

УДК 519.713; 519.711:53; 621.785.05; 621.785.845

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ

С.П. КУНДАС<sup>1</sup>, Б.А. ТОНКОНОГОВ<sup>1</sup>, И.А. ГИШКЕЛЮК<sup>1</sup>, П.С. ГУРЧЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Республиканское унитарное предприятие "Минский автомобильный завод"*

<sup>2</sup> *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 29 мая 2003*

Рассматриваются вопросы компьютерного моделирования, верификации и исследования теплофизических процессов в металлических деталях при закалке. С применением программного комплекса ThermoSim проведены исследования процесса закалки для: 1) образца на прокаливаемость; 2) детали типа "сателлит". Установлено влияние режима закалки на распределения температур, фазового состава, деформаций, напряжений и твердости.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, закалка, исследование.

### Введение

Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов термообработки металлических изделий различных отраслей техники связано с большими трудностями ввиду большого количества влияющих факторов и необходимости применения разрушающих методов контроля. Поэтому наиболее часто исследование и диагностика технологических процессов термообработки проводится методом "проб и ошибок", что требует больших материальных и временных затрат. Одним из эффективных направлений решения этой проблемы является применение методов компьютерного моделирования, с помощью которых возможно получение максимального объема информации об изучаемом процессе при минимуме дорогостоящих экспериментальных исследований. Наиболее перспективным при решении вышеперечисленных задач является применение математических моделей, построенных на основе метода конечных элементов (МКЭ). Преимущества МКЭ заключаются в том, что он позволяет рассчитывать детали сложной и неправильной формы с детализацией наиболее критичных мест изделия путем увеличения количества элементов разбиения в этих местах и довольно прост в реализации на ЭВМ. Однако большинство программных комплексов (NASTRAN, ANSYS, MARC, DEFORM-3D и др.) [1], успешно использующие данный метод, являются универсальными, не учитывают множество особенностей процессов термообработки и отличаются сложностью в практическом применении.

Лабораторией компьютерного моделирования технологических процессов БГУИР разработан специализированный программный комплекс ThermoSim для моделирования процессов термообработки, который использовался в настоящей работе для проведения компьютерных исследований [2, 3].

## Методика исследований

Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования процессов закалки деталей (рис. 1) проводились в условиях Центральной заводской лаборатории управления главного металлурга РУП "МАЗ" в соответствии с режимами, приведенными в табл. 1.

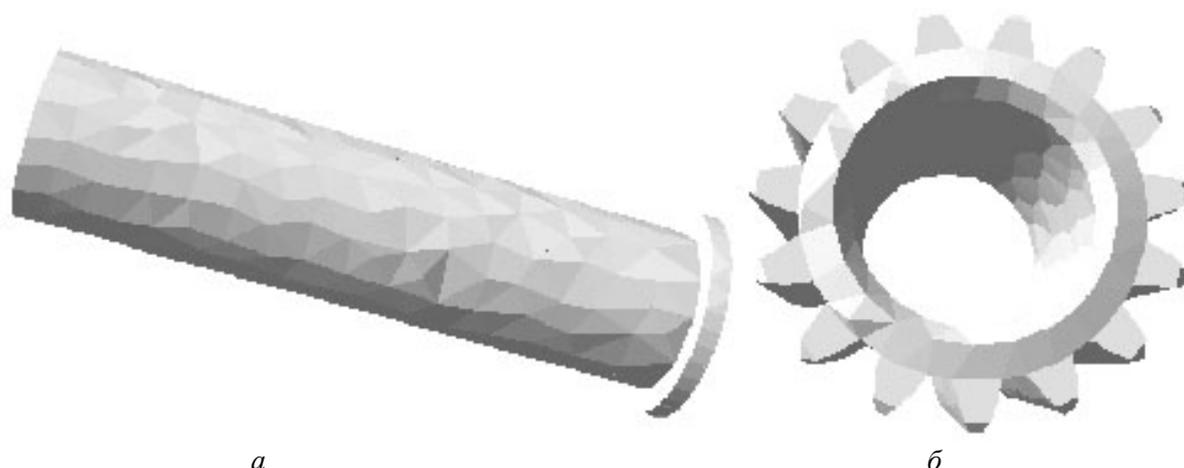


Рис. 1. Конструкции исследуемых деталей: образец на прокаливаемость (а); деталь типа "сателлит" (б)

