

УДК 621.74:
669.14

M.I. Terentev
O.A. Broytman
E.E. Chikina
A.V. Monastyrskiy

Аннотация

Summary

Методика разработки технологии заковки заготовок из литейных и деформируемых сталей с использованием компьютерного моделирования Technique of quenching technology development for parts from cast and wrought steels based on computer modeling

М.И. Терентьев, О.А. Бройтман, Е.Е. Чикинова, А.В. Монастырский
«СиСофт Девелопмент» (Москва), «Термаль» (Санкт-Петербург)

В статье показан способ анализа процессов термообработки стальных заготовок с предсказанием механических свойств и микроструктуры с помощью моделей, реализованных в составе системы компьютерного моделирования «ПолигонСофт». На примере выполнения автоматизированной разработки технологии заковки с отпуском при подготовке выпуска нового вида продукции продемонстрирована методика настройки инструмента моделирования под условия имеющегося термического производства и общий ход проведения расчетного исследования.

Ключевые слова

Моделирование термообработки, сталь, заковка, отпуск, механические свойства, микроструктура.

The article describes a method to analyze the heat treatment processes of steel parts and predict mechanical properties and microstructure based on models implemented into the PolygonSoft computer simulation software. A technique for adjusting the modeling tool to the conditions of the existing heat treatment facility and overview of the computational study are demonstrated using the case of computer-aided development of quenching and tempering technology for new part.

Key words

Modeling of heat treatment, steel, quenching, tempering, mechanical properties, microstructure.

Введение

Наличие теплового решателя в составе системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) – базовое условие обеспечения возможности численного моделирования процессов формирования отливок. Эта

особенность СКМ ЛП обычно позволяет решать с их помощью различные задачи теплообмена, в том числе выходящие за рамки специфики металлургического производства. В частности, развитой и поддающийся гибкой настройке тепловой решатель СКМ ЛП «ПолигонСофт» позволяет

выполнять анализ изменения температур в телах, находящихся в статическом или динамическом контакте, взаимодействующих с окружающей средой и соседними телами посредством лучистой и конвективной теплопередачи, учесть протекающие при этом превращения в материале и т.д. Такие возможности настройки теплового решателя, в том числе с подключением решателя для анализа напряженно-деформированного состояния, позволяют выполнять соответствующий сопряженный численный анализ условий проведения термобработки (ТО).

Само по себе наблюдение температур, напряжений и деформаций в заготовке уже является ценной информацией для технолога-термиста, но недостаточной для однозначной интерпретации и вывода об исходе ТО. Естественным развитием СКМ ЛП «ПолигонСофт» на этом фоне стало включение в его состав модуля расчета структуры и свойств металлических заготовок по результатам ТО, что позволяет замкнуть цикл численного анализа автоматическим прогнозом ее конечного результата – наряду с визуализацией возможных дефектов в виде трещин и отклонений размеров сверх разрешенных допусками выдать распределение непосредственно характеристик микроструктуры и механических свойств. Сравнение прогнозируемых значений с изложенным в технических требованиях к продукции позволяет принять решение о возможности запуска технологии ТО на практике либо необходимости внесения изменений с повторной проверкой посредством моделирования во избежание брака или с целью оптимизации.

Интеграция инструмента моделирования ТО в процесс технологической разработки, как и всегда в подобных случаях, требует определенных адаптационных мер. При этом целесообразно использовать накопленный на предприятии опыт выпуска продукции термического производства, зарегистрированный в виде измеренных характеристик структуры и свойств в деталях разной конфигурации и массы, для настройки СКМ таким образом, чтобы обеспечить корректную постановку задачи и ввод адекватных исходных данных при анализе условий ТО планируемых к запуску новых видов продукции. Методика такой настройки должна быть эффективной, позволяющей в полной мере

учесть индивидуальные особенности реализации технологического процесса на имеющемся производственном оборудовании.

Численный анализ условий ТО и модель для прогноза структуры и свойств

Моделирование ТО средствами «ПолигонСофт» осуществляется с использованием конечно-элементной (КЭ) 3D-модели стальной заготовки. Ключевые данные об изменении распределения температур в объеме заготовки извлекаются посредством численного решения уравнения нестационарной теплопроводности с граничными условиями, задаваемыми в соответствии с нахождением заготовки на том или ином этапе процесса (нагрев, охлаждение, контакт с соседними заготовками, оснасткой, местное воздействие и т.п.).

Хорошую точность прогноза структуры и свойств по результатам ТО способны обеспечить статистические модели, базирующиеся на представительной выборке. В составе модуля ТО доступна подобная модель, построенная на основе расчетной методики «Крезо-Луар» (по наименованию компании-разработчика) [1, 2]. Эта методика включает:

- модель распада аустенита, в соответствии с которой рассчитывается микроструктура и твердость по завершении полиморфного превращения при охлаждении стали;
- модель отпуска, по которой вычисляется поле твердости по завершении операции.

Методика пригодна для анализа процессов ТО, включающих нагрев до температуры аустенитизации и последующее охлаждение (условия выполнения отжига, нормализации, закалки), а также при нагреве и выдержке для проведения высокого отпуска. В дополнение к вычислению твердости и характеристик микроструктуры при моделировании ТО доступен основанный на использовании статистических моделей расчет временного сопротивления σ_b , условного предела текучести $\sigma_{0.2}$ и относительного удлинения δ_5 .

