нагрева и охлаждения ( $x_1-x_5$ ) методом полного факторного эксперимента, проведенного в программе UNIV [3]. Построены регрессионные модели для глубины упрочненного слоя ( $h_{3,c}$ ), максимальных растягивающих осевых напряжений в центральной зоне вала ( $\sigma_z$ ) и функции отношения интенсивности напряжений и предела текучести (критерий Губера-Мизеса)  $\sigma_i/\sigma_T$  в зависимости от факторов:

- температура объемного предварительного подогрева 250...450 °С (фактор  $x_1$ );
- время нагрева от температуры предварительного подогрева до температуры закалки 2...4 ч; (фактор  $x_2$ );
- температура поверхности бочки, при которой производится отключение водокапельного охлаждения 120...200 °С (фактор  $x_3$ );
- время кратковременного отключения охлаждающей установки 2...4 мин (фактор  $x_4$ );
- время окончательного охлаждения 1...2 ч (фактор  $x_5$ ).

За глубину закаленного слоя принята глубина с твердостью более 35 HRC, уравнение регрессии (1), значения факторов в кодированном масштабе:

$$h_{3,c} = 59,6 + 1,3x_1 + 1,5x_2 - 8,7x_3 - 1,9x_5 - 2,2x_1x_3 - 0,7x_1x_4 + 1,6x_1x_5 - 3,2x_2x_3 - 1,0x_2x_4 + 2,8x_2x_5 - 1,3x_3x_4 + 2,4x_3x_5 - 0,9x_4x_5. \quad (1)$$

Растягивающие осевые временные напряжения в центре вала в конце процесса закалки, рассчитанные при проведении факторного эксперимента, находятся в диапазоне 380...820 МПа. Влияние факторов в кодированном масштабе описывается уравнением (2):

$$\sigma_z = 643 + 14x_1 + 42x_2 - 37x_3 - 12x_4 + 113x_5 - 16x_1x_2 - 6x_1x_4 + 6x_1x_5 - 11x_3x_4 + 30x_3x_5, \text{ МПа} \quad (2)$$

При термической обработке валков наибольшее влияние на растягивающие осевые напряжения в конце процесса закалки оказывает скорость градиентного нагрева (фактор  $x_2$ ) и время последней стадии

охлаждения (фактор  $x_5$ ). При увеличении скорости нагрева, существенно возрастают временные осевые напряжения в центральной (осевой) зоне валка.

Исследовано изменение критерия Губера-Мизеса, согласно которому пластическая деформация происходит, если интенсивность деформации превосходит предел текучести, т. е. отношение интенсивности напряжений к пределу текучести не должно превышать 1. При этом, в результате развития пластической деформации возможно появление трещин, приводящих к разрушению валка.

$$\sigma_i/\sigma_T = 1,02 + 0,04x_1 - 0,03x_2 - 0,04x_3 - 0,03x_1x_2 - 0,03x_1x_3 + 0,04x_2x_3. \quad (3)$$

Отношение интенсивности к пределу текучести возрастает с увеличением температуры предварительного подогрева (рис. 1).

