

УДК 621.78.085. 6.065.6

**Минков А. Н.**

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Процесс охлаждения крупных заготовок имеет специфические особенности. Известно, что охлаждение изделий представляет собой сложный комплекс явлений, обусловленных передачей тепла с поверхности в окружающую среду и изнутри тела на его поверхность. Вследствие этого различают внутренний и внешний теплообмены по отношению к поверхности изделия.

Внешний теплообмен зависит от охлаждающей способности закалочной жидкости и условий теплообмена на поверхности, которые определяются процессами, протекающими при контакте охлаждающей среды с нагретым изделием. В настоящее время охлаждение крупногабаритных деталей осуществляется либо в водовоздушных установках, либо погружением в баки с закалочной жидкостью, в качестве которой чаще всего используется вода или масло.

При погружении изделия в закалочную среду вокруг него образуется пленка перегретого пара, через которую осуществляется отвод тепла. Этот период характеризуется относительно небольшой интенсивностью охлаждения и называется стадией пленочного кипения. Когда температура поверхности достигает некоторого значения, определяемого составом и свойствами охлаждающей жидкости, паровая рубашка разрывается и жидкость начинает кипеть по поверхности изделия. Этот период сопровождается значительным повышением интенсивности охлаждения и называется стадией пузырькового кипения. После снижения температуры металла ниже температуры кипения охлаждающей жидкости наступает стадия конвективного теплообмена, которая характеризуется наименьшей интенсивностью охлаждения. В настоящее время общепринятой является схема смены основных процессов теплообмена, согласно которой пленочный, пузырьковый и конвективный режимы теплообмена последовательно сменяют друг друга по всей поверхности металла.

Для термического упрочнения крупногабаритных опорных валков и роторов для тепловых и атомных электростанций все большее распространение получают водовоздушные охладительные установки [1–3], в которых в качестве охладителей используются водяной душ, водовоздушные смеси и ускоренный воздушный поток. Душевое охлаждение, как и охлаждение в воде, носит трехстадийный характер. Последовательно наблюдаются стадии ускоренного, замедленного и затем вновь ускоренного охлаждения. Однако, интенсивность теплоотвода при охлаждении водяным душем на всех стадиях в несколько раз больше, чем при охлаждении погружением в воду. Под напором струй паровая рубашка разрушается и пузырьковое кипение наступает раньше. Кроме того, за счет притока жидкости увеличивается интенсивность охлаждения при конвективном теплообмене.

Внутренний теплообмен определяется температурным градиентом между поверхностью и центром изделия, а также теплофизическими свойствами металла. Интенсивность охлаждения центральных зон будет зависеть от теплопроводности металла. При охлаждении крупногабаритных изделий внутренний теплообмен приобретает существенное значение, поскольку недостаточная теплопроводность металла ограничивает максимально достигаемые скорости охлаждения центральных зон при непрерывном увеличении коэффициента теплоотдачи на поверхности.

При охлаждении водяным душем или водовоздушной смесью коэффициент теплоотдачи определяется, главным образом, удельным расходом распыленной воды и, следовательно, после достижения максимально возможных скоростей охлаждения центральных зон

дальнейшее увеличение расхода распыленной воды приводит к непроизводительным её затратам. В водовоздушных установках распыление и подача воды на охлаждаемое изделие осуществляется мощными насосными установками, длительность работы которых определяет экономичность эксплуатации подобных установок. Поэтому все возможные мероприятия, позволяющие снизить расход распыленной воды, используемой в процессе охлаждения обрабатываемых деталей, без снижения качества проводимой термической обработки будут способствовать повышению рентабельности установок.

Целью настоящей работы является получение исходных данных для разработки экономически целесообразных режимов охлаждения при закалке крупногабаритных деталей.

Для выбора оптимальных условий охлаждения проведено исследование температурного состояния крупных заготовок диаметром 600–1800 мм при охлаждении с различной интенсивностью теплообмена на поверхности, характеризуемой коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ . При проведении расчетов значение коэффициентов теплоотдачи принимали постоянным в течение всего процесса охлаждения, поскольку подавляющая часть его длительности проходит в условиях конвективного теплообмена и более высокие значения коэффициентов теплоотдачи на стадиях пленочного и пузырькового кипения не оказывают существенного влияния на кинетику охлаждения центральных зон.