Расчеты по изложенной модели могут быть проведены для низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и низколегированных сталей с содержанием легирующих элементов согласно приведенному в табл. 1.

Таблица 1

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Mn+Ni+Cr+Mo
% масс.	0,1...0,5	≤1,0	≤2,0	≤3,0	≤4,0	≤0,5	≤1,0	≤0,2	≤5,0

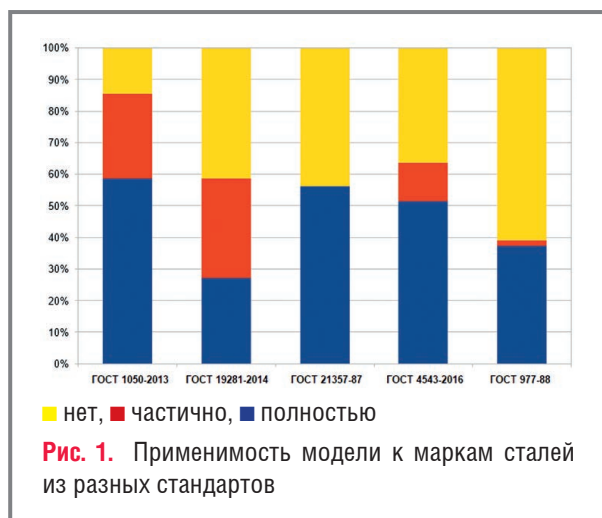


Рис. 1. Применимость модели к маркам сталей из разных стандартов

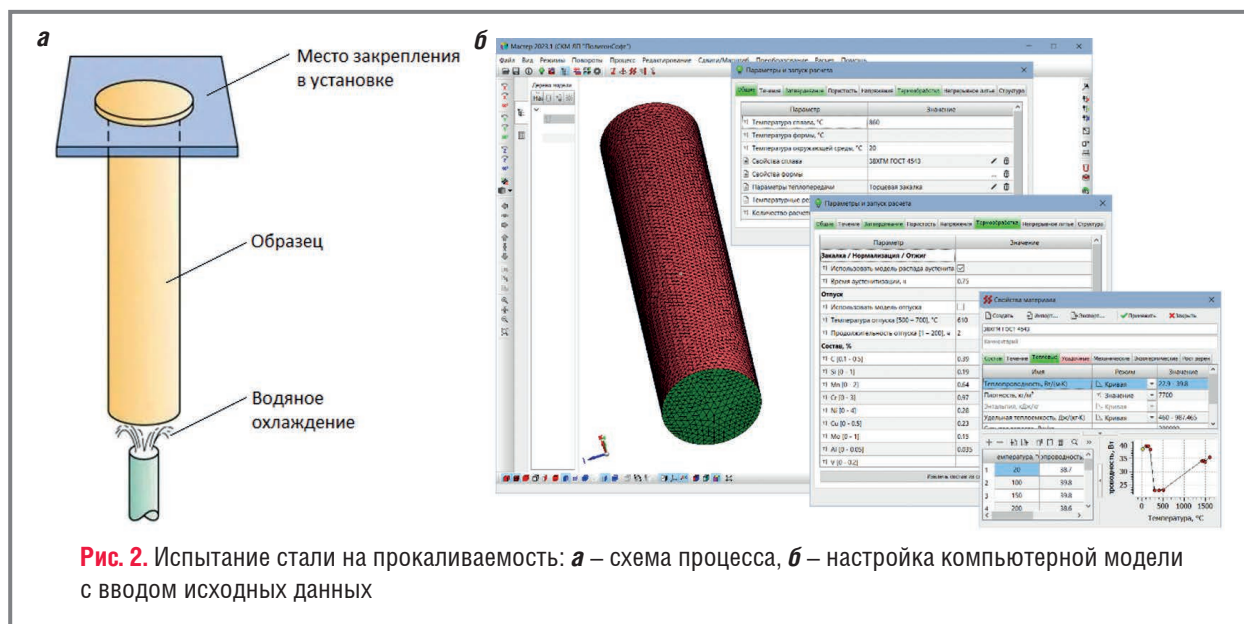
На рис. 1 дано схематическое обобщение применимости модели по отношению к химическим составам сталей всех марок, включенных в следующие отечественные стандарты на металлопродукцию:

