

Лаптев А.М. – д-р техн. наук, проф., ДГМА

Захарчук С.С. – аспирант, ДГМА

Вейнов А.М. – д-р техн. наук, ОАО «НКМЗ»

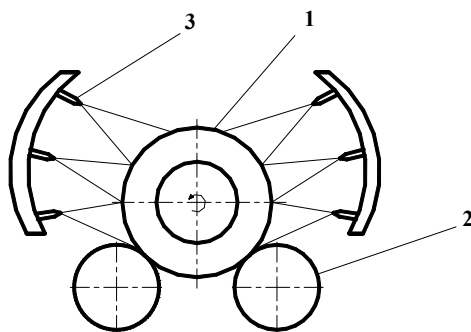
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПРЕЕРНОЙ ЗАКАЛКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Предложена методика конечноэлементного моделирования поля температуры при спреерной закалке крупных прокатных валков. Применение методики проиллюстрировано результатами расчета распределения температуры и анализа структур при закалке валка из стали 70ХЗГНМФ на спреерной установке Новокраматорского машиностроительного завода.

Введение

Технико-экономические показатели прокатных станов во многом зависят от стойкости валков. В свою очередь, стойкость прокатных валков зависит от качества литья,ковки и технологии термической обработки. Ключевой операцией термической обработки валков является высокоскоростная закалка, которая позволяет получить высокую твердость поверхностного слоя при сохранении мягкой сердцевины изделий.

К наиболее эффективным технологиям высокоскоростной закалки валков относится спреерная закалка [1, 2]. Ее суть состоит в подаче на поверхность нагретого валка охладителя посредством специальных душирующих форсунок (рис. 1). В качестве охладителя могут применяться вода, воздух или водовоздушная смесь.



*Рис. 1. Принципиальная схема спреерной установки:
1 – валок; 2 – вращающиеся опоры; 3 – форсунки*

К преимуществам спреерной закалки относятся: возможность достижения высоких скоростей охлаждения, контроль его интенсивности, включая разную интенсивность охлаждения бочки и шеек валков, отсутствие закалочных баков, увеличение твердости поверхности и глубины закаленного слоя, высокая производительность и отсутствие загрязнения окружающей среды.

В процессе спреерной закалки возникают высокие градиенты температур по сечению и длине валка, влияющие на распределение структур и твердости в изделии. Учитывая жесткие требования к эксплуатационным характеристикам прокатных валков, включающие, в первую очередь, высокую износостойкость и твердость контактной поверхности, необходимо правильно определять кинетику изменения температуры в изделии во время охлаждения. Целью работы является разработка метода для определения градиентов температур в теле прокатного валка при его закалке на спреерной установке и прогнозирование получаемых структур.

Методика моделирования

Известно, что экспериментальные методы определения температур в теле валка затруднены из-за сложности и дороговизны проведения экспериментов [3 – 5]. Поэтому для определения поля температур в теле прокатного валка было применено математическое моделирование. При математическом моделировании необходимо решить уравнение теплопроводности, которое для тел с осевой симметрией, к которым относятся и прокатные валки, удобно записать в цилиндрической системе координат:

$$\gamma \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где γ – плотность материала валка, C_p – его удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности.

В качестве одного из граничных условий необходимо учесть интенсивность потери тепла вследствие излучения по закону Стефана-Больцмана:

$$\dot{q}_r = \sigma_s \varepsilon (T_s^4 - T_a^4), \quad (2)$$

где \dot{q}_r – удельный тепловой поток излучения, σ_s – постоянная Стефана-Больцмана, ε – коэффициент излучающей способности, T_s – температура поверхности валка, T_a – температура окружающей среды.

Второе граничное условие определяет интенсивность потери тепла при спреерном охлаждении поверхности валка. Этот процесс мож-

но описать, используя закон конвективного теплообмена в форме:

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_w), \quad (3)$$

где \dot{q}_{conv} – удельный тепловой поток конвекции, h – коэффициент конвективного теплопереноса, T_w – температура охлаждающей среды. Для решения системы уравнений (1)-(3) был использован метод конечных элементов, реализованный в программе ANSYS.

