

частиц путем механической обработки // Неорганические материалы. – 2001. – Т. 37, №5. – С. 592-595.

6. Я.Де Бур. Динамический характер адсорбции. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. – 290с.

7. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. – Л.: Наука, 1979. – 183 с.

8. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов. – Л.: Энергия, 1973. – 336с.

9. Емельянов А.А., Полубояров В.А., Бурка А.Л., Кортаева З.А., Великанов Е.В., Лапин А.Е., Бан Бонг-Чан. Теплообмен при фазовом переходе и адсорбции-десорбции кислорода в дисперсном

материале // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28, №1. – С. 22-30.

10. Аввакумов Е.Г., Ануфриенко В.Ф., Восель С.В., Калинина Н.Г., Полубояров В.А. Исследование структурных изменений в механически активированных оксидах титана и ванадия методом ЭПР // Известия СО АН СССР, Сер.хим. – 1987. – Вып.1. – С.41- 48.

11. Канторович Л.В. О методе Ньютона // Труды Математического института АН СССР. – 1949. – Т.28. – С. 135-139.

*Работа проводилась при поддержке РФФИ по проекту № 06-08-00361-а.*

*Получено 20.04.2007 г.*

УДК 621.78.084:004.424

МОСКАЛЕНКО А.А.<sup>1</sup>, ЗОТОВ Е.Н.<sup>1</sup>, ПРОЦЕНКО Л.Н.<sup>1</sup>,  
РАЗУМЦЕВА О.В.<sup>1</sup>, ДЕЙНЕКО Л.Н.<sup>2</sup>, ДОБРИВЕЧЕР В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>Национальная металлургическая академия

<sup>3</sup>ТОВ “Интенсивные технологии ЛТД”

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТУПЕНЧАТОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Запропоновано нову технологію ступінчастого гартувального охолодження сталевих виробів, яка забезпечує оптимально високі характеристики міцності металу. Режими охолодження при зміні інтенсивності тепловіддачі отримано за допомогою моделювання процесу за даними, розрахованими за допомогою програми IQLab.

Предложена новая технология ступенчатого закалочного охлаждения стальных изделий, обеспечивающая оптимально высокие прочностные характеристики металла. Режимы охлаждения с изменением интенсивности теплоотдачи получены с помощью моделирования процесса по данным расчета по программе IQLab.

The new technology of step hardening cooling of the steel products, providing optimum high strength characteristics of metal is offered. Modes of cooling with change of intensity heat exchange are received with the help of modeling of process according to calculation under program IQLab.

$T$  – температура;

$V$  – скорость;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;

$\tau$  – время;

$\Phi$  – феррит;

$B$  – бейнит.

**Индексы:**

центр – центральная часть изделия;

пов – поверхность изделия.

В металлургии и машиностроении постоянно осваиваются новые материалы (или оптимизируются существующие составы сталей и сплавов), для которых необходимо разрабатывать параметры технологий их обработки (горячей деформации, термической обработки и др.). При этом в промышленности действуют нормативные документы, определяющие такие параметры как скорость нагрева, время выдержки, скорость охлаждения различных металлоизделий (слитков, поковок, отливок, металлопроката и т.д.) из различных сталей при нагреве (охлаждении) в процессе их передела. Такая нормативная документация разрабатывалась зачастую в 30-50 годы прошлого столетия и содержит рекомендации, которые завышены по параметрам, что в настоящих условиях приводит к большим энергозатратам. В настоящее время промышленность Украины по данным [1] является самой энергозатратной, что требует принятия кардинальных мер, направляемых на создание энергосберегающих технологий и оборудования. И это направление особенно важно в металлургических переделах, четвертым из которых является термическая обработка металлов и сплавов. В такой ситуации эффективно применение моделирования указанных процессов, корректировка существующих нормативов по времени и скорости нагрева, времени выдержки и других параметров. В этом случае предусматривается использование экспериментальных данных, которые ранее были получены на таких изделиях или на их аналогах в процессе промышленного производства или при постановке их на производство. При отсутствии таких данных производится проработка процесса по справочным данным, и результаты исследований проверяются по контрольным замерам на натуральных изделиях. Это значительно сокращает время на создание новых разработок и объем финансовых и трудовых затрат. Для решения таких достаточно сложных задач эффективно моделирование процессов термообработки с использованием программы IQLab [2], которая предусматривает возможность использования любой термокинетической или изотермической диаграмм распада аустенита с наложением на нее кривых охлаждения, обеспечивающих требуемое структурное состояние и свойства.

