

УДК 621.785

Д.А. Рябов¹, А.А. Хлыбов¹, К.А. Минков²**О ПЕРСПЕКТИВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ
ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОТОВЫХ ШТАМПОВ**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева¹,
ПАО «Русполимет»²

Представлены результаты анализа водо-воздушного метода охлаждения молотовых штампов при термической обработке. Показана необходимость применения контролируемой охлаждающей среды с целью получения однородных структурных составляющих штамповых сталей по всему объему изделий, а также уменьшения остаточных напряжений и деформаций, образовавшихся из-за температурных градиентов при охлаждении.

Ключевые слова: водо-воздушное охлаждение, термическая обработка, молотовые штампы, 5ХНМ.

Тенденция развития современного машиностроительного комплекса связана с поиском путей оптимизации и совершенствования технологических процессов, направленных на экономическую минимизацию затрат при повышении качества выпускаемой продукции. Промышленное производство штампового инструмента не стало исключением. Штампы для горячей объемной штамповки (т.е. деформирующие металл в горячем состоянии при ударном нагружении) работают в тяжелых условиях многократного воздействия высоких нагрузок и температур. Основные причины выхода из строя штампового инструмента: пластическая деформация, хрупкое разрушение, растрескивание и износ рабочей поверхности, образование разгарных трещин. При выборе материалов необходимо учитывать, что штамповые стали должны отличаться высокими физико-механическими свойствами, сочетая прочность с ударной вязкостью, износостойкостью, прокаливаемостью, теплостойкостью, теплопроводностью. Кроме того, они должны обладать высокой разгаростойкостью, т.е. способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования сетки трещин (сетки разгара) и сохранять эти свойства при повышенных температурах [1]. Достижение указанных свойств – повышение качества штампов, снижение производственных затрат, решение задач экологии – возможно созданием новых технологий и технических решений является актуальной задачей.

К числу наиболее распространенных сталей, используемых для изготовления штампов, относятся теплостойкие легированные инструментальные стали марок 5ХНМ и 4Х5МФС. Эти стали должны удовлетворять следующим характеристикам: твердость HRC 40...45, KCU = 30...45 Дж/см², что достигается получением структуры тросто-сорбита, упрочненной карбидами с карбидной неоднородностью не более 4 балла по шкале 5 ГОСТ 801 [5; 6].

Для достижения требуемых свойств выполняется закалка с последующим отпуском [2-5]. Наиболее сложная задача – выбор охлаждающих сред при закалке, так как при охлаждении штампов требуется создание температурных полей, отличающихся для разных температурных диапазонов и для различных частей штампов.

На рис. 1 показано изменение коэффициента теплообмена для некоторых наиболее распространенных охлаждающих сред в различных температурных диапазонах.

При охлаждении в воде из-за ее кипением на горячей поверхности интенсивность охлаждения изменяется с понижением температуры поверхности изделий. Процесс охлаждения характеризуется наличием нескольких периодов (стадий): пленочное кипение, пузырьковое кипение, конвективный теплообмен. Для высоких температур, когда требуется более высокая скорость охлаждения штампов, образуется тонкая газовая пленка, препятствующая теплообмену, и скорость охлаждения изделий невелика. Высокая охлаждающая способность в интервале температур мартенситного превращения характеризуется большой вероятностью

возникновения трещин и деформаций, что ограничивает применение воды в качестве охлаждающей среды при закалке штампов.

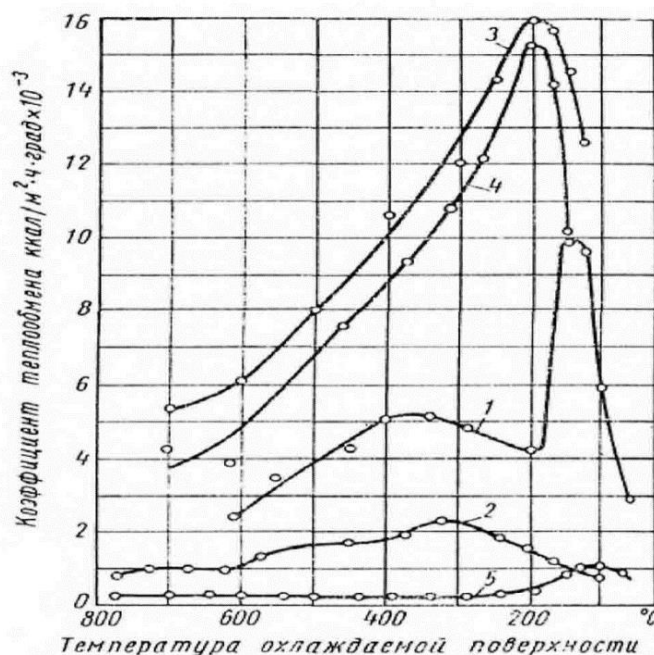


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплообмена от температуры охлаждаемой поверхности:

- 1 – вода 15°C ; 2 – масло 20°C ; 3 – спрейерное охлаждение, $P_{\text{вод}} = 1,0$ ат,
 $Q = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$; 4 – водо-воздушное охлаждение, $P_{\text{вод}} = 2,5$ ат, $P_{\text{возд}} = 1,5$ ат;
 5 – водо-воздушное охлаждение, $P_{\text{вод}} = 0,5$ ат, $P_{\text{возд}} = 4$ ат

При закалке штампов в качестве охлаждающей среды обычно используется масло. Несмотря на широкое применение традиционных термических операций, закалка в масло имеет значительные недостатки: недостаточная охлаждающая способность в интервале температур перлитного превращения, высокая стоимость, пожароопасность, загазованность помещений и т.д. Закалка в масле не позволяет получить высокую твердость и прокаливаемость для штампов массой более 1 т [2].

В процессе работы масло окисляется, густеет и его охлаждающая способность снижается. При повышении вязкости более 40 % от первоначального значения масло следует заменить свежим. Требуется регулярно контролировать вязкость масла и наличие смол. Кроме того, после закалки в масле требуется промывка. Этот метод трудоемкий и дорогой, наносит вред экологии. А возникающие в объеме изделия при охлаждении в масле значительные температурные и структурные градиенты приводят к появлению остаточных напряжений и деформаций.

Попытки заменить масло привели к разработке весьма большого числа новых закалочных сред, представляющих водные растворы различных веществ с регулируемой в широком диапазоне охлаждающей способностью.

Решение задачи поиска новых технологий и конструкторских исполнений, необходимых для устранения проблем при изготовлении штампов, было предложено Д. В. Будриным и В. М. Кондратовым еще в 60-х годах прошлого столетия [7]. Особенность предложенной технологии заключается в использовании в качестве закалочной среды водо-воздушной смеси, позволяющей осуществлять контролируемое охлаждение на разных температурных этапах термического процесса.

Применение систем водо-воздушного охлаждения дает следующие преимущества:

- получать уровень свойств в стальных изделиях существенно выше, чем при охлаждении в ранее используемых охладителях, за счет регулируемого охлаждения в опреде-

ленных температурно-временных условиях, минимизируя остаточные и временные напряжения;

- устранять вероятность трещинообразования и коробления;
- решать все экологические проблемы;
- получать более значительную экономическую эффективность в результате уменьшения капитальных и эксплуатационных затрат;
- снижать существенно себестоимость термообработки [8].

Конструкция и параметры устройства водо-воздушного охлаждения позволяют осуществить обработку по стандартной технологии закалки с отпуском с интенсивностью охлаждения как в существующих закалочных средах (масло, вода), так и реализовать новые, высокоэффективные технологии, такие как:

- закалка на режимах дифференцированного охлаждения. Такая технология обеспечивает существенно более высокий уровень механических и служебных характеристик;
- закалка с самоотпуском (охлаждение деталей прерывается при температуре самоотпуска). При такой технологии исключается из технологической цепочки необходимость проведения достаточно энерго- и финансовозатратной операции отпуска деталей после закалки. Это существенное снижение себестоимости при сохранении высокого качества деталей. При проведении закалки с самоотпуском на режимах дифференцированного охлаждения также будет иметь место и более высокий по сравнению с существующими технологиями уровень механических свойств [9].

Пример конструктивной реализации процесса управляемого охлаждения приведен на рис. 2. Для подачи смесей на охлаждаемую поверхность используют форсунки высокого и низкого давления. Такое охлаждение по своей закаливающей способности близко к охлаждению в масле, но в ряде случаев удобнее, например, для закалки изделий из легированных сталей при индукционном нагреве, когда охлаждение погружением в ванну в большинстве случаев невозможно. При водо-воздушном охлаждении поверхность изделия омывается водяной пылью, что исключает перегрев жидкости и образование паровой рубашки.

