

УДК 621.785.5:621.774.2

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.

ЧМЕЛЕВА В. С.<sup>2\*</sup>, к.т.н., доц.

ИВЧЕНКО А. В.<sup>3\*</sup>, к.т.н., с.н.с.

КОНДРАТЕНКО П. В.<sup>4\*</sup>, асп.

<sup>1</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>2\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>3\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

**Аннотация.** *Цель.* Трубы нефтяного сортамента – одни из наиболее востребованных изделий этого типа в связи с их ролью в добыче нефти и освоения этой добычи во все более сложных природных условиях. Поэтому все более актуальной становится проблема обеспечения необходимых свойств таких труб, гарантирующих их эксплуатационную надежность и долговечность без увеличения или даже снижения стоимости их упрочнения. Решение этой проблемы требует постоянного совершенствования технологий упрочнения в определенных направлениях. Доступная информация не содержит системных подходов к решению рассматриваемой проблемы. В связи с указанными выше обстоятельствами выполнено настоящее аналитическое исследование по определению наиболее перспективных направлений развития технологий термического упрочнения труб и предложены необходимые технические решения, обеспечивающие развитие по этим направлениям. *Методика.* Основана на системном анализе соответствующего массива информации с использованием общих закономерностей развития технических систем и прогрессивных технических решений. *Результаты.* Определены три основных перспективных направления развития технологий термического упрочнения труб и необходимые для этого новые или известные, но до сих пор не используемые в этих технологиях технические решения по способам термического упрочнения, устройствам для нагрева и охлаждения и, что в настоящее время особенно важно, по системам оперативного контроля и управления параметрами технологического процесса. *Научная новизна.* Заключается как в комплексном системном решении поставленной проблемы, так и в соответствующей новизне ряда предлагаемых технических решений для операций нагрева и закалочного охлаждения, а также для операций оперативного контроля и управления интенсивностью охлаждения. *Практическая значимость.* Результаты исследования вполне могут быть актуальными и востребованы предприятиями по производству труб нефтяного сортамента.

**Ключевые слова:** обсадные трубы; закалка; отпуск; устройства для охлаждения; оперативный контроль интенсивностью охлаждения

## ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОГО ЗМЦНЕННЯ ТРУБ НАФТОВОГО СОРТАМЕНТУ

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.

ЧМЕЛЬОВА В. С.<sup>2\*</sup>, к.т.н., доц.

ИВЧЕНКО А. В.<sup>3\*</sup>, к.т.н., с.н.с.

КОНДРАТЕНКО П. В.<sup>4\*</sup>, асп.

<sup>1</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>2\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>3\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

**Анотація. Мета.** Труби нафтового сортаменту - одні з найбільш затребуваних виробів цього типу у зв'язку з їх роллю у видобутку нафти і освоєння цієї видобутку у все більш складних природних умовах. Тому все більш актуальною стає проблема забезпечення необхідних властивостей таких труб, що гарантують їх експлуатаційну надійність і довговічність без збільшення або навіть зниження вартості їх зміцнення. Вирішення цієї проблеми вимагає постійного вдосконалення технологій зміцнення в певних напрямках. Доступна інформація не містить системних підходів до вирішення даної проблеми. У зв'язку з зазначеними вище обставинами виконано даний аналітичне дослідження щодо визначення найбільш перспективних напрямків розвитку технологій термічного зміцнення труб та запропоновано необхідні технічні рішення, що забезпечують розвиток за цими напрямками. **Методика.** Заснована на системному аналізі відповідного масиву інформації з використанням загальних закономірностей розвитку технічних систем і прогресивних технічних рішень. **Результати.** Визначено три основних перспективних напрямки розвитку технологій термічного зміцнення труб і необхідні для цього нові або відомі, але досі не використовувані в цих технологіях технічні рішення по способам термічного зміцнення, пристроїв для нагрівання і охолодження і, що в даний час особливо важливо, по системам оперативного контролю та управління параметрами технологічного процесу. **Наукова новизна.** Полягає як у комплексному системному вирішенні поставленої проблеми, так і у відповідній новизні ряду пропонуваніх технічних рішень для операції нагріву і гартувального охолодження, а також для операцій оперативного контролю та управління інтенсивністю охолодження. **Практична значимість.** Результати дослідження цілком можуть бути актуальними і затребуваними підприємствами з виробництва труб нафтового сортаменту.