Программа IQLab [1] (версии 2.0) предназначена для решения одномерных, нелинейных, прямых и обратных задач теплопроводности в твердых телах классической формы: неограниченный цилиндр, шар и неограниченная пластина при симметричных и несимметричных граничных условиях.

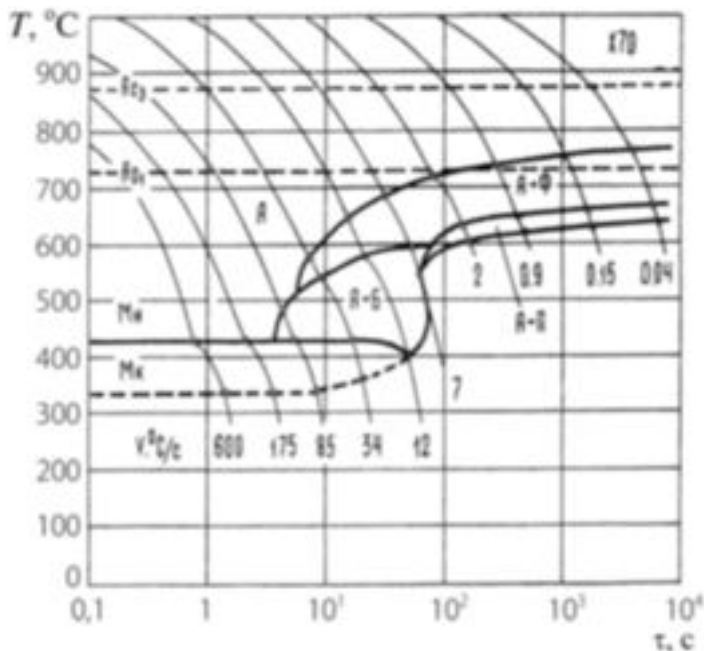
При решении прямой задачи задаются граничные условия на поверхности 1, 2 или 3 рода в виде функции от времени.

Обратные задачи теплопроводности решаются методом Ньютона-Гаусса для оценки параметров нелинейной модели в сочетании с методом регуляризации по Тихонову [3]. Входными данными для решения обратной задачи служат значения температуры от времени, полученные в результате эксперимента при помощи термопары, зачеканенной внутри охлаждаемого изделия. При решении обратной задачи восстанавливаются значения температуры на поверхности изделия, а также рассчитываются зависимости коэффициента теплоотдачи, плотности теплового потока и числа Био от времени, рассчитывается температурное поле по всему сечению изделия. Также эти результаты можно представить графически и таблично как функции от времени, температуры поверхности и других характеристик [4].

По полученным решениям возможно выбрать требуемую охлаждающую среду и оптимальные температурно-временные условия режима охлаждения обрабатываемого изделия. Программа очень проста в эксплуатации и позволяет решать много вариантов задач. По известным критериям интенсивности охлаждения металла для имеющейся охлаждающей среды (скорость охлаждения, коэффициент теплоотдачи, тепловой поток) можно определить температурно-временные пределы ускоренного охлаждения, а при необходимости и параметры прерывания ускоренного охлаждения с продолжением охлаждения на воздухе, т.е. параметры промышленного режима термообработки деталей.

Такой подход использован при разработке технологии термического упрочнения соединительных деталей трубопроводов (СДТ), который представлен в данной работе.