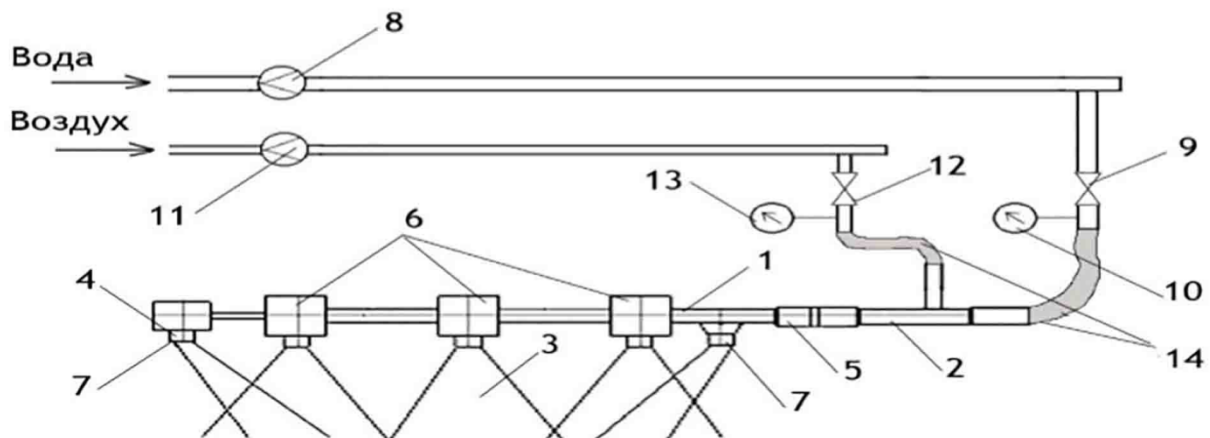


Рис. 2. Схема установки водовоздушного охлаждения:

- 1 – корпус; 2 – смеситель; 3 – водо-воздушный факел; 4 – форсунка; 5 – соединитель для изменения длины и/или вставки диффузора разных диаметров; 6 – форсунки с центральной выдачей; 7 – форсунки с боковой выдачей; 8 – расходомер для воды; 9 – вентиль для воды; 10 – манометр для воды; 11 – диафрагма для воздуха; 12 – вентиль для воздуха; 13 – манометр для воздуха; 14 – гибкие подводы

Такая установка позволяет проводить объемную закалку при различных параметрах времени закалки и состава смеси. Получение необходимой в требуемый момент скорости охлаждения основано на варьировании водо-воздушным качеством охлаждающей струи, а также её направлением [10-13]. Меняя соотношение вода-воздух, можно осуществлять в этих

установках режим охлаждения с интенсивностью, более высокой, чем в водяном баке, а если необходимо, менее интенсивной, чем в масле (рис. 3) [9].