Пример моделирования

В качестве примера моделирования рассмотрим закалку опорного прокатного вала из стали 70ХЗГНМФ с массой 21 тонна на спреерной установке Новокраматорского машиностроительного завода (НКМЗ). Валок имеет бочку длиной 1416 мм и диаметром 1266 мм. Общая длина вала составляет 4270 мм. Зависимости теплофизических характеристик C_p и λ от температуры, а также диаграмма изотермического распада аустенита для стали 70ХЗГНМФ были предоставлены заводской лабораторией НКМЗ. Коэффициент излучающей способности стали был принят равным 0,8 [6]. Коэффициент конвективного теплопереноса определялся методом инверсионного моделирования, который включает в себя замер температуры на поверхности вала с помощью пирометра и последующий подбор коэффициента h в (3) так, чтобы температуры, полученные при замере и в результате моделирования, были близки друг к другу. Из-за плотного облака пара, образующегося в процессе охлаждения на спреерной установке, замеры температуры пирометром были возможны лишь в процессе остывания вала после спреерной закалки (отогрев). Вместе с тем, характер изменения температуры поверхности вала при отогреве полностью определяется условиями предшествующей термообработки и поэтому может служить основой для определения коэффициента конвективного теплопереноса при закалке.

Технология спреерной закалки рассматриваемого вала включает 3 этапа, каждый из которых характеризуется разными условиями охлаждения бочки и шеек вала. На первом этапе охлаждение водовоздушной смесью проводят с максимальной интенсивностью на всех поверхностях вала. Вторым этапом характеризуется отключением подачи охладителя на шейки меньшего диаметра, так как они отличаются наименьшим теплосодержанием. Также в несколько раз снижают давление водовоздушной смеси с целью уменьшения уровня закалочных напряжений, которые могут привести к разрушению вала. На третьем этапе прекращают принудительное охлаждение поверхностей шеек большего диаметра. Оставшееся время охлаждается только бочка вала.

В процессе последующего за закалкой отогрева валка на воздухе пирометром Wahl DHS-28X производили измерения температуры в нескольких характерных точках на поверхности изделия с интервалом времени в 3 минуты. Затем с помощью программы ANSYS проводили инверсионное моделирование температурного поля при закалке и охлаждении, подбирая коэффициент конвективного теплопереноса h на различных этапах закалки. Как показано на рис. 2, в результате было получено хорошее совпадение значений температуры, определенных при замере пирометром после закалки и полученных при инверсионном моделировании. Это означает, что значения коэффициентов конвективного теплопереноса были определены с достаточной точностью.