Соединительные детали нефтегазопроводов, в том числе магистральных (отводы, тройники, пе-



**Рис. 1. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 10Г2ФБ после аустенитизации при 1000 °С, выдержка 5 мин.**

реходы, днища), диаметром от 530мм до 1420мм с толщиной стенки от 16 мм до 80 мм испытывают при эксплуатации значительно большие (в 1,5...3 раза), чем в трубах, напряжения из-за сложной геометрической формы. Поэтому к уровню комплекса механических свойств металла этих изделий предъявляются высокие требования, которые возможно обеспечить при приемлемых затратах за счет применения экономнолегированных сталей и упрочняющей термической обработки деталей в готовом виде [5–7].

Из практики изготовления и эксплуатации сварных металлоконструкций ответственного назначения известно, что наиболее приемлемой структурой металла таких изделий является феррито-бейнитная или бейнитная. Получение такого структурного состояния в металле деталей с различной толщиной стенки при реализации термического упрочнения готовых изделий при отдельном нагреве представляет собой весьма сложную техническую задачу. Это связано прежде всего с тем, что интервал температур, при которых происходит распад переохлажденного аустенита, по бейнитному механизму достаточно узкий (рис.1) и для получения требуемого структурного состояния детали с различной толщиной

стенки необходимо ускоренно охлаждать с различной интенсивностью в определенные периоды термического упрочнения [5].

Важнейшими элементами разрабатываемой технологии термоупрочнения СДТ, требующими принятия окончательного решения, являлись:

- вид применяемой охлаждающей среды;
- способ реализации ускоренного охлаждения изделий (непрерывное в одном охладителе или методом купания в нескольких и т.д.).

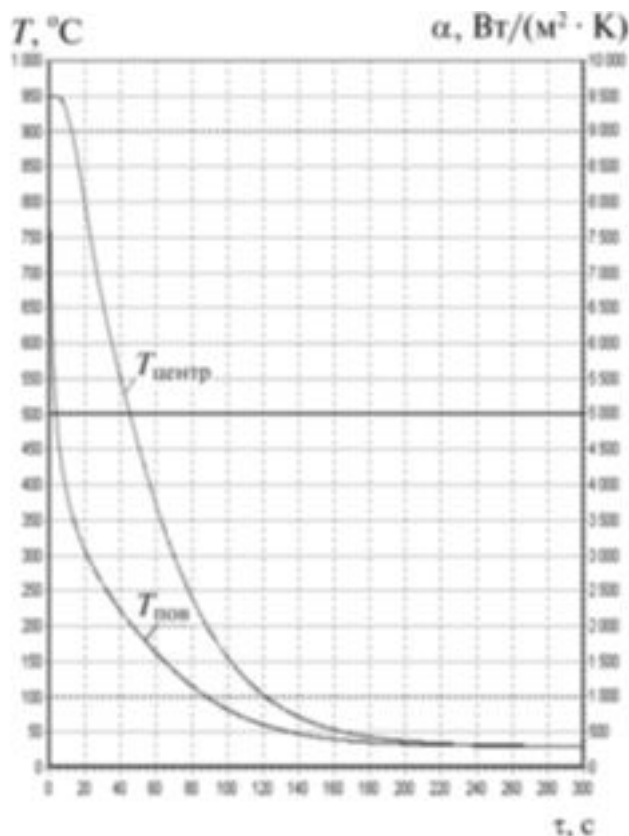
От выбора этих параметров зависят:

- конструкция закалочного устройства и сопутствующих систем (системы подъема – опускания детали в закалочную среду; системы стабилизации температурного режима ванны и контроля охлаждающей способности среды и т.д.);
- объем охлаждающей среды, участвующий в процессе термоупрочнения изделий;
- конструктивно-технологические параметры системы контроля температуры металла в процессе термоупрочнения и управления процессом охлаждения.

Известно [8], что от типа охлаждающей среды, ее температуры, скорости движения относительно металла и концентрации добавок (в случае использования растворов) зависимость охлаждающей способности сред от температуры закаливаемого металла существенно различаются.

Следует сразу сказать, что при анализе параметров охлаждающих сред, которые можно было бы использовать для термического упрочнения СДТ, масло, солевые растворы, полимерные среды были отвергнуты по различным причинам (технологическим, экологическим и экономическим).