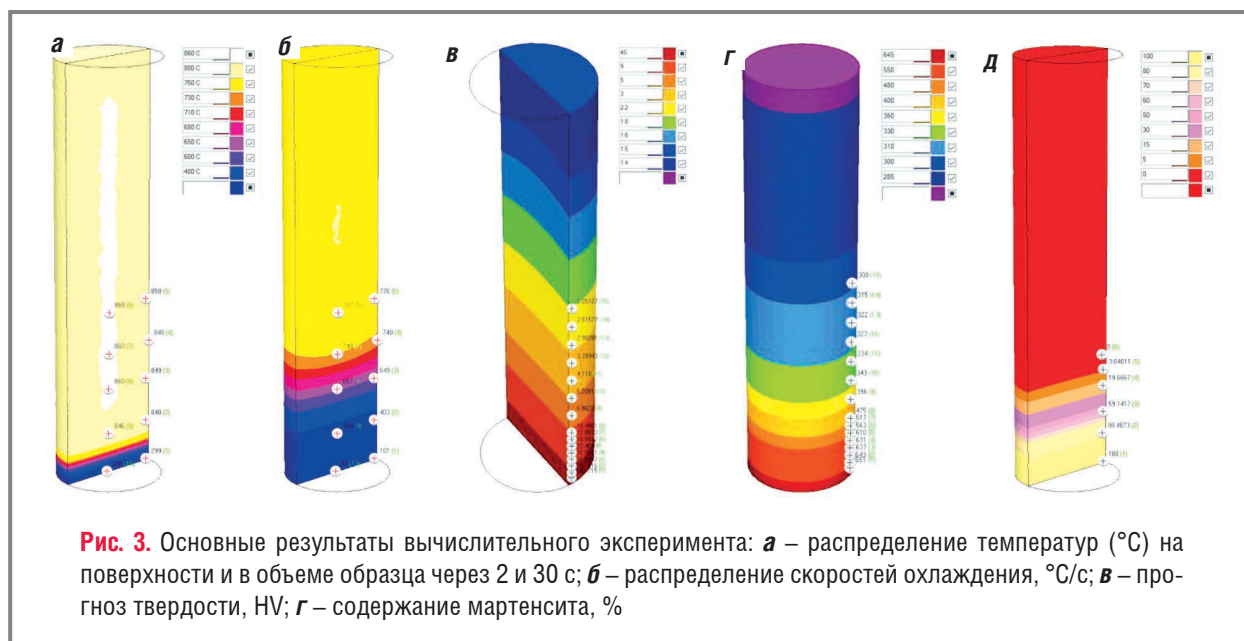
- ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия»;
- ГОСТ 19281-2014 «Прокат повышенной прочности. Общие технические условия»;
- ГОСТ 21357-87 «Отливки из хладостойкой и износостойкой стали. Общие технические условия»;
- ГОСТ 4543-2016 «Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия»;
- ГОСТ 977-88 «Отливки стальные. Общие технические условия».

При построении диаграммы использовали следующий принцип (см. легенду): «нет» – содержание хотя бы по одному химическому элементу находится вне допустимого диапазона; «частично» – хотя бы для одного элемента наблюдается лишь частичное вхождение в диапазон; «полностью» – диапазоны по всем химическим элементам находятся внутри области допустимых значений.

Порядок выполнения расчетного анализа и способ визуализации результата может быть продемонстрирован на примере вычислительного эксперимента, имитирующего испытание на прокаливаемость (рис. 2, а) согласно ГОСТ 5657-69 «Сталь. Метод испытания на прокаливаемость» методом торцевой закалки (по Джомини) стали 38ХГМ по ГОСТ 4543-2016. При расчетах (рис. 2, б) используется геометрическая КЭ-модель стандартного цилиндрического образца $\varnothing 25$ мм, высотой 100 мм. Сопряженный анализ тепловых процессов и превращения структуры с формированием комплекса механических свойств требует ввода негеометрических данных в виде теплофизических свойств стали, фактического химического состава стали в плавке и непосредственно отражающих условия нагрева под закалку и ее проведения: температура, время изотермической выдержки, граничных условий на разных участках (форсированное водяное охлаждения на торце и воздушное на прочих поверхностях).

По результатам расчетов появляется возможность наблюдать изменение во времени поля температур в образце от первоначальных 860°C, поле скоростей охлаждения по его объему





(рис. 3, а, б), распределение структуры и свойств стали. Учитывая постановку задачи, основным предметом рассмотрения является прогноз твердости под поверхностным слоем по высоте образца (рис. 3, в).

Микроструктура сплава определенного химического состава объясняет происхождение его свойств, поэтому при анализе результатов целесообразно рассматривать эти виды прогноза совместно. К примеру, в прилегающем к торцу участке, претерпевшем охлаждение при экстремальных

скоростях, наблюдается относительно низкий разброс твердости с учетом высокой доли мартенсита либо его содержанием 100% (рис. 3, г).

На рис. 4 результат расчета твердости представлен при помощи встроенного в СКМ инструмента для построения графиков в виде кривой прокаливаемости, сопоставленной с имеющимися экспериментальными данными для стали исследованного состава. Показано также распределение твердости по высоте, выявленное при моделировании отпуска закаленного образца. Подобное мероприятие не является частью стандартных испытаний, однако может применяться технологами для оценки влияния отпуска по определенному режиму на конечные свойства в заготовке в связи с разными исходными значениями твердости.

Максимальная относительная ошибка прогноза значений твердости закаленного образца составляет менее 10%, закаленного и отпущенного – около 6%. Показанный результат подтверждает удовлетворительную достоверность прогноза при использовании внедренной модели.

При выполнении ТО возможно образование дефектов в виде трещин, коробление, нарушение размерной точности. Выполнение анализа напряженно-деформированного состояния в цикле моделирования позволяет на этапе разработки технологии исследовать результативность тех или иных мер по снижению склонности к образованию перечисленных несоответствий. На рис. 5 показаны некоторые результаты таких расчетов для условий закалки в масле заготовки вала из стали 40X.



