

ру сплава АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – вып. 36, ч. 1. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2006. – С. 201-209.

6. Влияние микролегирования Sr и Sc на фазовый состав и свойства АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова,

М.Ю. Амбражей // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 41, ч. 1. – Днепропетровск: ПГАСА, 2007. – С. 18-30.

Поступила 18.01.2013

УДК 621.78.085. 6.065.6

Минков А.Н. /к.т.н./

Донбасская ГМА

Наука

Закалка крупногабаритных деталей с регламентированной интенсивностью охлаждения

На основании данных, характеризующих влияние скорости охлаждения с температуры нагрева под закалку на фазовые превращения и механические свойства стали 25ХНЗМФА, разработана технология закалки крупных роторов с регламентированной интенсивностью охлаждения в зависимости от диаметра изделия, позволяющая снизить расход распыляемой воды и повысить рентабельность водо-воздушных установок. Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: закалка, водовоздушные охладительные установки, регламентированная интенсивность охлаждения, фазовые превращения, роторы турбин электростанций

On the basis of information, characterizing influence of cooling speed from the temperature of heating under tempering 25ХНЗМФА became on phase transformations and mechanical properties, technology of tempering of large rotors is developed with the regulated intensity of cooling depending on the diameter of good, allowing reducing the expense of the nebulized water and promoting profitability of water-air plants.

Keywords: tempering, water-air cool plants, regulated intensity of cooling, phase transformations, rotors of turbines of power-stations

Наиболее ответственной операцией в технологическом цикле термической обработки крупногабаритных деталей является их объемная закалка. Охлаждение крупногабаритных деталей характеризуется возникновением значительных температурных перепадов по их сечению. В частности, при охлаждении вала диаметром 800 мм, разница температур между поверхностью и центром достигает 750 °С [1]. С увеличением размеров изделия температурная неоднородность в процессе охлаждения будет возрастать, и, соответственно, уровень возникающих напряжений повышаться. Это может быть причиной образования значительных деформаций, трещин и разрушения дорогостоящих деталей.

С целью снижения температурных перепадов в настоящее время опробованы различные варианты комбинированной закалки массивных деталей с последовательным использованием различных закалочных сред. Наиболее распространен технологический процесс закалки, предусматривающий первоначальное охлаждение в воде с последующим переносом в масляный бак. К недостаткам такой технологии можно отнести ограниченные возможности по регулированию скоростей охлаждения, а также необходимость использования двух закалочных баков, что снижает производительность термического оборудо-

вания.

Более производительным является технологический процесс регламентированной закалки в воде крупных деталей, который предусматривает прерывание охлаждения в момент формирования структур в поверхностных слоях изделия и последующее остывание на воздухе. При этом в центральных зонах изделия будет продолжаться охлаждение, а в поверхностных слоях за счет внутреннего тепла начнется самоотпуск. Поскольку опасные напряжения, вызывающие разрушения, возникают позже, чем формирование структуры в поверхностных слоях, то при правильно выбранной длительности охлаждения в воде и на воздухе можно получить низкий уровень остаточных напряжений, не вызывающий возникновения трещин. В ПАО «НКМЗ» применяется закалка с регламентированным временем охлаждения в воде бандажей составных опорных валков диаметром до 2100 мм из сталей 9ХФ и 60ХСМФ. При этом время охлаждения в воде для бандажей разных типоразмеров было выбрано таким, чтобы при дальнейшем охлаждении на воздухе температура при отогреве поверхности бандажа не превышала температуру отпуска для предотвращения разупрочнения закаленного слоя. Остаточные напряжения после регламентированной закалки в воде в среднем в 1,5-1,6 раза ниже

по сравнению с закалкой через воду в масло, что снижает вероятность разрушения бандажей в процессе хранения и эксплуатации [2].