На рис. 1 показаны расчетные кривые охлаждения для поверхностных и центральных зон заготовки диаметром 800 мм в процессе закалки с различной интенсивностью охлаждения, определяемой коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ . Кривые охлаждения № 1 получены при охлаждении с  $\alpha = 1000000$  Вт/м<sup>2</sup>·К, кривые охлаждения № 2 – с  $\alpha = 3000$  Вт/м<sup>2</sup>·К, кривые охлаждения № 3 – с  $\alpha = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>·К, кривые охлаждения № 4 –  $\alpha = 500$  Вт/м<sup>2</sup>·К, кривые охлаждения № 5 – с  $\alpha = 350$  Вт/м<sup>2</sup>·К, кривые охлаждения № 6 – с  $\alpha = 250$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

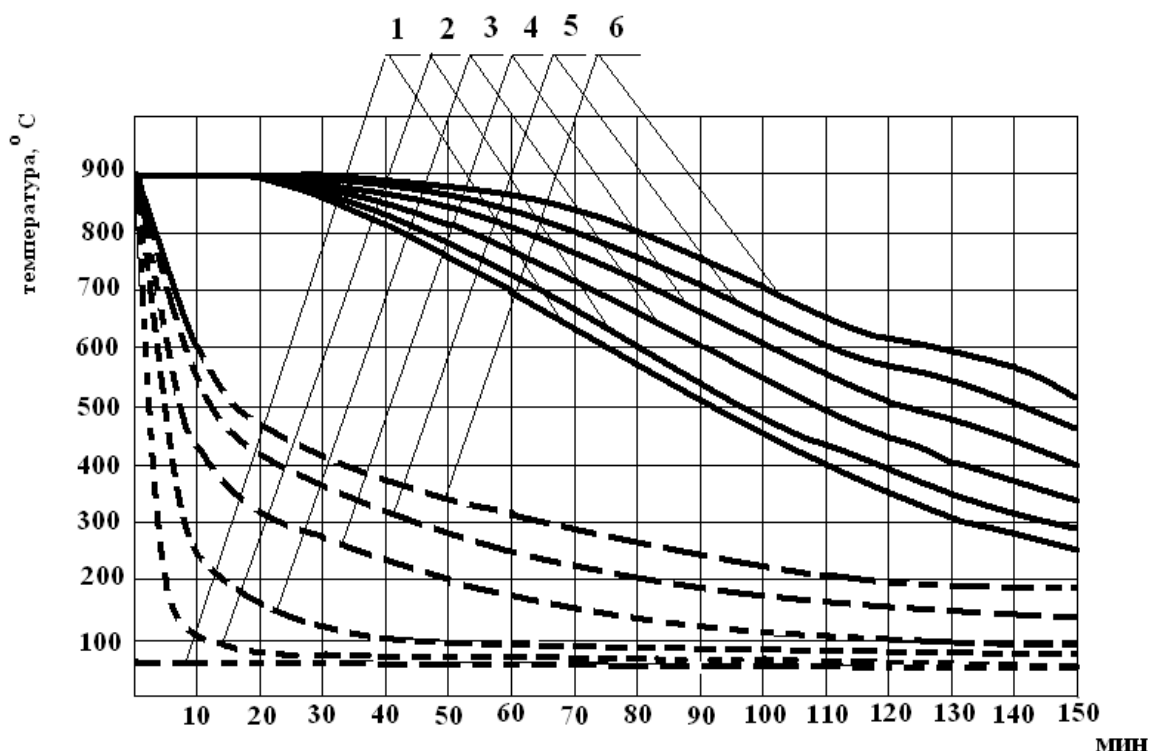


Рис. 1. Расчетные кривые охлаждения поверхностных (---) и центральных (—) зон заготовки диаметром 800 мм в зависимости от интенсивности теплообмена на поверхности

Выбранный диапазон значений коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  соответствует возможной интенсивности теплообмена на поверхности заготовки при охлаждении распыленной водой с различным удельным расходом. В работе [5] регистрировали температурное состояние

заготовки диаметром 800 мм при охлаждении распыленной водой с различным удельным расходом и на основании экспериментальных данных производили расчетное определение значений интегрального коэффициента теплоотдачи. Установлено, что в зависимости от удельного количества распыленной воды интенсивность теплообмена изменяется от 250 до 3000 Вт/м<sup>2</sup>·К, а скорость охлаждения центра при этом повышается от 80 до 300 °С/час.

Необходимо отметить, что при увеличении значения коэффициента теплоотдачи более 3000 Вт/м<sup>2</sup>·К скорость охлаждения центра заготовки остается практически постоянной. Доказательством тому служат результаты расчетного определения температурного состояния центра заготовки диаметром 800 мм при увеличении интенсивности теплообмена от  $\alpha = 3000$  Вт/м<sup>2</sup>·К до  $\alpha = 1000000$  Вт/м<sup>2</sup>·К (рис. 1). Можно убедиться, что такая интенсификация теплообмена практически не увеличивает скорость охлаждения центральной зоны заготовки диаметром 800 мм. Это обусловлено спецификой охлаждения крупных изделий, заключающейся в том, что из-за недостаточной теплопроводности металла скорость охлаждения центральных зон практически не изменяется при увеличении интенсивности теплообмена на поверхности.