**Ключові слова:** обсадні труби; гартування; відпуск; пристрої для охолодження; оперативний контроль інтенсивністю охолодження

## PERSPECTIVE DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES OF THERMAL WORK-HARDENING OF PIPES OF PETROLEUM ASSORTMENT

GUL Y. P.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Associate professor*

CHMELEVA V. S.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Associate professor*

IVCHENKO A. V.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Research Officer*

KONDRATENKO P. V.<sup>4\*</sup>, *Graduate student*

<sup>1</sup>Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>2\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>3\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

**Abstract. Purpose.** Pipes of petroleum assortment - one of the most highly sought wares of this type in connection with their role in the booty of oil and mastering of this booty in all more difficult environmental conditions. Therefore the problem of providing of necessary properties of such pipes guaranteeing their operating reliability and longevity without an increase or even decline of cost of their work-hardening becomes more actual. The decision of this problem requires permanent perfection of technologies of work-hardening in certain directions. Accessible information does not contain approaches of the systems to the decision of the examined problem. In connection with the circumstances indicated higher the real analytical research is executed on determination of the most perspective directions of development of technologies of the thermal work-hardening of pipes and necessary technical solutions are offered, providing development on these directions. **Methodology.** Based on the analysis of the systems of corresponding array of information with the use of general conformities to law of development of the technical systems and progressivetechnical decisions. **Findings.** Three basic perspective directions of development of technologies of the thermal work-hardening of pipes are certain and necessary for this purpose new or known, but until now not used in these technologies technical decisions on the methods of the thermal work-hardening, to the devices for heating and cooling and, that presently is especially important, on the operative checking and management systems by the parameters of technological process. **Originality.** Consists both in the complex system decision of the put problem and in the corresponding novelty of row of the offered technical solutions for the operations of heating and tempering cooling, and also for the operations of operative control and management by cooling intensity. **Practical value.** Research results fully can be actual and highly sought by companies on the production of pipes of petroleum assortment.

**Keywords:** casing; hardening; negative hardening; devices for cooling; operative control by cooling intensity

### Постановка задачи

Основные варианты технологий термического упрочнения (ТТУ) труб нефтяного сортамента (бурильных, обсадных и др.) были разработаны и в определенной степени усовершенствованы во второй половине прошлого века. Анализ современной информации по рассматриваемой проблеме показывает, что таковая по-прежнему остается актуальной [1-9]. В то же время основное внимание уделяется сравнительно частным вопросам режимов термического упрочнения труб, но практически отсутствует системный подход к проблеме. При этом к концу указанного века, да практически и в настоящее время, основным вариантом ТТУ является технология, основанная на следующих принципах:

1. Обычная полная закалка на мартенсит осуществляется обычно с отдельного нагрева с последующим высоким отпускком (500-600 °С) и получением конечного структурного состояния (СС) – сорбита отпуска (канонической структуры термического улучшения стали).

2. Использование для нагрева обычно печного оборудования и реже – установок индукционного нагрева.

3. Использование устройств для охлаждения спрейерного типа со сравнительно небольшой – по отношению к потенциалу нестационарных охлаждающих сред – интенсивностью охлаждения и отсутствием возможности его регулирования в процессе охлаждения изделия.

4. Ограниченный контроль технологических параметров как внешнего воздействия, так и самого изделия в процессе нагрева и охлаждения.

Целью данного сообщения является определение на основе анализа имеющейся информации как общих перспективных целей развития ТТУ, так и способов их осуществления для заявленного объекта ТТУ.

### Основные направления развития технологий термического упрочнения

Указанные направления, с одной стороны, являются общими как основанные на общих законах развития технических систем (ТС), а с другой – требуют конкретизации для заявленного объекта, и их можно сформулировать следующим образом:

1. Повышение качества функционирования данной ТС, в данном случае повышения качества термически упрочненных труб: комплекса механических свойств, уменьшение дисперсии их в пределах партии и данного класса прочности, повышение стабильности геометрии труб.

2. Уменьшение затрат на функционирование данной ТС одновременно с получением результатов ее функционирования по п.1: уменьшение расхода энергии и других ресурсов на единицу массы труб или на единицу полезного свойства, снижение трудозатрат оператора ТС.