Еще большие возможности для оптимизации условий охлаждения открывает использование водо-воздушных установок, особенностью которых является возможность применения в процессе закалки охладителей с различной охлаждающей способностью, а именно, водяного душа, водовоздушных смесей и воздушного потока. Охлаждающая способность водяного душа зависит от количества распыленной воды, подаваемой на охлаждаемую поверхность, размера и скорости водяных капель. Интенсивность охлаждения водо-воздушной смесью определяется как соотношением воды и воздуха, так и их давлением на выходе из распылительных устройств. Скорость охлаждения при использовании воздушного потока зависит от давления воздуха на выходе из распылительных устройств.

Для проведения закалки крупногабаритных деталей в водо-воздушных установках разработаны различные варианты охлаждения, целью которых является снижение возникающих напряжений при обеспечении необходимого комплекса механических свойств. В частности, была разработана и реализована технология закалки роторных заготовок из стали 25Х2НМФА, которая предусматривает первоначальное спрейерное охлаждение с удельным расходом воды от 3,6 до 18 м³/м²·ч и последующий обдув компрессорным воздухом при давлении 0,01–0,4 МПа. Переход от первоначального интенсивного охлаждения водяным душем к замедленному охлаждению воздушным потоком осуществляется после прохождения центром заготовки перлитного интервала. Для определения эффективности разработанной технологии были определены расчетным путем температурное состояние и возникающие напряжения в процессе охлаждения с температуры 850 °С ротора диаметром 800 мм. Установлено, что водо-воздушное охлаждение при одинаковых скоростях охлаждения центра заготовки обеспечивает более низкий уровень остаточных напряжений по сравнению с комбинированным охлаждением через воду в масло [3].

В работе [4] предложен способ закалки стальных изделий диаметром 180-800 мм по сечению. Для достижения высокой твердости на поверхности стальных изделий при получении требуемых структуры и свойств предлагается проводить регулируемое охлаждение с температуры аустенитизации водо-воздушной смесью с плотностью орошения в пределах 0,5-2,0 л/м²·с до температуры поверхности изделия (M_н+20) °С - M_н, затем с плотностью орошения 0,1-0,5 л/м²·с до температуры поверхности изделия M_к (70-100) °С.

Проведение режимов регулируемого охлаждения в водо-воздушных установках сопровождается значительным расходом воды. Например, для охлаждения прокатного валка с диаметром бочки до 1600 мм в процессе закалки необходимо осуществить подачу распыленной воды объемом до 70 и более тонн. В

водо-воздушных установках подача воды на охлаждаемое изделие осуществляется мощными насосами путем её забора из водосборника, поскольку все промышленные установки имеют замкнутый цикл водоснабжения. Длительность работы насосов определяет экономичность эксплуатации водо-воздушных установок и поэтому все мероприятия, позволяющие снизить расход распыленной воды без снижения качества проводимой термической обработки, будут способствовать повышению рентабельности установок.

Необходимо отметить, что широкие возможности по регулированию интенсивности охлаждения позволяют осуществлять закалку крупногабаритных изделий в водо-воздушных установках с минимально необходимой интенсивностью теплообмена, достаточной для получения требуемых структур и механических свойств. При этом дальнейшее повышение интенсивности охлаждения будет сопровождаться увеличением расхода распыленной воды и, соответственно, более длительной работой насосов без существенного улучшения механических свойств закаливаемых изделий.

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

В качестве объекта для исследований были выбраны роторы из стали 25ХНЗМФА для тепловых и атомных электростанций.

На рисунке приведена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 25ХНЗМФА. Химический состав стали, %: 0,25 С; 0,25 Si; 0,6 Mn; 1,0 С₂; 3,2 Ni; 0,08 V; 0,3 Mo; 0,010 S; 0,010 P. Температура аустенитизации стали составляла 870–890 °С.

Установлено, что в интервале скоростей охлаждения от 8800 до 50 °С/ч распад аустенита идет в области бейнитного превращения. При скоростях охлаждения менее 50 °С/ч dilatометрическим методом фиксируется наличие распада аустенита в перлитной области. За критическую скорость охлаждения, позволяющую избежать распада аустенита в перлитной области, принята скорость 100 °С/ч.