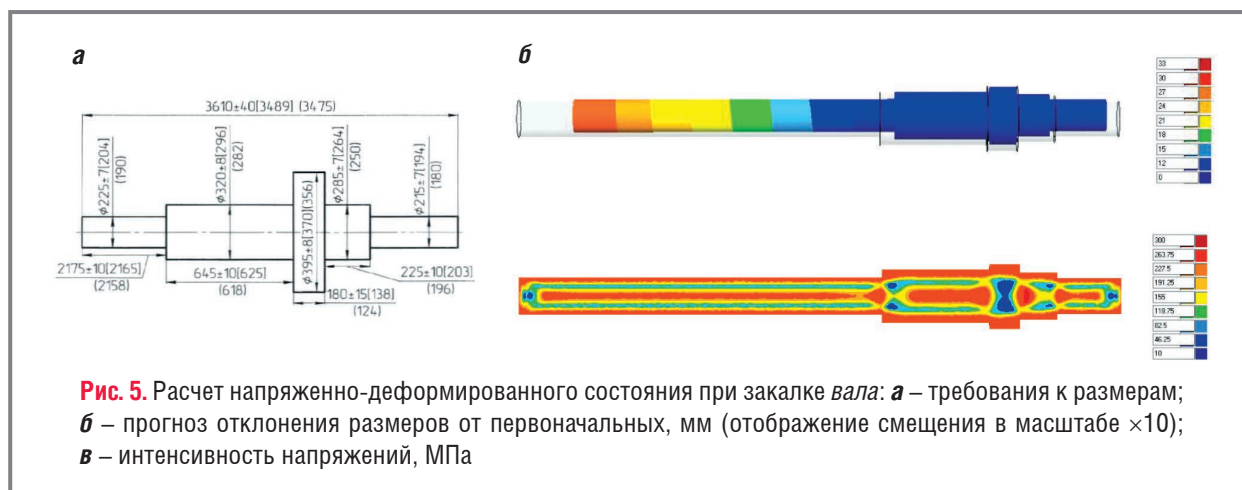


Рис. 5. Расчет напряженно-деформированного состояния при закалке вала: **а** – требования к размерам; **б** – прогноз отклонения размеров от первоначальных, мм (отображение смещения в масштабе $\times 10$); **в** – интенсивность напряжений, МПа

Адаптация инструмента моделирования к условиям имеющегося производства и расчетный анализ ТО нового вида продукции

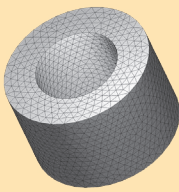
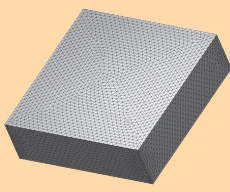
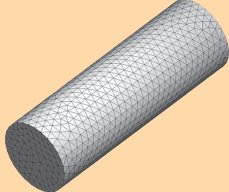
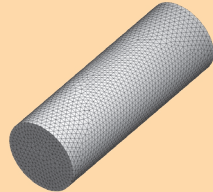
Для достижения повышенной точности расчетного прогноза структуры и свойств металлических заготовок по результатам ТО при интеграции соответствующего инструмента анализа в процесс технологической разработки надлежит выполнить ряд адаптационных мероприятий. Часть таких мероприятий вполне очевидна: обучение персонала технологического отдела владению СКМ, модификация IT-инфраструктуры с учетом появления нового цифрового инструмента, индивидуальное совершенствование встроенной базы данных по свойствам сплавов и другим применяемым на производстве материалам, обновлений стандартов предприятия в части инструкций, регламентирующих порядок разработки с использованием численных расчетов, и др. В качестве отдельной группы работ по адаптации следует выделить верификацию результатов расчетов при использовании имеющегося опыта выпуска продукции термического производства с последующим принятием мер по минимизации расхождения прогноза с практикой. По результатам такого вида «тонкой настройки» в дальнейшем удастся учесть в том числе не вполне очевидные особенности функционирования оборудования и реализации процессов на производстве, включив соответствующие поправки в необходимые ко вводу в качестве исходных данных параметры численных моделей.

Рассмотрим ситуацию, соответствующую описанным условиям. На производстве имелись накопленные данные о режимах ТО и механических свойствах закаленных и отпущенных заготовок из сталей разных марок. Требовалось при помощи

СКМ разработать, а затем освоить на имеющихся мощностях выполнение ТО для новой заготовки из стали новой марки, чтобы выбранные режимы закалки с отпуском позволили обеспечить требуемые механические свойства. Данные о геометрических параметрах заготовок, режимах закалки и отпуска, механических свойствах представлены в **табл. 2**, фактический химический состав металла в плавках – в **табл. 3**. Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84, вырезку образцов для испытаний надлежало производить из 1/3 радиуса от поверхности для деталей цилиндрической формы и из половины толщины стенки для деталей типа пластин и полых цилиндров. Среди перечисленного деталь *кольцо* из стали 36Х2Н2МФА являлась новым видом продукции, для которой необходимо при помощи моделирования разработать подходящий режим ТО.