На основании полученных данных и с использованием основных принципов подобия, изложенных в работе [4], были определены скорости охлаждения поверхностных и центральных зон заготовок диаметром от 600 до 1800 мм и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Скорости охлаждения поверхностных и центральных зон заготовок различного диаметра в зависимости от интенсивности теплообмена на поверхности ( $\alpha$ )

Диаметр изделия, мм	Зона изделия	Скорости охлаждения (°С/час) для различных значений $\alpha$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)				
		$\alpha = 3000$	$\alpha = 1000$	$\alpha = 500$	$\alpha = 350$	$\alpha = 250$
600	поверхность	18 690	8070	4 450	2 670	1 780
	центр	640	570	510	460	390
700	поверхность	13 755	5895	3 275	1 145	1 310
	центр	470	420	370	340	285
800	поверхность	10 500	4500	2 500	1 500	1 000
	центр	360	320	285	260	220
900	поверхность	8 295	3555	1 975	1 185	790
	центр	284	250	225	205	170
1000	поверхность	6 720	2880	1 600	960	640
	центр	230	205	180	165	140
1200	поверхность	4 670	1980	1 100	660	440
	центр	160	140	125	115	95
1400	поверхность	3 465	1485	825	495	330
	центр	120	105	95	85	70
1600	поверхность	2 625	1125	625	375	250
	центр	90	80	70	65	55
1800	поверхность	2 080	890	495	300	200
	центр	70	60	55	50	40

Результаты проведенного анализа температурного состояния заготовок диаметром от 600 до 1800 мм позволяют сделать вывод о том, что в зависимости от диаметра заготовки существуют предельно достигаемые скорости охлаждения центральных зон при максимально

возможной в практике термической обработки интенсивности охлаждения поверхности. На рис. 2 показана зависимость максимально достигаемой скорости охлаждения центра заготовок диаметром от 600 до 1800 мм.

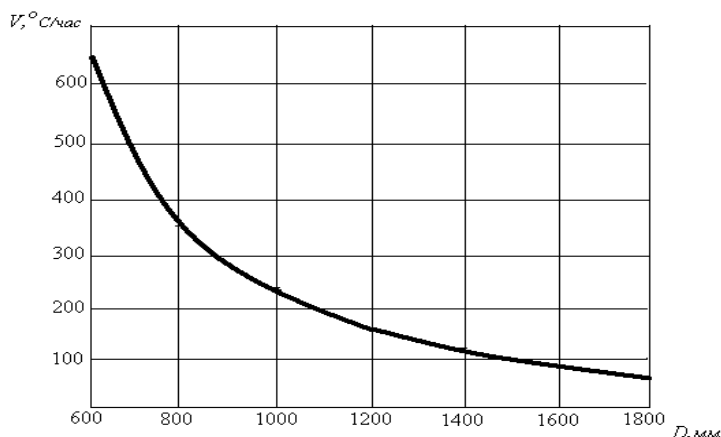


Рис. 2. Зависимость максимально достигаемых скоростей охлаждения центра от диаметра заготовок

Данные, приведенные в табл. 1 позволяют определить границы применимости различных марок сталей для производства определенной номенклатуры изделий. Например, для роторных заготовок необходимым условием является получение бейнитных структур по всему сечению детали. Для широко применяемой при изготовлении цельнокованых роторов для тепловых турбин АЭС стали 25ХНЗМФА критическая скорость охлаждения для обеспечения сквозной бейнитной прокаливаемости составляет 50 °C/час. Поэтому, исходя из полученных данных, можно лимитировать использование этой стали для производства роторов диаметром не более 1600–1800 мм.

## ВЫВОДЫ

Проведено расчетное определение температурного состояния крупных заготовок диаметром 600–1800 мм при охлаждении с различной интенсивностью теплообмена на поверхности. Определены предельные скорости охлаждения крупных заготовок диаметром от 600 до 1800 мм. На основании проведенных исследований получены исходные данные для разработки экономически целесообразных режимов охлаждения крупных заготовок в водовоздушных установках.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов И. А. К вопросу о закалке валков из глубоко прокаливающихся сталей / И. А. Борисов, Л. М. Левитан // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2010. – № 4. – С. 9–17.
2. Лешковцев В. Г. Применение сталей повышенной прокаливаемости для изготовления крупногабаритных прокатных валков / В. Г. Лешковцев, А. М. Покровский // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2007. – № 11. – С. 40–43.
3. Минков А. Н. Выбор условий охлаждения массивных цилиндрических тел переменного сечения в водовоздушных установках / А. Н. Минков // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць.* – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1 (3). – С. 147–152.
4. Астафьев А. А. Термическая обработка крупных поковок / А. А. Астафьев // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1973. – № 9. – С. 2–5.
5. Минков А. Н. Исследование процесса закалки массивных прокатных валков в водо-воздушных установках / А. Н. Минков // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць.* – Краматорськ : ДДМА, 2005. – № 1. – С. 110–114.

Статья поступила в редакцию 16.11.2011 г.