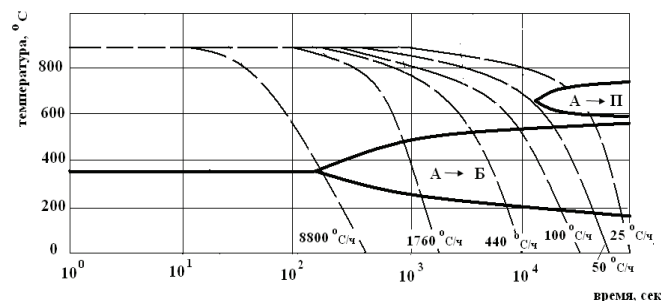


Рис. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 25ХНЗМФА

Определение влияния условий термической обработки на механические свойства стали 25ХНЗМФА проводили на металле лабораторной плавки. Выплавку стали осуществляли в дуговой электропечи емкостью 500 кг с разливкой в пятидесятикилограммовые

Таблица 1. Механические свойства стали 25ХНЗМФА в зависимости от скорости охлаждения с температурой аустенитизации

Скорость охлаждения, °С/с	Механические свойства*						
	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	KCV, МДж/м ²	K _{IC} , МПа·м ^{1/2}	T ₅₀ , °С
3600	890	740	17	62	1,4	200	-50
1800	900	735	17	62	1,1	196	-46
900	890	735	17	61	1,0	195	-38
600	880	735	17	60	0,9	194	-36
400	870	730	17	60	0,9	192	-34
200	870	730	17	60	0,9	192	-33
100	865	725	17	60	0,8	185	-30
50	850	715	16	60	0,7	178	-26
25	850	700	16	59	0,5	166	-10

*Механические свойства определены после закалки и высоко-температурного отпуска

слитки, которые затем проковывали на заготовки размером 190x200x85 мм. Отжиг заготовок проводили по режиму: аустенитизация при 870 °С в течение 4 ч, охлаждение в печи до 100-180 °С, отпуск при 640-660 °С в течение 8 ч, охлаждение с печью. Окончательная термическая обработка заготовок состояла из аустенитизации при 860-880 °С с 2 часовой выдержкой и последующего охлаждения с заданными скоростями, после чего проводили отпуск при 640 °С в течение 12 ч с последующим охлаждением вместе с печью.

Полученные результаты (табл. 1) показывают, что уровень механических свойств стали 25ХНЗМФА при уменьшении скорости охлаждения от 900 до 100 °С/ч снижается незначительно и объясняется это тем, что изменение скоростей охлаждения в этом диапазоне не вызывает существенного изменения структуры. С учетом возможных ликвационных явлений скорость охлаждения при проведении закалки в производственных условиях должна быть не ниже 150 °С/ч. Следовательно, для снижения температурных перепадов между поверхностными и центральными зонами необходимо проводить закалочное охлаждение с такой минимально необходимой интенсивностью, которая бы обеспечивала скорость охлаждения центральной зоны ротора более 150 °С/ч.

В [5] получены результаты расчетного определения скоростей охлаждения поверхностных и центральных зон заготовок диаметром от 800 до 1800 мм при различной интенсивности охлаждения, определяемой коэффициентом теплоотдачи α (табл. 2).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что охлаждение со скоростями выше 150 °С/ч возможно лишь для центральных зон роторов диаметром не более

1200 мм. Повышение интенсивности охлаждения ($\alpha > 3000$ Вт/м²·К) не приводит к увеличению скорости охлаждения центральных зон изделий из-за недостаточной теплопроводности металла.

На основании представленных данных (табл. 2) можно определить необходимую интенсивность охлаждения роторов различного диаметра для достижения скорости охлаждения центра выше 150 °С/ч. В частности, для заготовок диаметром 800 мм такая скорость достигается при интенсивности теплообмена с α более 150 Вт/м²·К, для 1000 – более 250 Вт/м²·К, для 1200 – более 1000 Вт/м²·К.