Таким образом, одной из наиболее технологичных, экологически чистых и дешевых закалочных сред является вода, которой присущи также и недостатки. Общим недостатком для всех интенсивно охлаждающих металл сред является значительный перепад температур — до 500°С (см. рис.2) по сечению закаливаемых деталей, например, стенки СДТ, что приводит к неоднородности структурного состояния металла и его свойств. При проведении экспериментов авторами статьи по закалке металла в горячей воде (рис.3) абсолютная скорость охлаждения снижается по сравнению с холодной водой и существенно уменьшается перепад температур между



**Рис. 2. Расчетные кривые охлаждения пластины толщиной 50 мм из стали 10Г2ФБ в спокойной воде при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , полученные с помощью программы IQLab [2]. Значение коэффициента теплоотдачи выбрано по данным работ [10, 11, 12], а также по результатам экспериментальных исследований авторов статьи, которые удовлетворительно коррелируются друг с другом.**

поверхностью и центром детали. В связи с тем, что термическому упрочнению предполагается подвергнуть соединительные детали диаметром от 530 мм до 1420 мм, толщина стенок которых находится в интервале 16...80 мм, целесообразно было разделить весь сортамент деталей на несколько групп по толщинам стенок и для каждой из них определить наиболее приемлемую закалочную среду, обеспечивающую минимальный перепад температур между центром и поверхностью и, соответственно, однородность структур и свойств.

Из данных [6] следует, что при температуре охлаждающей воды 85...90 °С происходит смещение максимума теплосъема (кризиса кипения —

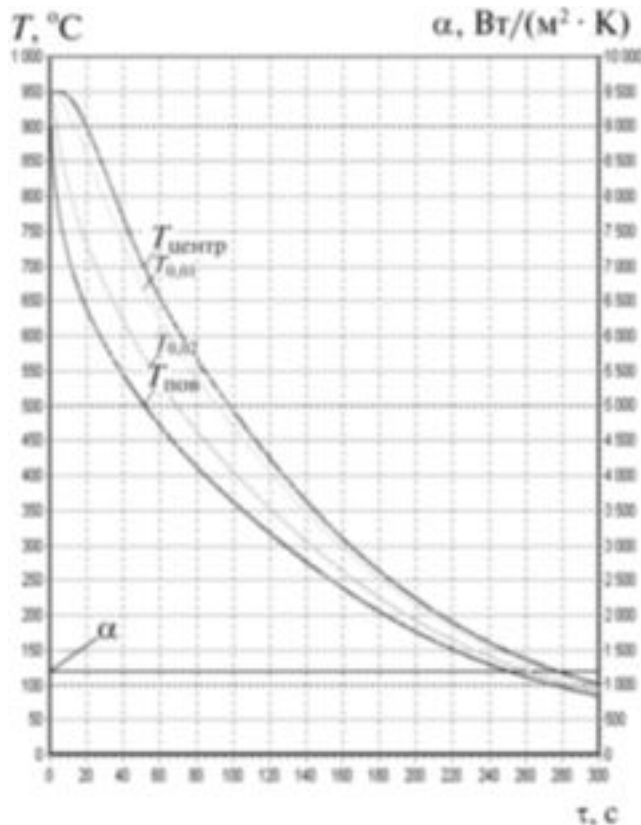
переход от пленочного к пузырьковому кипению) в область температур приповерхностного слоя закаливаемого металла 180...160 °С. При этих температурах металл уже находится в упругом состоянии, и поэтому резкое увеличение коэффициента теплоотдачи (а соответственно и напряжений) приводит к растрескиванию металла или короблению металлоизделий. Исходя из этого технология закалки изделий (особенно крупногабаритных и сложной формы) в воде с температурой выше 85...90 °С должна предусматривать прерывание процесса охлаждения при температуре поверхности металла  $\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, на основании анализа экспериментов было определено, что наиболее приемлемыми охлаждающими средами термического упрочнения крупногабаритных изделий типа СДТ являются:

- вода с температурой  $\geq 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для толщин  $\leq 40\text{ мм}$ );
- вода с температурой до 35...40 °С (для толщин  $\geq 40\text{ мм}$ ).