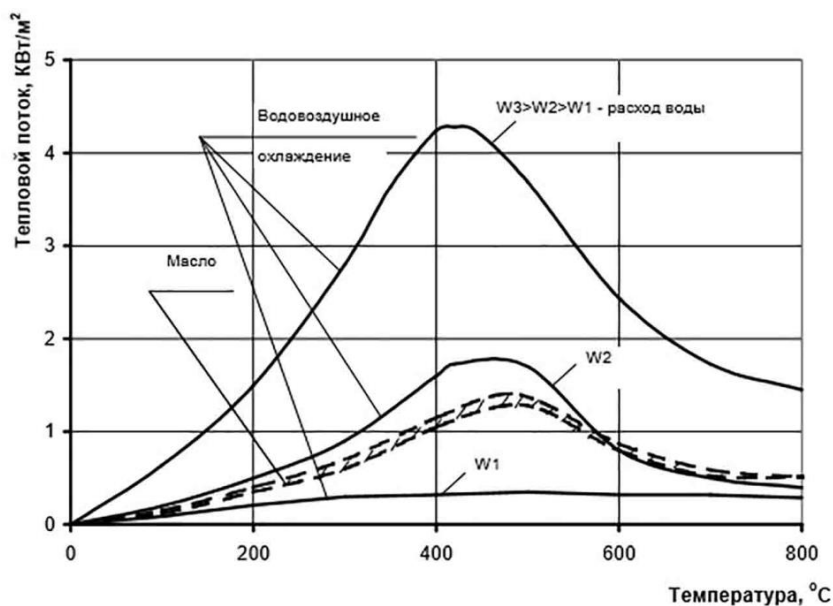


Рис. 3. Охлаждающая способность систем водовоздушного охлаждения

Охлаждающая способность водо-воздушной смеси зависит от соотношения давления воды и воздуха, в зависимости от которого для определенной конструкции форсунки могут быть два состава предельных смесей. Первый состав: расход воды такой, при котором давление воздуха не распыляет воду до частиц размером меньше критической величины. В этом случае частицы воды не успевают полностью испариться, отвод пара затруднен и охлаждающая способность смеси снижается. Второй состав: расход воды незначителен, и давление воздуха настолько увеличивает кинетическую энергию частиц воды, что приводит, как указано в работе [14], к сокращению времени контакта частиц воды с раскаленной поверхностью, поэтому охлаждающая способность водо-воздушной смеси также снижается. Таким образом, правильным подбором соотношения давления воды и воздуха можно обеспечить рациональный расход воды.

Пленочное кипение при водо-воздушном охлаждении отчетливо не наблюдается, коэффициент теплообмена возрастает плавно до максимума, который соответствует пузырьковому кипению. Отсутствие пленочного кипения, по-видимому, можно объяснить тем, что частицы водо-воздушной смеси сильно диспергированы и при соприкосновении с нагретой поверхностью мгновенно испаряются, причем устойчивая паровая пленка не успевает образоваться в связи с большой скоростью отвода пара. На рис. 3, б видно, что уменьшение давления воды влияет на охлаждающую способность водо-воздушной смеси так же, как и увеличение давления воздуха. Максимум коэффициента соответствует кипению при 300–170°C. С уменьшением коэффициента (разные соотношения $P_{\text{вод}}$ и $P_{\text{возд}}$) кривые на рис. 4 располагаются при более низких температурах.

Влияние расстояния от форсунки до охлаждаемой поверхности на поверхность активного охлаждения подробно рассматривается в работе [7]. Выбор оптимального расстояния зависит от конструкции форсунки и соотношения расхода воды и воздуха.

Технология водо-воздушного охлаждения нашла широкое применение при изготовлении штампов. Поскольку крупногабаритные молотовые штампы обладают большой массой и, следовательно, теплоемкостью, возможно импульсное охлаждение детали водо-воздушная смесь подается периодически. При этом поверхностный слой детали охлаждается с требуемой скоростью до температуры конца закалки, затем за счет внутренней теплоты происходит самоотпуск.