Кольцо выделяется своими габаритами на фоне подборки ранее освоенных деталей – в общем случае предпочтительно было бы исследовать условия изготовления сугубо однотипной продукции. Последнее, однако, не всегда возможно. Рассматриваемый случай подходит для сравнительного анализа в связи с довольно близкими объемно-массовыми характеристиками заготовки нового типа и садки заготовок, на которых имеется практический опыт выполнения ТО. Состав и качество закалочной среды те же, закалка будет проводиться в той же самой закалочной ванне. В силу перечисленного, можно принять, что условия охлаждения новых деталей будут подобны тому, как это происходило с прежде выпущенными, что означает идентичность коэффициента теплоотдачи α на границе металл – закалочная среда. С учетом экстремальных скоростей охлаждения при закалке, исход

Таблица 2

Плавка	1	2	3	4			
Наименование	Кольцо	Плита	Вал 1	Вал 2			
Конфигурация (3D КЭ модель)							
Происхождение	Поковка		Сортовой прокат				
Материал, размеры и масса							
Марка стали	36Х2Н2МФА	40Х	18ХГТ	40Х			
Габариты, мм	530×530×340	30×100×100	56×56×170	60×60×170			
Толщина стенки, мм	115	30	Ø56	Ø60			
Масса, кг	400,1	2,4	3,3	3,8			
Параметры ТО (закалка с отпуском)							
Температура нагрева под закалку, °С	860	870	880	870			
Время аустенитизации, мин	–	150	150	150			
Закалочная среда	Масло	Масло					
Температура отпуска, °С	–	520	240	580			
Время выдержки при отпуске, мин	–	270	270	270			
Среда охлаждения после отпуска	Воздух	Вода					
Механические свойства							
	Требование	Фактические					
Направление волокна образцов	танг.	попер.		прод.		прод.	
σ _{0,2} , МПа	680...820	625	678	595	490	541	583
σ _в , МПа	≥830	853	875	862	765	744	793
δ ₅ , %	–	20,3	16,0	19,3	20,0	19,3	24,7

численного расчета весьма чувствителен именно к введенному коэффициенту теплоотдачи, поэтому использование адекватного его значения является ключевым условием обеспечения удовлетворительной точности результата моделирования.

Определение уточненного коэффициента теплоотдачи при закалке в масло в серии

вычислительных экспериментов является в настоящем случае тем самым действием, которое в значительной мере позволит адаптировать компьютерную модель процесса к имеющимся производственным условиям. Здесь и далее при расчетах ТО подключали модель в составе «ПолигонСофт», основанную на методике «Крезолуар».

Таблица 3

№	Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	V	Ti	N
1	36X2H2MФА	0,32	0,25	0,29	0,013	0,010	1,30	1,42	0,11	0,03	0,280	0,100	0,008	0,007
2	40X	0,41	0,23	0,59	0,015	0,011	0,89	0,08	0,07	0,03	0,020	0,004	0,005	0,008
3	18ХГТ	0,20	0,19	0,84	0,021	0,016	1,09	0,10	0,11	0,03	0,021	0,005	0,051	0,009
4	40X	0,40	0,21	0,62	0,017	0,014	0,85	0,07	0,08	0,03	0,010	0,004	0,006	0,008

Использовали простой метод перебора: в соответствии с известными режимами ТО выполняли моделирование закалки и отпуска заготовок, для которых известны получившиеся при этом свойства (плавки 2...4), причем для каждой заготовки рассматривали некоторое число расчетных случаев, в каждом из которых задавали разные коэффициенты теплоотдачи на границе *металл – закалочная среда*. Фиксировали прогнозируемое по результатам каждого расчета временное сопротивление в участках, из которых производится вырезка образцов для натурных испытаний, что позволяет сопоставить вычисленные и полученные на практике значения. В качестве оптимизируемой метрики был выбран корень квадратный из среднеквадратичной ошибки расчета временного сопротивления $RMSE$:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{bi} - \sigma_{bi}^p)^2} \rightarrow \min,$$

где σ_{bi} и σ_{bi}^p – фактическое и расчетное значение временного сопротивления в i -м испытании соответственно; n – число имеющихся значений временного сопротивления (здесь $n = 6$).

Для экономии на числе расчетов и видов анализа целесообразно учитывать имеющиеся знания о поведении сталей в процессе ТО. В частности, в состав анализа ТО заготовки *вала* из стали 18ХГТ включали лишь моделирование закалки, что является вполне допустимым, поскольку низкий отпуск пренебрежительно мало влияет на прочностные свойства сталей, у которых температура начала мартенситного превращения выше температуры отпуска. Для 18ХГТ эта температура составляет $\sim 350^\circ\text{C}$ [3], можно заключить, что отпуск уже частично проходит при охлаждении [4].

На рис. 6 показан график изменения $RMSE$ в связи с изменением α . Получено, что обеспечивающее минимальную ошибку расчета $\alpha = 1000 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, что хорошо соответствует известным диапазонам для условий закалки в масле [5]. Это значение и следует принимать при расчетах ТО новой продукции. В рассмотренном случае выборка

довольно мала, поскольку во многом служит для удобства демонстрации принципа, что объясняет довольно высокое значение минимального $RMSE$. При возможности следует использовать как можно более объемные выборки.

Полный цикл численного анализа условий ТО при изготовлении рассматриваемого нового вида продукции включает:

- расчет нагрева в печи для выявления требуемой продолжительности выдержки;
- моделирование закалки с отпуском с варьированием режимов ТО для выявления диапазона параметров технологического процесса, обеспечивающего необходимые свойства.