В [1] получены данные, характеризующие зависимость коэффициента теплоотдачи от удельного расхода воды, поступающей на охлаждаемую поверхность (табл. 3). Определяющими факторами, влияющими на расход распыленной воды, являлись: давление воды на входе распылительных форсунок; расстояние от форсунок до охлаждае-

Таблица 2. Скорости охлаждения поверхностных и центральных зон заготовок различного диаметра в зависимости от интенсивности охлаждения

Диаметр изделия, мм	Зона изделия	Скорости охлаждения (°С/ч) для различных значений α , (Вт/м ² ·К)					
		3000	1000	500	350	250	120
800	поверхность	10500	4500	2500	1500	1000	420
	центр	360	320	285	260	220	105
900	поверхность	8295	3555	1975	1185	790	310
	центр	284	250	225	205	170	95
1000	поверхность	6720	2880	1600	960	640	280
	центр	230	205	180	165	140	85
1200	поверхность	4670	1980	1100	660	440	230
	центр	160	140	125	115	95	70
1400	поверхность	3465	1485	825	495	330	205
	центр	120	105	95	85	70	55
1600	поверхность	2625	1125	625	375	250	190
	центр	90	80	70	65	55	40
1800	поверхность	2080	890	495	300	200	170
	центр	70	60	55	50	40	30

Таблица 3. Коэффициент теплоотдачи α для различных значений удельного расхода распыленной воды

Удельный расход распыленной воды, м ³ /м ² ·ч	Давление воды на входе форсунок, МПа	Расстояние между форсунками и поверхностью детали, мм	Количество рядов форсунок	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·К
20,6	0,4	200	6	>3000
14,2	0,1	200	6	2050-2150
9,4	0,4	300	6	1350-1450
7,5	0,2	300	6	1050-1150
5,1	0,1	300	6	800-850
2,5	0,4	600	3	400-430
1,5	0,1	600	3	250-300

мой поверхности; количество рядов распылительных форсунок, действующих при охлаждении. Распыление воды осуществлялось центробежными форсунками, конструкция которых и оборудование для их испытания приведены в [6].

Представленные в табл. 3 данные позволяют определить технологические параметры закалки с регламентированной интенсивностью охлаждения. В частности, скорость охлаждения центральных зон ротора диаметром 1000 мм выше 150 °С/ч достигается при охлаждении распыленной водой с удельным расходом 1,5 м³/м²·ч, который обеспечивается при трех действующих рядах форсунок, давлении воды на входе форсунок 0,1 МПа и расстоянии между поверхностью ротора и форсунками, равном 600 мм.

Разработанный режим охлаждения позволяет сократить расход распыленной воды более чем в 4 раза и снизить энергозатраты при работе насосных установок. При этом обеспечивается получение бейнитных структур по всему сечению ротора с высокими служебными свойствами и снижение температурных перепадов.

Вывод

Получены исходные данные для разработки технологии закалки роторов из стали 25ХНЗМФА с регламентированной интенсивностью охлаждения.

Библиографический список

1. Минков А.Н. Исследование процесса закалки массивных прокатных валков в водо-воздушных установках // Вестник Донбасской ГМА. - 2005. - № 1. - С. 110-114.
2. Адамова Н.А. Регламентированная закалка в воде крупных стальных изделий // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1991. - № 4. - С. 29-30.
3. Минков А.Н., Лошкарев В.Е. Перспективная технология закалки массивных изделий // Вестник машиностроения. - 1990. - № 5. - С. 57-59.
4. Пат. 2178004 РФ МПК7 С 21 D 1/56. Способ термообработки крупногабаритных цилиндрических изделий / Закиров Р.А., Корытько Н.Г., Воробьев Н.И. и др. - № 2001108764/02; заявл. 03.04.2001; опубл. 10.01.2002, Бюл. № 1.
5. Минков А.Н. Особенности процесса охлаждения крупногабаритных деталей // Вестник Донбасской ГМА. - 2011. - № 4 (25). - С. 111-114.
6. Закалочное оборудование для водовоздушно-регулируемого охлаждения массивных цилиндрических деталей с вертикальной осью вращения / Минков А.Н., Минков К.А. // Металлург. и горноруд. пром-сть. - 2012. - № 5. - С. 79-81.