Таблица 1. Виды и режимы процессов закалки

№	Тип детали	Вид материала	Охлаждающая среда	Режим закалки
1	Образец на прокаливаемость	Сталь 45	Вода (13–14°C), воздух (18°C)	Торцевая закалка с 840°C
2	Сателлит	Сталь 60ПП	Вода (12–14°C)	Закалка с 780°C полным погружением

Нагрев осуществлялся в печи сопротивления, а охлаждение — с помощью специальной установки [4]. Для измерения значений температуры на поверхности образца на прокаливаемость использовалась хромель-алюмелевая термопара. Температура измерялась с помощью потенциометра КСП-4 (рис. 2). Погрешность измерений составила  $\pm 10\%$ .

При металлографическом исследовании фазовый состав слоев и распределение в них диффундирующих и легирующих элементов анализировались при помощи спектрометра DV-6 и средствами сегментации изображения с использованием программного пакета Image-Pro Plus версии 4.1 компании *Media Cybernetics* (рис. 3). Кроме этого исследовалась структура сердцевины детали.

Твердость поверхности деталей измерялась при помощи приборов 2137ТУ и ТК-2М. Распределение твердости по контуру зубьев и шлиц (по сечению зубчатого венца) замерялось на расстоянии  $\sim 0,3\text{--}0,5$  мм от поверхности детали (рис. 4, 5). Погрешность измерений составила  $\pm 10\%$ .

Наличие трещин определялось при помощи магнитолюминесцентного дефектоскопа и визуальным осмотром.

С помощью программного комплекса ThermoSim по режимам, указанным в табл. 1, проведено моделирование процессов термообработки, в частности, динамика изменения температуры, фазового состава и распределение твердости.

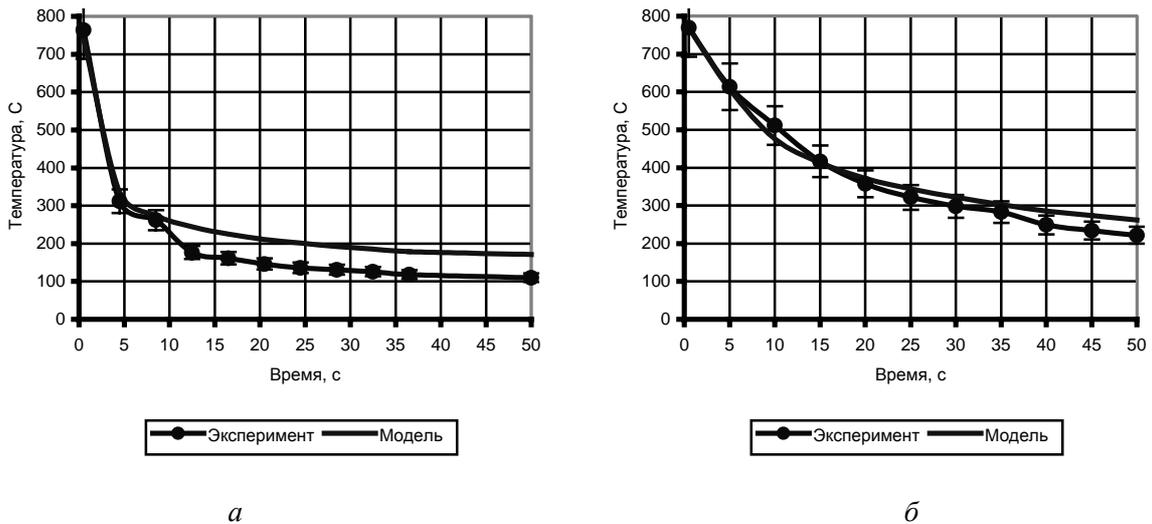


Рис. 2. Изменение температуры в процессе торцевой закалки на различных расстояниях от торца и сравнение его с данными моделирования: а) 2 мм; б) 7 мм