Наряду с использованием в тепловых расчетах выверенных коэффициентов теплоотдачи (установленные, например, с привлечением показанной выше методики) следует отметить критичность ввода надежных температурнозависимых теплофизических свойств сплава (подлежат заимствованию из встроенной базы данных СКМ, из литературных источников, могут быть вычислены с привлечением соответствующих сторонних программных инструментов, при возможности установлены в рамках проведения собственной экспериментальной работы).

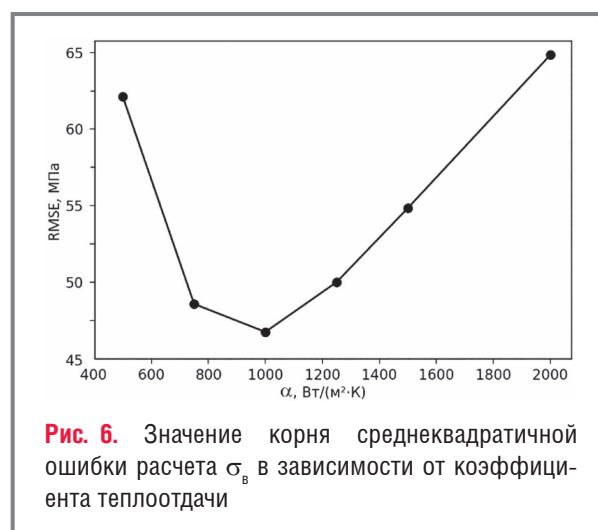
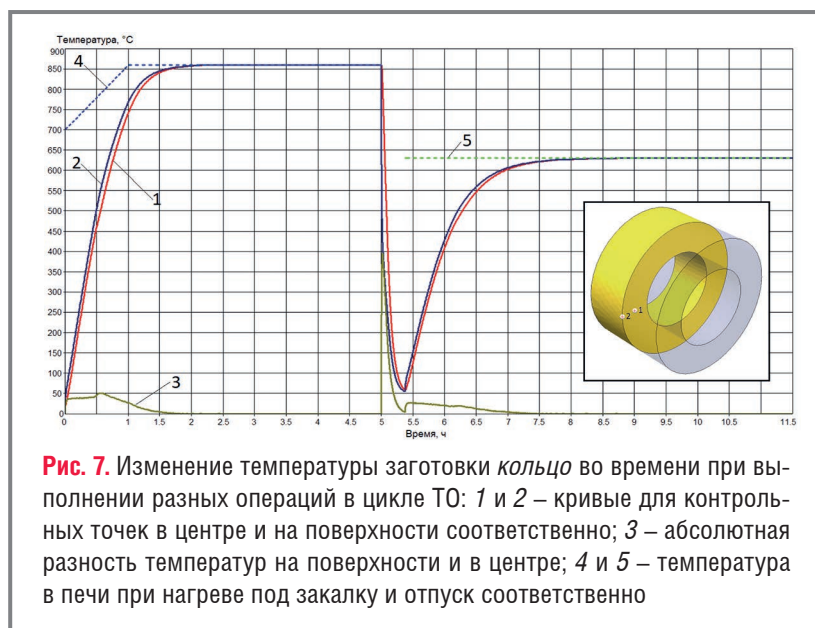


Рис. 6. Значение корня среднеквадратичной ошибки расчета σ_b в зависимости от коэффициента теплоотдачи



Согласно используемой на предприятии технологической инструкции, расчет продолжительности нагрева стальных заготовок необходимо выполнять в соответствии с распространенными эмпирическими зависимостями [6]. При моделировании полного цикла ТО в вопросе выбора продолжительности выдержки при нагреве под закалку и отпуск в основном ориентировались на сложившуюся

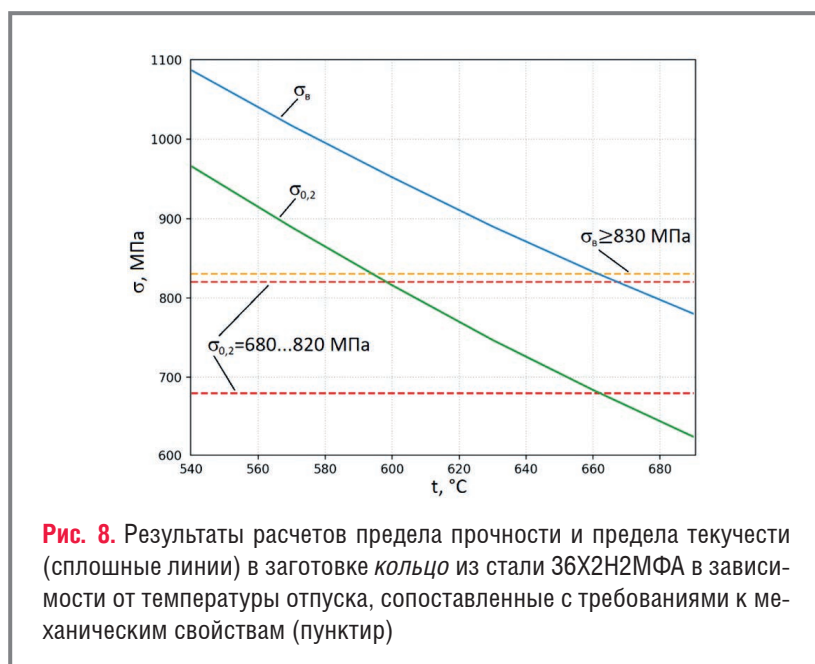
практику, попутно исследуя возможность оптимизации.