Поступила 08.02.2013

Требования к статьям, направляемым в редакцию

Уважаемые авторы! Для ускорения подготовки очередных номеров журнала редакция обращается с просьбой ко всем авторам передавать статьи в электронном виде на носителях в виде CD-R или CD-RW матриц, либо на флешке. Возможна также передача материалов в редакцию по электронной почте. Отправка в редакцию статей в электронном виде не исключает необходимости предоставления сопроводительного письма от организации и подписанного авторами одного экземпляра статьи.

В редакцию следует предоставлять статью, отпечатанную четкими черными буквами на **белой бумаге** формата А4 (210x297 мм) в двух экземплярах, объемом не более 6-8 стр. При компьютерном наборе статей желательна распечатка на лазерном или струйном принтере в нормальном (не экономичном) режиме (для первого экземпляра). Количество иллюстраций (рисунков) должно быть не более 4-х (как исключение - до 6). Статья должна начинаться с указания *индекса УДК*. К статье необходимо приложить **аннотацию, рефераты на русском и английском языках** объемом до 0,5 страницы, **перечень ключевых слов, сопроводительное письмо от организации, сведения об авторах** (указать фамилию, имя и отчество, ученое звание, степень, занимаемая должность, место работы, номер служебного телефона и адрес электронной почты каждого автора (при наличии) и указать, **кому** из авторов поручено вести переписку). Перед отправкой в редакцию статья должна быть **тщательно вычитана и подписана всеми авторами**. Статьи в рукописном виде, а также содержащие многочисленные исправления в тексте, **не принимаются**.

• **Компьютерный набор** статей следует осуществлять в текстовом редакторе MS Word (формат файлов *.doc или *.rtf), без переносов, шрифтом Times New Roman. Размер символов - 14 пт. Допускается включение в текст статьи рисунков, выполненных средствами MS Office, при этом элементы одного рисунка следует группировать. Вставка в текст сканированных и других изображений (например, с цифровой фотокамеры) не рекомендуется. Такие изображения желательно предоставлять в виде отдельных файлов (предпочтительны форматы *.tif или *.jpg с разрешением 300 dpi, ч/б фото).

• **Формулы** из MathCad и т.п. программ в тексте не допускаются. *Убедительная просьба к авторам не разбивать текст статьи на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это только усложняет их обработку!*

• **Таблицы** следует пронумеровать и дать им заголовки. Единицы физических величин должны быть указаны в соответствии с Международной системой единиц (СИ). При компьютерном наборе рекомендуемый размер символов в таблицах 8...9 пт (для очень емких таблиц - до 6 пт). Наличие в тексте таблиц, границы которых выходят за поля страницы нежелательно.

• **В библиографическом списке** необходимо привести фамилии и инициалы авторов, точное название книги и сборника, сведения о повторности издания, место издания, издательство (или издающую организацию), год издания и общее число страниц. В тексте статьи при ссылке на книгу желательно указать конкретную страницу, материал которой был использован. Для статей из журналов и сборников следует указать фамилии и инициалы первых трех авторов, название статьи, название издания (чьи труды, если это сборник), год выхода, номер и страницы, на которых напечатана статья. Иностранные источники описываются на языке оригинала.

Редакция оставляет за собой право отправлять статьи авторам на доработку в следующих случаях:

- статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции без подписей авторов (см. выше);
- статья требует доработки в соответствии с замечаниями редактора раздела;
- к статье не прилагается разрешение на публикацию от организации, в которой работают авторы.

Требования и пожелания к рекламным и т.п. материалам, публикация которых оплачивается, а также «экстренные» публикации согласовываются непосредственно в редакции с ответственным секретарем журнала