3. Повышение экологичности функционирования данной ТС: уменьшение или устранения локальных и общих загрязнений атмосферы, воды, почвы.

### Технические решения для реализации направлений совершенствования ТТУ труб

Согласно общей методике аналитического исследования конкретная ТС подлежит декомпозиции на основные структурные элементы (СЭ) с установлением существующих и потенциально возможных связей между ними. На основе анализа структуры уже самих СЭ как технологических операций (ТО) на различных уровнях и характера связей между ними определяются возможные технические решения (ТР) для оптимизации функционирования данной ТС с целью достижения трех основных результатов совершенствования ТС, расшифрованных выше.

### Способы термического упрочнения

В случае реализации ТТУ с отдельного нагрева новые ТР направлены как на преобразование режимов нагрева под закалку, так и режимов последующего закалочного охлаждения и заключительного отпуска.

1. ТТУ с использованием режима закалки на мартенсит (ТО<sub>1</sub>) с последующим высоким отпускком (ТО<sub>2</sub>)

Возможные новые ТР по ТО<sub>1</sub>. Операция нагрева для осуществления аустенизации: скоростной нагрев в низкочастотном индукторе с перегревом над т. А<sub>3</sub> на 100-150 °С для получения большого количества зародышей аустенита (А), затем быстрое охлаждение до температур на 30-50 °С выше А<sub>3</sub> и выдержка до окончания аустенизации; эффект – обеспечение закалки на мартенсит мелкозернистого А и соответствующее увеличение дисперсности мартенситной структуры даже при обычном режиме закалки. Охлаждение после аустенизации может осуществляться по нескольким вариантам:

а) непрерывное охлаждение со скоростью не менее критической ( $V_{кр}^{зак}$ ) с учетом увеличения  $V_{кр}^{зак}$  для мелкозернистого аустенита;

б) стадийное охлаждение с различными  $V_{охл}$  на различных стадиях: градиентная закалка (ГЗ), обеспечивающая термический наклеп аустенита до температуры т. М<sub>н</sub>, с последующим обычным охлаждением в интервале М<sub>н</sub>-М<sub>к</sub> [10]; обычное для закалки охлаждение до т. М<sub>н</sub> с более интенсивным охлаждением в интервале М<sub>н</sub>-М<sub>к</sub> – закалка по Н. Кобаско – КЗ [11]; комбинация ГЗ+КЗ с повышенной  $V_{охл}$  на стадии ГЗ, что дает дополнительный эффект за счет вакансионной закалки А (ГКВЗ) перед мартенситным превращением [10, 12]; и, наконец, известный вариант стадийного охлаждения: охлаждение до т. М<sub>н</sub> со скоростью согласно п. а), а в интервале М<sub>н</sub> - М<sub>к</sub> – менее интенсивное охлаждение.

Все рассмотренные варианты охлаждения в сочетании с указанным режимом нагрева приводят к диспергированию структуры мартенсита на различных уровнях и в различной степени, а все новые режимы охлаждения – к уменьшению коробления и опасности трещинообразования, несмотря на большую интенсивность закалочного охлаждения. Использование ГЗ, КЗ и ГКВЗ приводят к получению СС, подобных таковым при высокотемпературной и низкотемпературной термомеханической обработке стали.

Получаемое СС стали после описанных новых режимах нагрева и охлаждения позволяет снизить температуру отпуска до интервала 400-500 °С. Сам отпуск целесообразно осуществлять со скоростью нагревом в устройствах индукционного нагрева с последующей выдержкой в активных термостатах.

Описанные режимы ТТУ с отдельного нагрева дают основания полагать получение повышенного комплекса свойств по сочетанию повышенного сопротивления пластической деформации с повышенным сопротивлением разрушению, в том числе при циклическом нагружении.