Результаты моделирования нагрева *кольца* под закалку в электрической шахтной печи представлены на **рис. 7** (в виде части цикла ТО). В соответствии с типовым технологическим процессом и рекомендациями для легированных марок сталей посад для нагрева под закалку осуществляется при 650...750°C, затем разогрев

с печью до целевой температуры аустенитизации 860°C, после чего следует изотермическая выдержка. Садка печи состоит из одной заготовки.

Вычисление критической точки завершения аустенитного превращения по разным моделям [7, 8] дает $A_{c3} = 800^\circ\text{C}$. Результаты моделирования нагрева под закалку свидетельствуют о быстром достижении A_{c3} после выхода печи на режим (в общей сложности немногим более 1 ч от посадки заготовки в печь), еще ~1,5 ч требуется на прогрев до температуры аустенитизации с выравниванием температур по сечению. Общее время выдержки принято 4 ч.

Изменение температур в процессе закалки также показано на **рис. 7**. Тепловые расчеты были совмещены с анализом структуры и свойств при выполнении закалки и отпуска. Основным предметом расчетного исследования явилось установление подходящей температуры отпуска посредством ее варьирования в серии расчетов. На **рис. 8** представлена номограмма, суммирующая результаты полученных таким путем прогнозов характеристик механических свойств σ_b и $\sigma_{0,2}$ (в участке кольца, из которого производится вырезка образцов для испытаний) для разных температур отпуска. Из показанного очевидно, что для обеспечения комплекса требуемых свойств необходимо выполнять отпуск при 600...660°C. Приняв необходимость запаса по временному сопротивлению, а также с учетом ожидаемой погрешности модели для прочностных характеристик ~50 МПа (см. **рис. 6**) для опробования целесообразно принять температуру отпуска в суженном диапазоне 620...630°C.



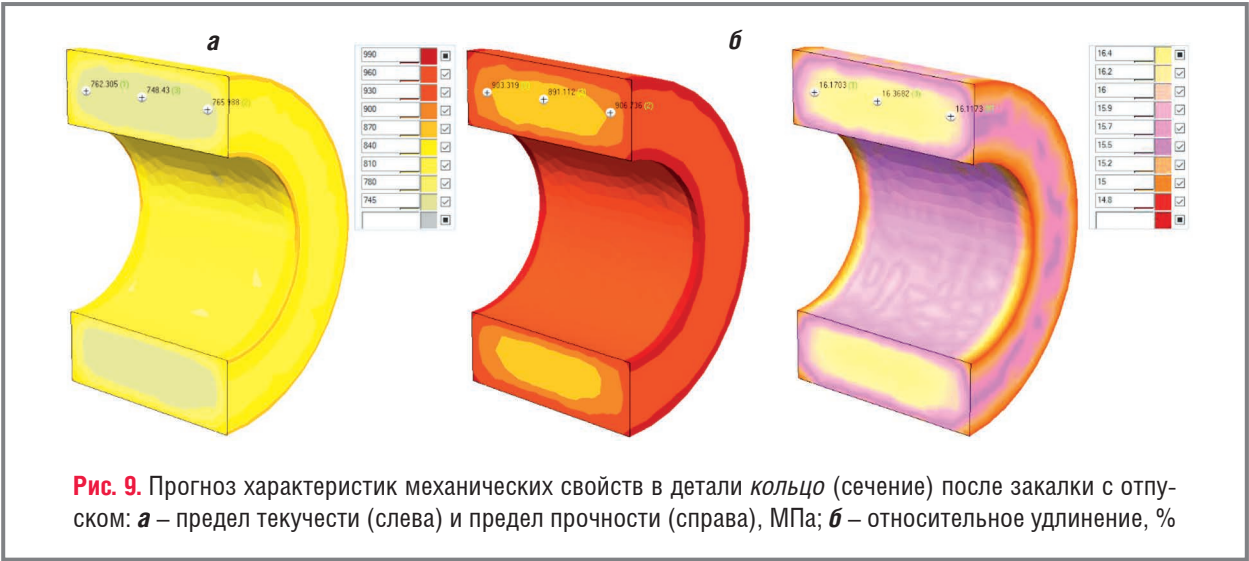


Рис. 9. Прогноз характеристик механических свойств в детали *кольцо* (сечение) после закалки с отпуском: *а* – предел текучести (слева) и предел прочности (справа), МПа; *б* – относительное удлинение, %

Установленный таким образом режим отпуска представлен в результирующем расчетном температурно-временном цикле на **рис. 7**. Выравнивание температур по сечению заготовки и достижение температуры отпуска происходит спустя ~4 ч после посадки в печь. Время нахождения в печи от момента посадки принято 6,5 ч.

По результатам моделирования температурно-временных циклов ТО следует предположить необходимость проведения расчетно-экспериментальной работы на производстве для уточнения подхода к назначению режимов нагрева и их оптимизации.

Разработанный при помощи моделирования процессов ТО режим выполнения закалки с отпуском был реализован на практике. В **табл. 4** даны его основные параметры, а также измеренные механические свойства по результатам натурных испытаний образцов, изготовленных из материала детали *кольцо*, отобранного в подлежащей контролю зоне. Результат расчета распределения механических свойств во всем объеме детали (т.е. в образцах, которые могут быть изготовлены из стали в разных участках) проиллюстрирован **рис. 9**. Показано хорошее соответствие расчета натуре.