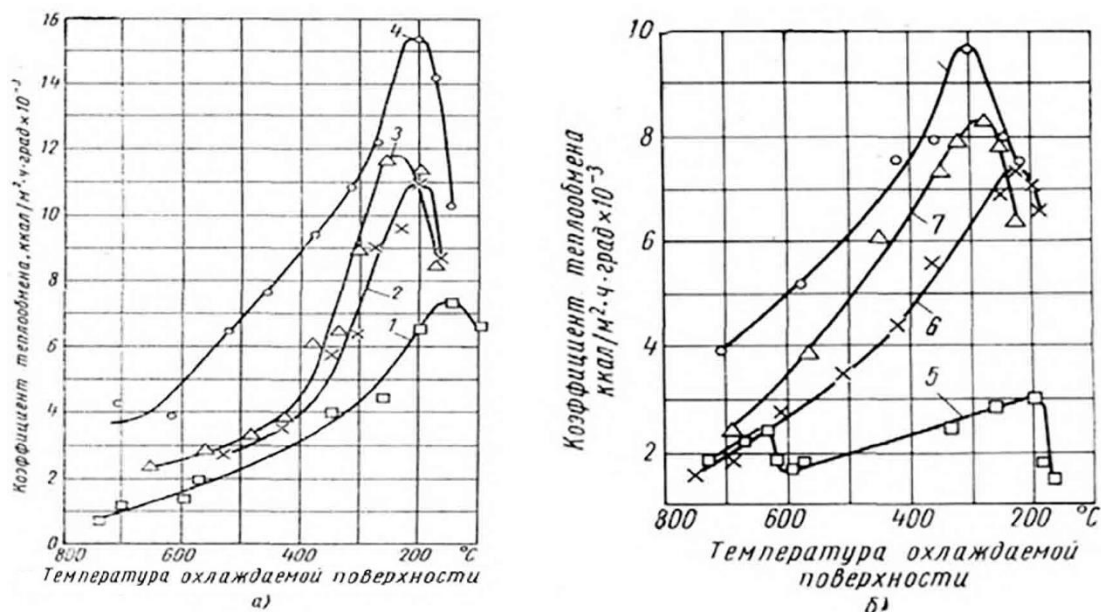


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплообмена от температуры охлаждаемой поверхности:

$a - P_{\text{вод}} = \text{const} = 2,5 \text{ ат}; b - P_{\text{возд}} = \text{const} = 2,0 \text{ ат}; 1 - P_{\text{возд}} = 4,0 \text{ ат};$
 $2 - P_{\text{возд}} = 3 \text{ ат}; 3 - P_{\text{возд}} = 2 \text{ ат}; 4 - P_{\text{возд}} = 1,5 \text{ ат}; 5 - P_{\text{вод}} = 0,2 \text{ ат}; 6 - P_{\text{вод}} = 0,5 \text{ ат};$
 $7 - P_{\text{вод}} = 1,0 \text{ ат}; 8 - P_{\text{вод}} = 2 \text{ ат}$

По сравнению с вариантом объемной закалки данный принцип позволяет исключить отпуск штампа, что дает возможность уменьшить время проведения технологического процесса практически вдвое. Это экономит расход энергии на каждом штампе. Еще одним положительным эффектом является отсутствие расхода минерального масла в процессе закалки (экономия сырой нефти составляет 0,25 т на одну закалку штампа массой 1,5 т). Дополнительный экономический эффект – полная пожаробезопасность технологического процесса с использованием водо-воздушной смеси.

Закалка в водо-воздушной смеси позволяет обеспечить требуемые прокаливаемость и твердость крупногабаритных штампов [3].

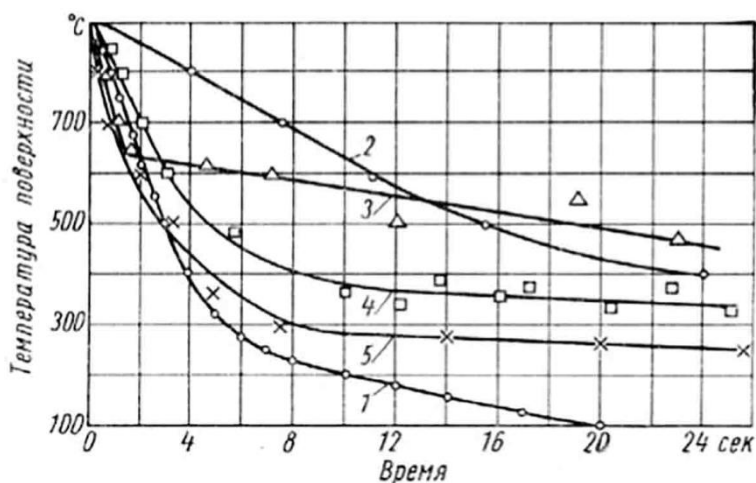


Рис. 5. Кривые охлаждения поверхности стали 5XNM в воде, масле и водо-воздушной смеси различного состава:

$1 - \text{вода } 20^\circ\text{C}; 2 - \text{масло } 20^\circ\text{C}; 3 - P_{\text{вод}} = 2 \text{ ат},$
 $P_{\text{возд}} = 2 \text{ ат до } 600^\circ\text{C и } P_{\text{возд}} = 4 \text{ ат ниже } 600^\circ\text{C}; 4 - P_{\text{вод}} = 2 \text{ ат}, P_{\text{возд}} = 2 \text{ ат до } 400^\circ\text{C и}$
 $P_{\text{возд}} = 4 \text{ ат ниже } 400^\circ\text{C}; 5 - P_{\text{вод}} = 2 \text{ ат}, P_{\text{возд}} = 2 \text{ ат до } 300^\circ\text{C и } P_{\text{возд}} = 4 \text{ ат ниже } 300^\circ\text{C}$

Штампы охлаждают водо-воздушной смесью до потемнения поверхности (400–500°C), а затем охлаждение проводят только под воздействием сжатого воздуха до 300°C, и после этого сразу подогревают для создания необходимых условий отпуска.