2. ТТУ с использованием режима прерванного ускоренного охлаждения (ПУО) аустенита до температуры последующего изотермического распада А в нижнем температурном интервале бейнитного превращения

Данный режим имеет несомненные технологические преимущества перед предыдущим (см. п. 1), так как относится к так называемым одинарным режимам ТУ, не требующим второй ТО – отпуска, а также приводит к меньшим термическим и структурным напряжениям в процессе ПУО и последующих превращений А. Есть определенные преимущества и в однородности формируемого СС по поперечному сечению изделия в условиях изотермического превращения А, по сравнению с мартенситным, происходящим в интервале температур (например, для стали 32Г2 этот интервал составляет 120–130 °С). Структурное состояние нижнего бейнита также может обеспечивать лучший комплекс свойств по сравнению с режимом ТУ – закалка на мартенсит с последующим отпуском. Правда, это положение не проверено в том случае, если для последнего способа ТУ использованы те новые ТР, которые описаны в п.1. Но, конечно, вполне очевидно, что эти новые ТР могут быть эффективно использованы, кроме КЗ, для ТУ по одинарному режиму. Поэтому СС нижнего бейнита может быть существенно улучшено (и соответственно получаемый комплекс свойств) по сравнению с получаемым при традиционных параметрах закалки на бейнит.

В то же время все указанные потенциальные преимущества рассматриваемого способа ТУ могут быть реализованы, если технологические ТР обеспечат:

- стабилизацию в узком интервале ( $\pm 10-15$  °С) температуры конца ПУО в области инкубационного периода переохлажденного А;

- достаточный “временной” запас перед началом фиксируемого превращения для выравнивания температуры в аустенитном состоянии в объеме изделия до  $\pm 5$  °С;

- изотермичность последующего распада А в температурном интервале нижнего бейнита в пределах  $\pm 5$  °С;

- предотвращение реакции  $A_{\text{ост}} \rightarrow M_{\text{зак}}$  при последующем охлаждении.

3. ТТУ с деформационного (прокатного) нагрева в потоке трубопрокатных станов

Известно, что данный вариант ТТУ привлекателен по сравнению с ТТУ, основанным на использовании специального нагрева под аустенизацию по трем основным причинам:

1) Очевидная экономия энергии.

2) Логистические преимущества совмещения процессов формообразования и ТУ труб в едином технологическом потоке.

3) Возможность при определенных условиях упрочнения труб по способу высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), который формирует особое СС и комплекс свойств.

В то же время для реализации этих преимуществ, а также решения проблем стабильности получаемых свойств труб по этому варианту, проблемы отпуска и размещения дополнительного оборудования в потоке действующих трубопрокатных станов требуется не только компромиссное согласование технологических параметров: температур и деформационных режимов ОМД и ТУ, но и системы оперативного контроля и поддержание в достаточных пределах значений этих и других параметров, а также необходимые производственные площади. Поэтому в таких условиях успешная реализация очевидных преимуществ ТУ по третьему варианту возможна либо при существенной реконструкции действующих трубопрокатных станов с обязательным учетом необходимости дополнительных площадей, либо при проектировании в определенной степени принципиально новых технологических линий ОМД и термомеханического упрочнения труб.

Наиболее эффективным представляется последний вариант, поскольку он позволяет в максимальной степени достигнуть всех трех целей развития данной ТС – ТТУ труб. При этом изменение СС аустенита перед закалочным охлаждением обеспечивается температурным и деформационным режимом прокатки по типу контролируемой прокатки с получением перед ускоренным охлаждением либо мелкозернистого А за счет регулируемого процесса рекристаллизации, либо А с полигонизованной дислокационной субструктурой, обеспечиваемой температурно-деформационно-временными параметрами обжатий в калибровочном или редуccionном стане.

Контроль и регулирование температуры заготовок и изделия обязателен для всего технологического потока, что обеспечивается установками ускоренного нагрева и охлаждения с соответствующим их размещением в указанном потоке. Окончательное охлаждение готовых труб производится по вариантам, рассмотренным выше для ТТУ с использованием специального нагрева с необходимой численной корректировкой скоростей закалочного охлаждения в зависимости от СС аустенита перед закалкой.

### Устройства для реализации новых технологий упрочнения труб

1. *Устройства для нагрева.* Используются для всех вариантов ТТУ, и всех технологических операций, где необходим нагрев, рассмотренных выше, установки индукционного нагрева в сочетании по необходимости с активными термостатами.

2. *Устройства для охлаждения.* Используются вращающиеся спрейера с диспергированным потоком охладителя, регулируемые параметрами диспергирования потока, его ориентации относительно поверхности трубы и регулируемой степени его турбулентности, а также системы таких спрейеров для организации стадийного охлаждения.