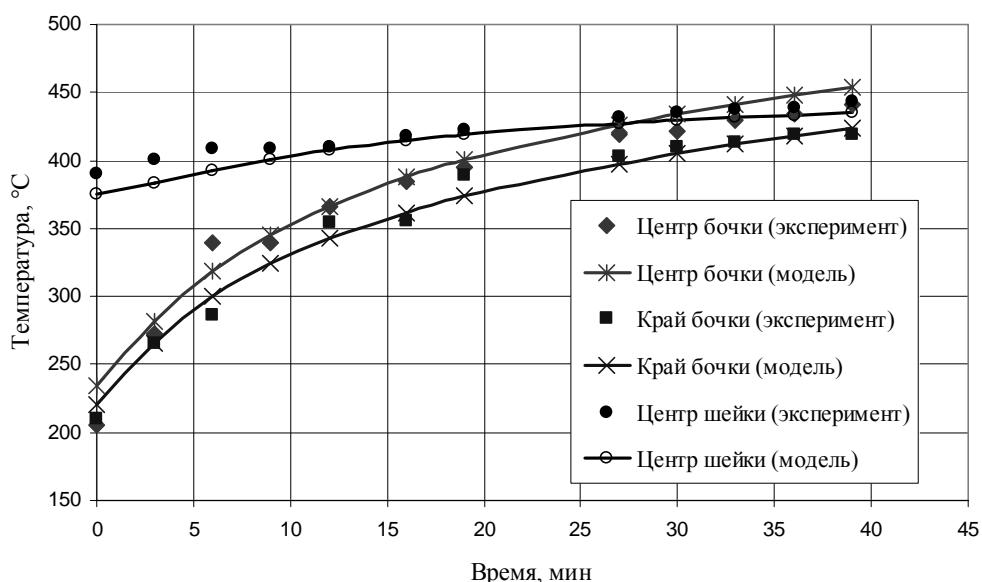
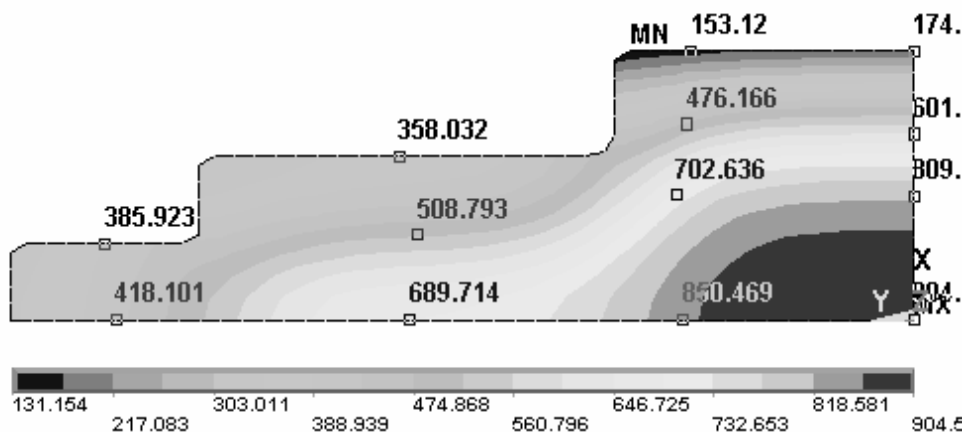
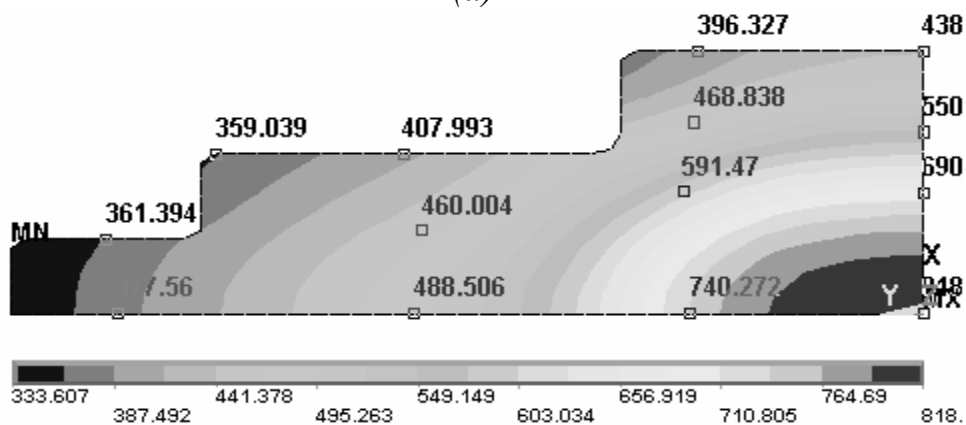


Рис. 2. Сравнение температуры в характерных точках поверхности валка, полученных экспериментально и при инверсионном моделировании отогрева

Найденные величины h при спреерной закалке изменяются в пределах от 400 до 1200 Вт/м²°С на бочке валка и достигают до 2500 Вт/м²°С на шейке в зависимости от интенсивности охлаждения. С использованием этих значений было рассчитано распределение температуры по сечению валка, как на этапе закалки, так и на этапе последующего охлаждения. На рис. 3а показаны расчетные контуры температуры в момент окончания спреерной закалки, а на рис. 3б — после отогрева на воздухе в течение 39 минут для ¼ сечения валка.



(a)



(б)

Рис. 3. Контуры температур для валка из стали 70ХЗГНМФ:
 а) конец закалки; б) отогрев на воздухе в течение 39 минут

Как следует из рис. 3, при закалке в теле валка возникают чрезвычайно высокие градиенты температур. Так, перепад температуры между центральной частью и поверхностью валка может достигать более 700 °С. При отогреве температура постепенно выравнивается по сечению и после 39 мин разница не превышает 450 °С.

Использование результатов моделирования для прогнозирования структур

Наложив кривые изменения температуры в разных точках по сечению бочки валка на изотермическую диаграмму распада аустенита, можно сделать заключение о распределении структур в теле валка (рис. 4). Анализ кривых на рис. 4 показывает, что бейнитное превращение проходит на глубине до 60 мм от поверхности бочки, что соот-

ветствует производственной практике НКМЗ. Излом в точке К связан с изменением интенсивности водовоздушного охлаждения. Излом в точке L отвечает полному отключению принудительного охлаждения и началу отогрева валка на воздухе.