Авторами [7] были получены кривые водо-воздушного охлаждения поверхности штамповой стали 5ХНМ в зависимости от разного соотношения воды и воздуха (рис. 5).

При водо-воздушном охлаждении штамповой стали на начальном этапе охлаждения, когда нужно миновать зону наименьшей устойчивости аустенита, скорости охлаждения близки к скоростям охлаждения в воде. При 600, 400 и 300°C за счет повышения давления воздуха от 2 до 4 ат скорость охлаждения резко уменьшается и становится равной скорости охлаждения в масле.

С применением описанного способа закалки крупных молотовых штампов из стали 5ХНМ размером 1400x710x500 мм [11] было получено оптимальное распределение структурных составляющих по сечению (на поверхности штампа 75 % мартенсита и 25 % бейнита, в сердцевине 10 % бейнита и 90% сорбита), что привело как к повышению сопротивления поверхности штампа пластической деформации, так и увеличению демпфирующей способности сердцевины. Рассмотренный технологический процесс состоит из следующих операций: загрузка при температуре 450 °С (время выдержки 2,5 ч), подогрев до температуры 650-700 °С (4-5 ч), нагрев до температуры 860 °С в течение 8-10 ч. Закалка осуществляется с помощью водо-воздушной смеси на специальной установке по ранее введенной программе в течение 20-60 мин. Выравнивание (осреднение) температуры производится в два перехода: после извлечения детали из установки ее устанавливают в теплоизолирующий кожух-экран или печь, имеющую температуру окружающей среды, и выдерживают в течение 1,5-3,0 ч; далее деталь выдерживается 15-20 ч на спокойном воздухе (без сквозняков).

Так, образцы из штамповых сталей, термообработанные с помощью водо-воздушной смеси, имели ту же структуру, что и закаленные в минеральном масле, но процесс водо-воздушного охлаждения более экологичен и не требует значительных расходов на восстановление охлаждающей среды, что характерно для закалки в масле.

Изложенное позволяет сделать вывод о возможности применения водо-воздушных смесей при термической обработке штампов из сталей 5ХНМ и 4Х5МФС. Режим охлаждения (состав смеси, скорость подачи, прерывность или непрерывность) должен подбираться для каждого типоразмера после проведения соответствующих исследований и анализа номенклатуры штампов.

Срок окупаемости [11] технологического процесса, использующего водо-воздушное охлаждение, 1,5-2,0 г. (зависит от напряженности производственной программы).

В настоящее время водо-воздушная технология термической обработки крупных поковок успешно реализована на предприятиях России (ОАО «Челябинский металлургический комбинат» [12]) и Республики Беларусь (МЗ СИиТО). Срок службы штампов при изготовлении поковок в кузнечном цехе Минского завода увеличился в 2–6 раз по сравнению с упрочненными традиционной закалкой в минеральном масле. Одновременно стоимость затрат на термообработку снизилась в 1,5–2 раза.

На данный момент проводятся исследования и изготовление установок водо-воздушного охлаждения на других металлургических предприятиях

Выводы

1. Применение водо-воздушного охлаждения для закалки крупногабаритных изделий из инструментальной стали позволяет получить следующие преимущества в сравнении с традиционной термической обработкой (закалка в масле и отпуск):

◇ *Технические:*

- достигается стабильная оптимальная структура изделия различного сортамента и химического состава при минимальных термических напряжениях и отсутствии трещин, что позволяет повысить уровень механических и служебных характеристик изделий;

- реализуется возможность внедрения новых, эффективных и экономичных технологий;
- обеспечивается получение деталей после закалки со светлой поверхностью.

◇ *Экологические:*

- вода (как охладитель) экологически чиста;

◇ *Экономические:* при встройке установки в существующую линию:

- исключение из технологической цепочки закалочного бака и моечной машины;
- исключения расходов на приобретение, подготовку масла и моечных смесей;
- при реализации технологии закалки с самоотпуском за счет исключения из технологической цепочки отпускной печи;
- уменьшения производственных площадей, занимаемых оборудованием, до двух раз.