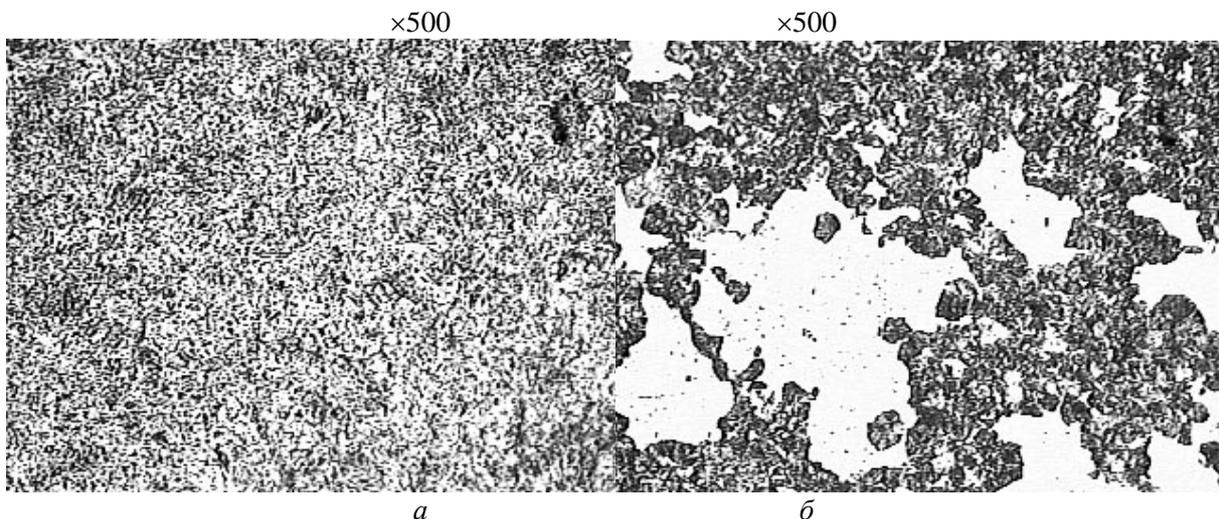


Рис. 3. Распределение фазового состава: слаботравящийся мартенсит среднегольчатого строения (а); троостомартенсит в виде отдельных участков мартенсита и троостита с весьма незначительным количеством феррита (б)

### Результаты исследований и их анализ

Как видно из представленных на рис. 2, 4 и 5 данных, результаты моделирования находятся в доверительном интервале экспериментальных измерений, что свидетельствует об адекватности разрабатываемых моделей реальному процессу.

На некоторых кривых распределения температуры наблюдалась "ступенька", обусловленная теплотой, выделяемой при фазовых превращениях (рис. 2,а).

Результаты моделирования фазового состава представлены в табл. 2 и 3.

Установлено, что разная скорость охлаждения вызывает различные механизмы фазовых превращений. По мере удаления от торца, где скорость охлаждения меньше критической, образуются перлит и феррит. На торце детали, где наблюдалась наибольшая скорость охлаждения, образуются мартенсит и бейнит. Из анализа зависимости скорости распада аустенита в различных сечениях детали следует, что в то время, когда превращение аустенита возле торца детали уже завершилось, в середине детали оно еще не началось. Это может привести к большим зна-

чениям напряжений на торце детали, так как превращение аустенита сопровождается увеличением объема детали, в то время как на удалении от торца детали распад аустенита не начался, и деталь испытывает только тепловое сжатие.

Для детали типа "спутник" видно, что полученная структура в основном состоит из карбида и феррита, и только на поверхности зубьев спутника образуется мартенсит. Это объясняется тем, что при закалке детали в воде скорость охлаждения большинства точек ниже критической.