3. *Устройство водоснабжения и канализации отработанного охладителя.* Включаются как подсистема в общую систему принудительного охлаждения по схеме оборотного цикла и выполняют функции: снабжения устройств для охлаждения необходимым объемом охладителя заданного давления и температуры, канализации, очистки и обеспечения регулирования температуры отработанного охладителя.

4. *Системы оперативного контроля и регулирования технологических параметров нагрева и охлаждения, а также геометрии труб организуются и работают следующим образом:*

1) Температура труб измеряется бесконтактными быстродействующими датчиками (например, фотопирометрами) непосредственно в процессе нагрева, охлаждения, выдержки и регулируется после сопоставления с характеристиками соответствующих технологических параметров режимов термической обработки в программных устройствах путем изменения подаваемой мощности индуктором в изделие и длительности воздействия электромагнитного поля при нагреве или выдержке и путем изменения интенсивности охлаждения за счет регулирования параметров, определяющих теплоотвод в нестационарных охлаждающих средах [13]. Использование вращающихся спрейеров с ультразвуковыми устройствами для регулирования диспергирования потока охладителя позволяет использовать два уровня регулирования. Первый – грубый и инерционный: обычное регулирование расхода и давления охладителя на входе в камеру охлаждения. Второй – более тонкий и существенно

менее инерционный: регулирование характеристик теплоотвода охладителя в самой камере охлаждения путем изменения степени диспергирования потока за счет изменения мощности генератора ультразвука.

2) Оперативный контроль изменения геометрии труб в процессе их ТТУ целесообразно осуществлять с помощью лазерных устройств, причем недопустимое изменение геометрии труб, фиксируемое ими, может также оперативно корректироваться увеличением степени равномерности нагрева и охлаждения или заранее учитываться в режиме механической правки после ТО.

3) Так как наибольшая степень “индивидуализации” ТТУ труб достигается, как известно, при единичной обработке изделия в потоке, то эффект такой обработки должен учитывать и характер движения трубы в этом потоке с необходимым контролем и регулированием параметров указанного движения. Всегда, если это технологически возможно, целесообразно осуществлять вращательное движение труб. При этом направление вращения принимается противоположным соответствующему направлению вращения потока охладителя в спрейерах.

5. Кроме описанной выше системы оперативного контроля и регулирования технологических параметров (ТП) ТТУ труб весьма перспективным представляется включение в технологический поток системы оперативного контроля свойств труб. Эта система организуется на основе имеющегося опыта такого контроля термически упрочненной арматуры, осуществляемой на установках дифференциального быстродействующего замера коэрцитивной силы. Такой контроль позволяет регулировать ТП ТТУ труб не только по сопоставлению фактических (измеряемых) значений ТП с заданным интервалом их допустимого отклонения, но и по конечному СС объекта обработки, которые определяет комплекс его свойств.

### Заключение

На основе системного анализа с использованием общих законов развития технических систем определены перспективные направления развития совершенствования технологий термического упрочнения труб нефтяного сортамента, что позволяет:

- существенно повысить качество функционирования рассматриваемой системы по показателям ее управляемости, стабильности комплекса свойств конечного продукта и возможностям повышения этого комплекса свойств;
- обеспечить экономию энергии и других материальных ресурсов на единицу получаемого полезного эффекта (например, на единицу прочностных характеристик труб);
- улучшить показатели экологичности функционирования системы.

Достижение перечисленных выше в общем виде преимуществ обеспечивается использованием конкретных технических решений на всех технологических операциях процесса термического упрочнения труб.

На всех операциях нагрева: скоростной нагрев в индукционных устройствах с комбинацией, где это необходимо с активными термостатами.

На всех операциях охлаждения: использование охлаждающих устройств, обеспечивающих вращение потока охладителя, и возможность регулирования: первичного направления потока охладителя из форсунок, скорости вращения этого потока относительно охлаждаемой поверхности труб, степени турбулентности потока охладителя, степени диспергирования потока охладителя как за счет конструкции форсунок и давления воды, так и независимо – за счет воздействия ультразвуковых колебаний, что в совокупности обеспечивает несколько уровней управления интенсивностью теплоотвода.