Для реализации процесса закалки изделий разнообразной формы и габаритов было спроектировано и изготовлено специальное закалочное устройство, которое функционирует на ОАО “Трубодеталь” (г. Челябинск). При апробации новых технологий термоупрочнения были испытаны параметры режимов охлаждения СДТ в воде с температурой в интервале 20...90 °С, что представляется целесообразным по причине выбора определенной скорости охлаждения для каждой группы деталей с определенным интервалом толщин стенок.

Применение в качестве закалочной среды холодной воды (достаточно высокая равномерность охлаждения в спокойной воде при ее температуре до 35...40 °С) усложняет технологический процесс термического упрочнения тем, что повышается в 2...3 раза интенсивность охлаждения металла и это с первых секунд охлаждения приводит к возрастающей разнице температуры металла (рис. 2) по сечению (увеличивается с увеличением толщины детали). Для уменьшения перепада температур по сечению охлаждаемого металла и получения более равномерного структурного состояния на практике реализуют режим охлаждения “купанием”, т.е. после определенных выдержек в закалочной среде изделие извлека-



**Рис. 3. Расчетные кривые охлаждения пластины толщиной 50 мм из стали 10Г2ФБ в горячей ( $t \geq 90$  °С) неподвижной воде, полученные с помощью программы IQLab [2]. Значение коэффициента теплоотдачи выбрано по данным работ [10, 12], а также по результатам экспериментальных исследований авторов статьи, которые удовлетворительно коррелируются друг с другом.**

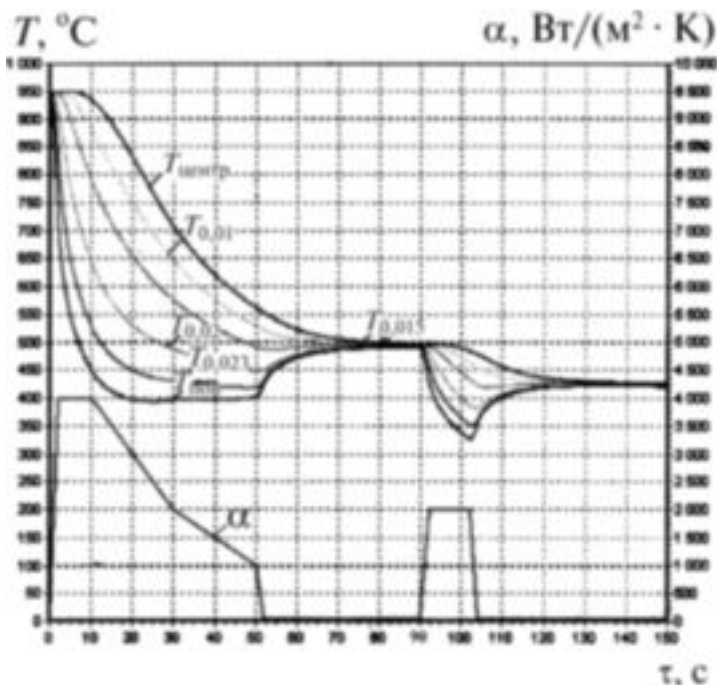
кается на воздух и выдерживается для выравнивания температуры металла по сечению. И весь процесс закалки состоит в определенном сочетании (для каждой толщины металла) таких интервалов интенсивного и замедленного охлаждения. Для деталей с большой толщиной стенки, которые при закалке можно быстро погружать в охлаждающую среду и извлекать из нее, процесс “купания” достаточно технологичен. При этом, чем больше толщина стенки детали, тем больше перепад температур по сечению детали при непрерывном охлаждении в холодной воде. Поэтому режим охлаждения “купанием” наиболее целесообразно использовать для СДТ с толщиной стенки  $\geq 40$  мм. Для создания промышленного

режима закалки методом “купания” необходимо знать такие температурно-временные параметры процесса, которые помогут максимально сблизить температуру металла центра и поверхности и при этом не дать возможности переохладить металл поверхностных слоев ниже критической температуры  $M_n$  (рис. 1).