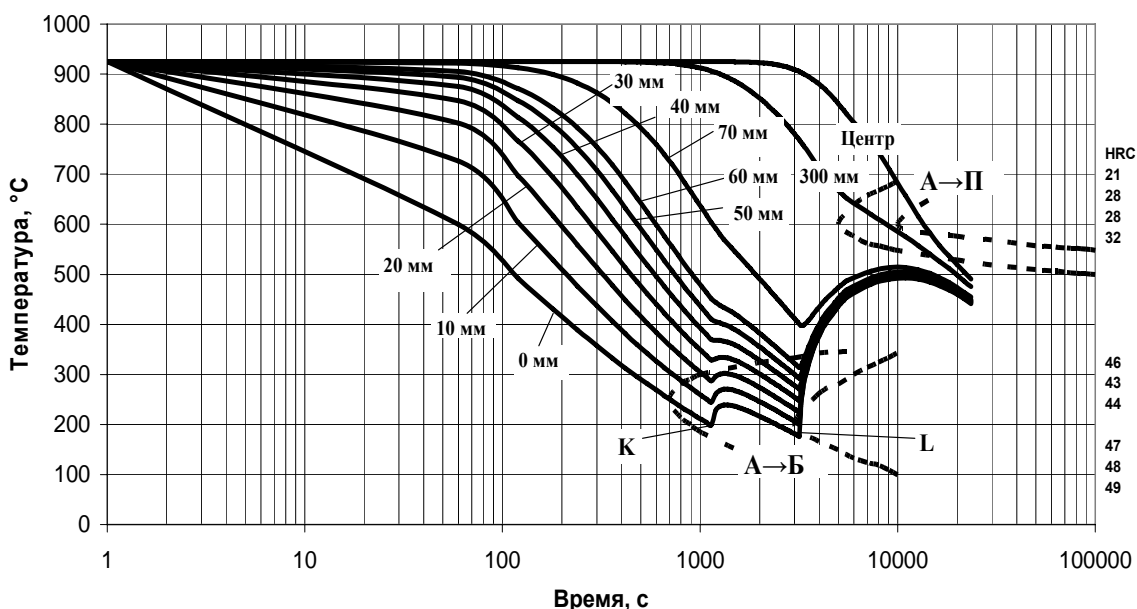


Рис. 4. Кривые изменения температуры для точек, находящихся на разном расстоянии от поверхности бочки валка (цифры у кривых), наложенные на изотермическую диаграмму распада аустенита для стали 70X3ГНМФ

Выводы

Разработана и опробована методика для определения кинетики изменения температуры и прогнозирования структуры при спреерной закалке прокатного валка. Методика может быть использована для оптимизации параметров спреерной закалки прокатных валков, а также при исследовании родственных технологий, таких, как спреерная закалка штампов и охлаждение валков при горячей прокатке.

Список литературы

1. Вороненко Б.И. Составы и термическая обработка современных валковых сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1995. – № 11. - С. 17 – 23.
2. Плескач Б.В., Вейнов А.М. Рациональное проектирование валков прокатных станов // *Прогрессивные технологии и системы маши-*

ностроения. Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2006. - Вып. 31. - С. 237 – 245.

3. Покровский А.М., Лешковцев В.Г., Вейнов А.М., Грушко Ю.А., Плескач Б.В. Математическое моделирование температурно-структурного и напряженного состояния при закалке композитных прокатных валков // Сталь. – 2006. - № 2. – С. 60 – 63.

4. Минков А.Н. Выбор условий охлаждения массивных цилиндрических тел переменного сечения в водовоздушных установках // Вісник ДДМА. Збірник наукових праць. – Краматорск: ДГМА, 2006. - №1(3). – С. 147 – 152.

5. Минков А.Н., Борисов И.А., Шейко В.С., Камалов В.З., Алексеенко В.Т. Выбор условий охлаждения при закалке крупных поковок в охлаждающих установках // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1985. - №6. - С. 50 – 52.

6. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. - М.: Metallurgizdat, 1962. – 568 с.

Рукопись поступила 25.05.2008 г.