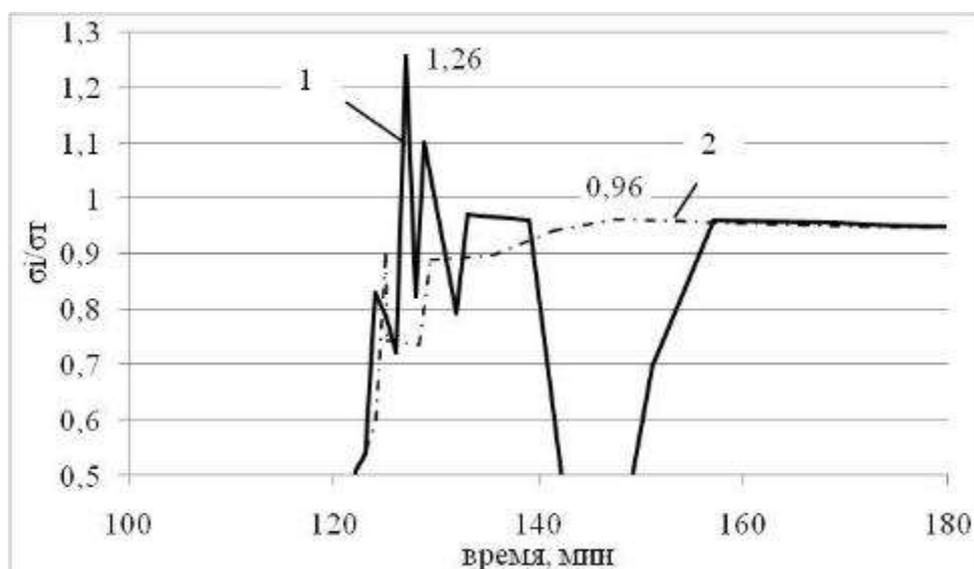


Рис. 1. Изменение критерия Губера-Мизеса  $\sigma_i/\sigma_T$  при разных режимах градиентного нагрева и охлаждения валка из стали 9Х2МФ:

1 – температура подогрева 450 °С, время нагрева 2 ч, 2 – температура подогрева 250 °С, время нагрева 2 ч

Резкий «скачок»  $\sigma_i/\sigma_T$  происходит при первом включении охлаждающего устройства примерно в тот момент времени, когда в приповерхностных слоях начинается мартенситное превращение.

На втором этапе численного моделирования рассматривалось влияние параметров циклического охлаждения.

В моделях, описываемых уравнениями (1)–(3) в качестве одного из параметров использовалось значение температуры поверхности валка, при которой происходит первое отключение водокапельного охлаждения, однако этот параметр технологически трудно регулировать. Поэтому, в качестве безусловно исполняемого параметра этапа охлаждения выбрано время работы охлаждающей установки до первого отключения  $\tau_{перв}$

0,17...0,33 ч (10...20 мин), а также суммарное время отогрева  $\tau_{\text{отогр.}}$  0,05...0,67 ч (3...40 мин), суммарное время циклического охлаждения  $\tau_{\text{цикл. охл.}}$  0,08...0,5 ч (5...30 мин), время последнего охлаждения  $\tau_{\text{послед.}}$  0,11...1,00 ч (7...60 мин) и количество циклов отогрева  $n_{\text{цикл.}}$  3...9.

По рассчитанным данным методом регрессионного анализа были получены модели (4)...(7):

$$\text{HRC} = 48,3 + 9,8\tau_{\text{перв.}} - 1,7\tau_{\text{отогр.}} + 5,5\tau_{\text{цикл. охл.}} + 2,7\tau_{\text{послед.}}; \quad (4)$$

$$h_{\text{з.с.}} = 71,9 + 4,3\tau_{\text{перв.}} - 1,5\tau_{\text{отогр.}} + 2,4\tau_{\text{цикл. охл.}} + 0,14\tau_{\text{послед.}} - 0,14n_{\text{цикл.}}, \text{ мм}; \quad (5)$$

$$\sigma_z = 43 + 1110\tau_{\text{перв.}} + 334\tau_{\text{отогр.}} + 625\tau_{\text{цикл. охл.}} + 191\tau_{\text{послед.}} - 3n_{\text{цикл.}}, \text{ МПа}; \quad (6)$$

$$\sigma_i/\sigma_T = 0,98 - 0,1\tau_{\text{перв.}} - 0,004\tau_{\text{отогр.}} - 0,019\tau_{\text{цикл. охл.}} - 0,020\tau_{\text{послед.}}. \quad (7)$$

Чтобы увеличить твердость поверхности и глубину упрочненного слоя необходимо увеличивать время первого охлаждения и уменьшать время отогрева. Для уменьшения осевых напряжений и критерия Губера-Мизеса в первую очередь необходимо уменьшать время первого и циклического охлаждения.

Взаимная противоречивость параметров термообработки на свойства вала требует использование методов математического программирования для поиска оптимального режима.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин Ю. В. Разработка конструкции водокапельных охлаждающих устройств для термической обработки валков прокатных станов / Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе, Н. П. Ануфриев // МиТОМ. 2013. № 3. С. 14–19.
2. Карасюк Ю. А. Технология и оборудование для окончательной термической обработки крупных валков с использованием градиентного нагрева / Ю. А. Карасюк, В. Г. Сорокин. М. : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1982. 32 с.
3. Адамова Н. А. Универсальная программа расчета остаточных напряжений в цилиндрических телах при термообработке // Остаточные напряжения и методы регулирования. Труды 1 Всесоюзного симпозиума по остаточным напряжениям. М., 1982. С. 31–35.