Таблица 2. Микроструктура образца на прокаливаемость

Расстояние от торца, мм	Микроструктура
0	Мартенсит и участки феррита (эксперимент) Мартенсит и бейнит (модель)
1,5	—
3,0	Троостомартенсит и участки феррита (эксперимент) Мартенсит и бейнит (модель)
4,5	Сорбит и феррит (эксперимент) Перлит и феррит (модель)
9,0	—
16,5	Перлит сорбитообразный и феррит, зерно № 8,7 ГОСТ 5639-82 (эксперимент) Перлит и феррит (модель)

Таблица 3. Микроструктура детали типа «спутник»

Расстояние	Микроструктура
От торца зубьев по зубчатому венцу ~13 мм	Слаботравящийся мартенсит среднегольчатого строения (эксперимент) Мартенсит (модель)
От вершины зуба ~7 мм	—
От внутреннего диаметра ~2 мм	—
От впадины зубьев ~2 мм	—
Сердцевина	Троостомартенсит в виде отдельных участков мартенсита и троостита с весьма незначительным количеством феррита (эксперимент) Карбид и феррит (модель)

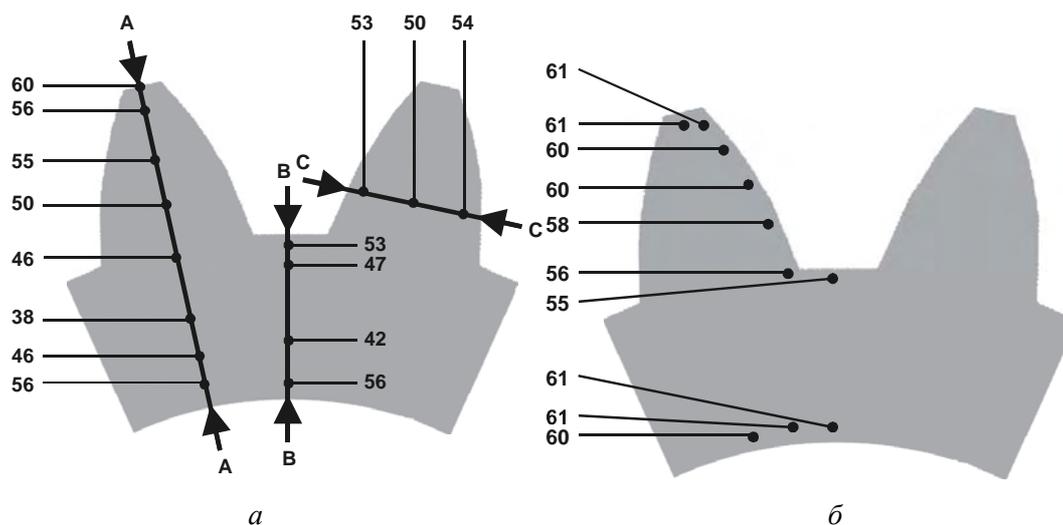
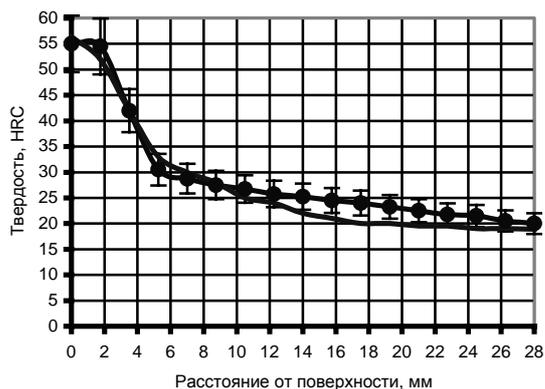
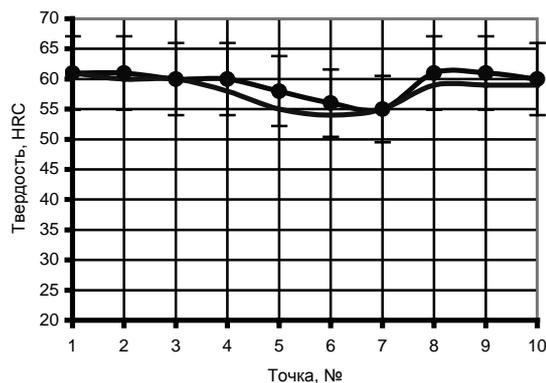