Используемые охлаждающие устройства и их модульные системы в сочетании при необходимости с активными термостатами дают возможность варьировать различные способы закалочного охлаждения: от классического способа быстрого охлаждения в аустенитной области до температуры

$M_n$  с последующим более медленным охлаждением в мартенситном интервале, до изотермической закалки и новых способов закалочного охлаждения (сверхбыстрое охлаждение в мартенситном интервале; градиентная закалка с термическим наклепом аустенита до температуры  $M_n$ ; вакансионная закалка, обеспечивающая мартенситное превращение в условиях высокого пресыщения металла вакансиями).

Стабильность воспроизводства данного режима термического упрочнения и соответственно – получаемого структурного состояния (заданного комплекса свойств труб) обеспечивается системой программного оперативного управления технологическими параметрами на всех операциях процесса термического упрочнения. При этом заданными и контролируемыми технологическими параметрами являются: скорости поступательного и вращательного движения трубы, ее температура, соответствующие параметры воздействия нагревательных и охлаждающих устройств, характеристики геометрии и сплошности, а также магнитные характеристики упрочненной трубы, функционально связанные со структурным состоянием и – соответственно – с полученным комплексом свойств.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Маковецкий А. Н., Мирзаев Д. А. Роль предварительной термической обработки в формировании структуры и свойств трубных сталей после закалки из межкритического интервала температур // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2012. - №39. – С.71–78.

A.N. Makovetsky, D.A. Mirzaev Rol predvaritelnoy termicheskoy obrabotki v formirovanii struktury i svoystv trubnykh staley posle zakalki s mezhkriticheskogo interval temperature [The role of preliminary heat treatment in formation of structure and properties of pipeline steels quenched from intercritical temperature range] // Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy., 2012. Vol. 39. 71-78 p.

<http://cyberleninka.ru/article/n/rol-predvaritelnoy-termicheskoy-obrabotki-v-formirovanii-struktury-i-svoystv-trubnyh-staley-posle-zakalki-iz-mezhkriticheskogo>

2. Формирование структуры низколегированной трубной стали при нагреве в межкритическом интервале температур / А. Н. Маковецкий, Т. И. Табачникова, И. Л. Яковлева и др. // ФММ. -2012. - № 7. - С. 744-755.

A.N. Makovetsky, T. I. Tabachnikova, S. L. Yakovleva Formirovanie struktury nizkolegirovannoy trubnoy stali pri nagreve v mezhkriticheskom interval temperature [Forming the structure of the low alloy steel pipe heated in the intercritical temperature range] // ФММ., 2012. Vol. 7. 744-755 p. <http://www.science-education.ru/108-8873>

3. Исследование влияния режимов скоростной термической обработки на структуру и механические свойства трубной стали 32Г2 / А. И. Гордиенко // Литье и металлургия. – 2012. – № 1 (64). – С. 43-47.

A. I. Gordienko Issledovanie vliyaniya rezhimov skorostnoy termicheskoy obrabotki na strukturu i mechanicheskie svoystva trubnoy stali 32G2 [Research on the effect of high-speed heat treatment on structure and mechanical properties of the pipe steel 32G2] // Casting and metallurgy., 2012. Vol. 1 (64). 43-47 p.

<http://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/8014/C.43-47.pdf>

4. Ивашко О. О., Кириленко О. М., Вегера И. И., Семенов Д. А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства горячекатаных труб, изготовленных из стали 32Г2 // Литье и металлургия. – 2011. – № 4 (63). – С. 108-114.

O. O. Iwashko, O. M. Kirilenko, I. I. Vegera, D. A. Semenov Issledovanie vliyaniya rezhimov termicheskoy obrabotki na strukturu i mechanicheskie svoystva goryachekatanich trub iz stali 32G2 [Investigation of the influence of heat treatment on the structure and mechanical properties of hot-rolled tubes made of steel 32G2] // Casting and metallurgy., 2011. Vol. 4 (63). 108-114 p.

<http://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/8789/C.%20108-114.pdf>

5. Есаулков А. А. Влияние режимов термической обработки на комплекс механических свойств трубных сталей с 3% хрома / А. А. Есаулков, Н. П. Ануфриев, К. А. Лаев // XV международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых. Екатеринбург, 8-12 декабря 2014 : сборник научных трудов. — Екатеринбург : УрФУ, 2014. — С. 302-304.