2. Правильный выбор конструкции форсунки, расстояния до охлаждаемой поверхности и качества водо-воздушной смеси позволяет достичь требуемых физико-механических свойств по всей толщине закаленного слоя.

3. Установка для закалки крупногабаритных штампов водо-воздушной смесью позволяет получать штампы нужной прокаливаемости и стойкости, улучшать экологическую обстановку в термическом цехе.

4. Охлаждающую способность водо-воздушной смеси обычно регулируют степенью увлажнения (расходом воды), но также возможно изменение давления воздуха или расстояния охлаждаемой поверхности от распылителя.

5. Водо-воздушная установка позволяет изменять охлаждающую способность смеси на любом этапе технологического процесса.

Библиографический список

1. Штампы для горячего деформирования металлов / под ред. М. А. Тылкина. – М.: Высш. шк., 1977. – 496 с.
2. **Башнин, Ю. А.** Технология термической обработки / Ю. А. Башнин, Б. К. Ушаков, А. Г. Секей. – М.: Metallurgia, 1986.
3. **Геллер, Ю. А.** Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М.: Metallurgia, 1975. – 584 с.
4. Инструментальные стали: справочник / Л. А. Позняк [и др.]. – М.: Metallurgia, 1977. – 420 с.
5. **Перебоева, А. А.** / А. А. Перебоева, Г. П. Усынина, Н. В. Окладникова [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 3. – С. 41–44.
6. **Богданова, Т. А.** Разработка технологии получения поковок из инструментальных сталей для прессовых матриц / Т. А. Богданова [и др.] // Вестник СибГАУ. – 2008. – Вып. 2 (19). – С. 156–159.
7. **Будрин, Д.В.** Водо-воздушное охлаждение при закалке / Д.В. Будрин, В. М. Кондратов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – №6. – С. 22–25.
8. **Ярошенко, Ю. Г.** Разработка режимных параметров водо-водовоздушного охлаждения при закалке / Ю. Г. Ярошенко [и др.] // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. V Всерос. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2016) (Екатеринбург, 12–13 мая 2016 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – С. 137–142.
9. **Липунов, Ю.И.** Регулируемое охлаждение – как один из способов повышения прочностных характеристик стального проката и изделий из него // Металлургическая теплотехника как основа энерго- и ресурсосбережения в металлургии: сб. докл. сотрудников ОАО ВНИИМТ. – Екатеринбург, 2010. – 415 с.
10. **Борисов, И. А.** Разработка технологии спреерной закалки опорных валков прокатных станов / И. А. Борисов, А. И. Борисов // МиТОМ. – 1997. – №8. – С. 2–4.
11. **Борисов, И. А.** Охлаждение крупных поковок в водно-воздушной смеси / И. А. Борисов, Л. Ф. Галанд // МиТОМ. – 1988. – № 10. – С. 17–22.
12. **Пышминцев, И. Ю.** Закалка крупных поковок в водно-воздушной смеси / И. Ю. Пышминцев [и др.] // МиТОМ. – 2003. – № 3. – С. 24–28.

13. **Захаров, В. Б.** Выбор водовоздушных сред для закалки крупных поковок / В. Б. Захаров [и др.] // Сталь. – 2003. – №3. – С. 60–62.
14. **Майсурадзе, М. В.** Характеристики водокапельных форсунок центробежно-струйного типа, используемых для закалки сталей / М. В. Майсурадзе, Ю. В. Юдин // Изв. вузов. Черная Металлургия. – 2008. – № 8. – С. 45–48.

*Дата поступления
в редакцию 25.12.2017*

D.A. Ryabov¹, A.A. Khlybov¹, K.A. Minkov²,

**ON THE PERSPECTIVE OF APPLICATION OF WATER-AIR MIXTURE
FOR COOLING HAMMER STAMPS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev¹,
PJSC «Ruspolymet»²

The results of an analysis of the water-air method for cooling the hammer stamps during heat treatment are presented. The necessity of using a controlled cooling medium for the purpose of obtaining homogeneous structural components of stamping steels throughout the whole volume of articles is shown, as well as the reduction of residual stresses and deformations formed as a result of temperature gradients during cooling.

Key words: water-air cooling, heat treatment, hammer stamps, 5XHM.