Рис. 4. Схема и результаты измерения твердости (HRC): на вершине зубьев (а); по сечению зубчатого венца (б)



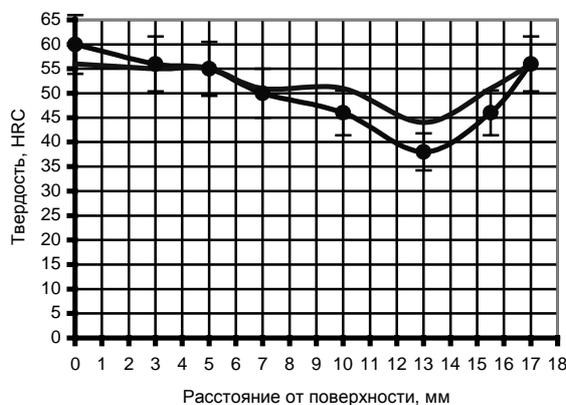
● Эксперимент — Модель

*a*



● Эксперимент — Модель

*б*



● Эксперимент — Модель

*в*

Рис. 5. Распределение твердости: на поверхности от торца (для образца на прокаливаемость) (*a*); по контуру зубьев и шлиц А (для детали типа "спутник") (*б*); в сечении А-А (для детали типа "спутник") (*в*)

Из результатов моделирования (рис. 5,*a*) следует, что распределение фаз в объеме детали вызывает различное распределение твердости. В частности, там, где аустенит перешел в мартенсит, наблюдается наибольшая твердость. По мере удаления от торца твердость понижается, так как в этих сечениях при фазовых превращениях аустенит превращался в феррит и перлит. Установлен также характер влияния скорости охлаждения в сечении детали на фазовые превращения и результирующую твердость, что позволяет оптимизировать процессы закалки.

### Заключение

С помощью программного комплекса ThermoSim разработаны конечно-элементные модели, проведены исследование теплофизических процессов, протекающих при торцевой закалке образца на прокаливаемость и закалке погружением в воду детали типа "спутник", и экспериментальная верификация результатов моделирования.

Показано, что результаты моделирования температуры и твердости находятся в доверительном интервале экспериментальных измерений, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанных моделей реальному процессу.

Разработанный программный комплекс может применяться в производстве для оптимизации технологических режимов закалки и конструкций разрабатываемых деталей без применения дорогостоящих разрушающих и неразрушающих методов контроля.

## COMPUTER SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE QUENCHING PROCESS

S.P. KUNDAS, B.A. TONKONOGOV, I.A. GISHKELYUK, P.S. GURCHENKO

### Abstract

The questions of computer simulation, verification and analysis of thermalphysic processes, which take place in metal parts during quenching, are examined. Using program complex ThermoSim the quenching analysis for the: 1) hardenability specimen; 2) part of "satellite" type were carried out. The influence of the quenching mode on the temperature, a phase fraction, deformation, stress and hardness distribution was determined.

### Литература

1. Кундас С.П., Тонконогов Б.А., Кашко Т.А., Гринчик Н.Н. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч.2. Мн.: БГУИР, 2003.
2. Кундас С.П., Тонконогов Б.А., Лемзиков А.В. и др. // Грузовик& строительные и дорожные машины. 2003. № 4. С. 29–31.
3. Тонконогов Б.А., Гишкелюк И.А., Левашкевич Я.С., и др. // Изв. Белорус. инж. акад. 2002. №1(13)/2. С. 255–258.
4. Гурченко П.С. Упрочнение при индукционном нагреве и управляемом охлаждении. Г.: ИММФ НАНБ, 1999.