A. A. Esaulkov Vliyaniye rezhimov termicheskoy obrabotki na kompleks mechanicheskikh svoystv trubnykh staley s 3% chroma [Effect of heat treatment on the mechanical properties of the complex with the steel pipe 3% chromium] // XV International Scientific and Technical Workshop Ural metallurgists, young scientists. Ekaterinburg, 8-12 December 2014: collection of scientific papers., Ekaterinburg., 2014. 302-304 p.

<http://elar.urfu.ru/handle/10995/29764>

6. Голи-Оглу Е. А., Эфрон Л. И., Морозов Ю. Д. Повышение эффективности термомеханической обработки микролегированных трубных сталей // Сталь. – 2013. – №3. – С. 52–58.

Goals-Oglu E. A., Efron L. I., Morozov Y. D. povishenie effektivnosti termomechanicheskoy obrabotki mikrolegirovannich trubnich staley [Improving the efficiency of thermomechanical processing of microalloyed steel pipe] // Steel., 2013. Vol. 3. 52-58 p.

[http://www.imet.ru/STAL/2013/02/14/STAL\\_181.html](http://www.imet.ru/STAL/2013/02/14/STAL_181.html)

7. Min Huang, Yu Wang, Ya Ni Zhang, Yue Wei Xie, Shuo Feng Li Effect of Intercritical Quenching on Microstructure and Mechanical Properties of Oil Casing Steel N80 // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – V. 395 – 396. – pp 279–283

<http://www.scientific.net/AMM.395-396.279>

8. V. Palanisamy, J. Ketil Solberg, B. Salberg, T. Moe Microstructure and Mechanical Properties of API 5CT L80 Casing Grade Steel Quenched From Different Temperatures // ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – 2012. – V. 6. – pp 256–259

<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx>

9. WU Huibin, MA Maoyuan, Wang Lidong, Tang Di Influence of heat treating on microstructure and properties of Q125 oil casing steel // Heat Treatment of Metals. – 2012. – V. 11. – pp 78–86

[http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTALJSCL201205018](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTALJSCL201205018)

10. Гуль Ю. П. Деформационные воздействия в технологиях термической и комбинированной обработки металлоконструкций // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 2011. Вып. 58. с. 29-39

Y. P. Gul Deformazionnie vozdeistviya v technologiyach termicheskoy i kombinirovannoj obrabotki metallokonstrukzij [Deformation effects in technology and combined heat

treatment of steel structures] // Building, materials sciences, mechanic engineering: Collection of scientific papers Issue№58 – Dnipropetrovs'k, PSAES, 2011. – p. 29-39.

<http://pgasa.dp.ua/a/international%20conferences/starodubov/archive/referats%20of%20starodubov%202011-58.pdf>

11. Кобаско Н. И. Закалка сталей в жидких средах под давлением. - Киев: Наукова думка, 1980. – 208с.

N. I. Kobasko Zakalka staley v zidkikh sredach pod davleniem [Hardening steels in liquid media under pressure] // Kiev: Naukova Dumka, 1980. - 208с.

<http://lib-bkm.ru/load/88-1-0-1481>

12. Гуль Ю. П., Чмелева В. С., Кириченко В. В. Современные аспекты закалочного охлаждения стали // МитОМ. – 1989. – №9. – с. 2 – 6.

Y. P. Gul, V. S. Chmeleva, V. V. Kirichenko Modern aspects of hardening steel cooling // Metal Science and Heat Treatment. - 1989. - №9. - С. 2-6.

<http://mitom.folium.ru/contents/1989/1989-09.php>

13. Гуль Ю. П., Чмелева В. С. Сравнительный анализ эффективности использования стационарных и нестационарных охладителей при термической обработке металлопродукции // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 2011. Вып. 58. с. 178–188.

Y. P. Gul, V. S. Chmeleva Sravnitelnij analis effektivnosti ispolzovaniya stazionarnich i nestazionarnich ochladiteley pri termicheskoy obrabotke metallokonstrukzij [Comparative analysis of the effectiveness of the use of stationary and non-stationary cooling during heat treatment metalloproduksii] // Building, materials sciences, mechanic engineering: Collection of scientific papers Issue№58 – Dnipropetrovs'k, PSAES, 2011. – p. 178-188.

<http://pgasa.dp.ua/a/international%20conferences/starodubov/archive/referats%20of%20starodubov%202011-58.pdf>

*Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. Т. М. Мироновой (Украина); д-ром. техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлином (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015