Следует также особо отметить, что для получения в металле СДТ оптимального уровня свойств необходимо получить равномерное по сечению металла структурное состояние с определенным соотношением фаз. Для конкретных СДТ это может быть феррито-бейнитное структурное состояние при соотношении фаз: Ф – (60...75%) и Б – (25...40%), полностью структура игольчатого феррита (нижнего бейнита). В работах [6, 7] приведены результаты исследования состояния структуры стали 10Г2ФБ толщиной 19 мм после термической обработки с использованием различных закалочных сред.

Согласно результатам исследований [6] режим непрерывного охлаждения в холодной воде для этой марки стали толщиной 19 мм (а практика показывает, что аналогичное состояние наблюдается для толщин до 36 мм) не может быть рекомендован для промышленного производства СДТ в связи с повышенным содержанием в структуре мартенсита и бейнита.

При этом для каждой марки стали существуют свои оптимальные температурно-временные параметры распада переохлажденного аустенита, знание которых может стабильно обеспечивать указанные структурные состояния. Поэтому для реализации в промышленных условиях процессов термоупрочнения необходимо, прежде всего, иметь диаграммы изотермического, термокинетического распада переохлажденного аустенита и структурные диаграммы для всех используемых сталей (см., например, для стали 10Г2ФБ, рис.1). На примере сталей 09...12Г2ФБ, являющихся базовыми в СНГ при производстве труб, было установлено, что наиболее желательны для металла СДТ структурные состояния, которые возможно получить при распаде переохлажденного аустенита в интервале температур от  $M_n$  до 550 °С. А реализовать процесс распада переохлажденного аустенита в заданном температурном интервале охлаждаемого металла возможно при наличии



**Рис. 4. Кривые охлаждения пластины из стали 10Г2ФБ толщиной 50мм в холодной воде методом "купания", смоделированного с помощью программы IQLab (версия-2) на основании экспериментальных данных, полученных авторами статьи.**

непрерывного контроля температурного поля металла. Такой контроль температуры металла по сечению в процессе охлаждения возможен при наличии:

а) математической модели (и программы) для расчета распределения температуры по сечению металла, характерной для конкретных условий (среды, способа охлаждения и др. параметров). Упомянутая ранее программа (IQLab, версия-2) [2] эффективно используется для оптимизации параметров технологии термоупрочнения СДТ [3];

б) прибора контроля температуры металла в закалочной среде, работающем на принципе анализа амплитудно-частотных шумовых характеристик, возникающих на поверхности металла при смене кризисов кипения (каждая среда имеет свои особенности). Создание такого прибора ведется в рамках договора НМетАУ – ИТТФ НАНУ [9];

в) системы контроля температуры металла после извлечения детали из закалочной среды (при реализации прерванного охлаждения или режима "купание"). Для создания такой системы

предложено использовать приборы: чувствительный инфракрасный пирометр с пределом измерения 20...600 °С; гидроакустический прибор контроля температуры металла в охлаждающей среде.

Разработка такой комплексной системы контроля за температурным полем металла СДТ или других крупногабаритных деталей в условиях режима охлаждения методом "купания" ведется специалистами НМетАУ и ИТТФ НАН Украины.

Только при совмещении указанных разработок в единой системе с созданием компьютерной управляющей программы возможно автоматизировать процесс термоупрочнения и использовать его в различных условиях, а также оптимизировать его параметры за счет возможности моделирования процесса.

Реализация вышеизложенных принципов и конструктивно-технологических параметров режимов и средств контроля температуры термоупрочняемых СДТ возможна при наличии закалочного устройства с механизированным подъемно-опускным столом, создание которого осуществлено на базе ОАО "Трубодеталь" фирмой LOI по заданию НМетАУ.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований, полученных при закалке толстых пластин (50 мм) с зачеканенными термopарами, и обработки этих данных с помощью программы IQLab (версия-2) был получен ряд диаграмм распределения температурного поля по сечению изделий при различных значениях интенсивности охлаждения металла и времени охлаждения в закалочном устройстве и на воздухе, т.е. при реализации метода "купания".

На рис. 3, 4 приведен режим охлаждения крупногабаритной детали, при реализации которого были использованы оптимальные параметры процесса охлаждения металла по режиму "купания". При таком режиме охлаждения температура металла центра и поверхности сблизилась и практически началась изотермическая выдержка металла при 460...470 °С после определенного времени от начала процесса закалки.

Как видно из рис.1, при осуществлении практически изотермической выдержки металла при температурах 480...500 °С, начиная с 70 секунды от момента начала процесса закалки и до полного превращения аустенита, металл поверхност-

ных слоев детали не переохлаждался ниже мартенситной точки  $M_n$ , что гарантирует отсутствие структуры мартенсита в металле поверхностных слоев. Последующее охлаждение изделия целесообразно вести методом купания, который приводил бы к небольшому градиенту температур по сечению металла. Осуществление таких режимов возможно при наличии автоматизированных закалочных устройств с подъемно-опускным столом и регулируемой системой циркуляции охлаждающей среды и при наличии системы быстрого нагрева-охлаждения закалочной среды в баке.

### Выводы

1. При наличии соответствующего программного обеспечения и минимума экспериментальных данных возможно смоделировать и оптимизировать самый сложный режим закалки металлоизделий с минимальными затратами.

2. В результате выполненных исследований, используя комплексный подход, были созданы промышленные технологии термического упрочнения крупногабаритных высокопрочных изделий, обеспечивающие металлу уровень прочности не менее К60.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Key world energy statistics*. – International energy agency, 2004. – P.57.

2. *Добри́вечер В.В., Зотов Е.Н., Кобаско Н.И., Моргунок В.С., Сергеев Ю.В.*, Программный комплекс “IQLab”, коммерчески распространяемый ТОВ “Интенсивные технологии ЛТД” (iqlab@itl.kiev.ua).

3. *Круковский П.Г.* Обратные задачи тепло-массопереноса (Общий инженерный подход). – К.: Ин-т технической теплофизики, 1998. – 224 с.

4. *Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Добри́вечер В.В., Кобаско Н.И., Дейнеко Л.Н.* Использование программы IQLab для выбора оптимальных режимов процесса термообработки стальных изделий. – В сб. докладов междуна-родной конференции “Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов” (ОТТОМ-6), ч.1. – Харьков: ННЦ ХФТИ, ИПЦ “Контраст”, 2005. – С. 106–115.

5. *Дейнеко Л.Н., Большаков В.И.* Термическое упрочнение соединительных деталей магистральных нефтегазопроводов. – Днепропетровск: Gaudeamus, 2000. – 120 с.

6. *Большаков В.И., Дейнеко Л.Н., Бекетов А.В., Евсюков М.Ф.* Исследование процессов структурообразования в штрипсовых V-Nb-Ti содержащих сталях. – *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2001. – № 3. – С.62–76.

7. *Большаков В.И., Дейнеко Л.Н., Бекетов А.В., Евсюков М.Ф. и др.* Сб. научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение - Вып.15, “Стародубовские чтения 2002”, часть 1. – Днепропетровск: ПГАСА, 2002. – С. 250–255

8. *Люты В.* Закалочные среды. Справочник. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 192с.

9. *Москаленко А.А., Зотов Е.Н., Лутов С.Д., Симаченко А.В., Дейнеко Л.Н.* Разработка и промышленные испытания системы управления и термоакустической диагностики технологии закалки стальных изделий. – Тезисы IV Международной конференции “Проблемы промышленной теплотехники”. – К.: 2005. – С. 354.

10. *Коздоба Л.А., Чумаков В.Л.* Температурное поле при охлаждении в жидкой среде // *Физика и химия обработки материалов*. – 1970. – №5. – С.3–8.

11. *Кобаско Н.И.* Тепловые процессы при закалке стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1968. – №3. – С.2–6.

12. *Немчинский А.А.* Тепловые расчеты термической обработки. – М.: Судпромгиз, 1953. – 104 с.

Получено 23.01.2007 г.