Наблюдаемая ошибка прогнозных значений свидетельствует об удовлетворительной точности моделирования, успешности предпринятых мер по адаптации к имеющимся условиям термического производства в приложении к исследованному сегменту продукции, в частности, достаточности использования установленного при этом постоянного значения коэффициента теплоотдачи.

Анализ результатов прогноза микроструктуры термообработанного *кольца* позволяет пояснить причину формирования того или иного уровня механических свойств на разных этапах протекания процесса (**рис. 10**). В общем случае целесообразно сочетать анализ результатов расчетов микроструктуры, свойств и поля скоростей охлаждения в объеме заготовки, которое, в свою очередь, может быть соотнесено с исходом натурных испытаний стали на прокаливаемость, в том числе при помощи встроенных в СКМ средств. По результатам закалки в рассматриваемом случае наблюдается бейнито-мартенситная структура с долей бейнита 50...90% на большей части сечения кольца и высокой долей мартенсита, в среднем ~70%, только у поверхности на ребрах заготовки, где скорости охлаждения максимальны.

Таблица 4

Режим ТО				Механические свойства (отпуск при 630°C)					
Нагрев под закалку		Нагрев под отпуск		$\sigma_{0.2}$, МПа		σ_b , МПа		δ_5 , %	
Температура, °C	Выдержка, мин	Температура, °C	Выдержка, мин	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.
860	240	620...630	390	748	735	891	878	16,4	15,7
Относительная ошибка, %				1,8		1,5		4,5	

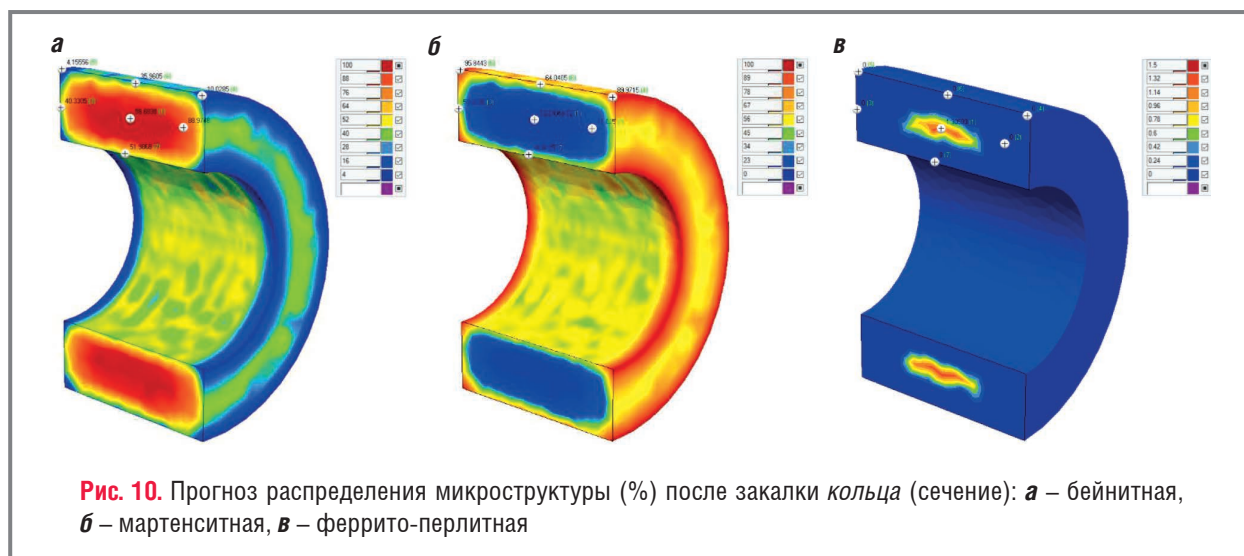


Рис. 10. Прогноз распределения микроструктуры (%) после закалки кольца (сечение): **а** – бейнитная, **б** – мартенситная, **в** – феррито-перлитная

Выводы

Новый инструмент цифрового анализа процессов ТО, дополняющий функционал СКМ «Полигон-Софт», позволяет автоматизировать разработку технологий закалки, нормализации, отжига, отпуска стальных заготовок. Процесс адаптации инструмента к имеющимся цеховым условиям при налаженной трудовой дисциплине довольно прозрачен и подразумевает использование имеющихся записей о режимах ТО и контроле механических свойств и структуры в ранее производившихся деталях. Объем извлекаемых при моделировании данных о протекании процессов ТО и ее исходе заметно превышает обычно доступный по результатам натурных испытаний, что облегчает и ускоряет процесс поиска оптимального технологического решения на производстве, а также представляет ценность при работе над исследовательскими задачами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maynier P., Jungmann B., Dollet J. Creusot-Loire System for the Prediction of the Mechanical Properties of Low Alloy Steel Products, Hardenability Concepts with Applications to Steel // The Metallurgical Society of AIME, 1978, pp. 518–545.
2. Maynier P., Dollet J., Bastien P. Influence des elements d'alliage sur la trempabilite des aciers faiblement allies // Revue de Metallurgie, v. 67, №4, Avril, 1970, pp. 343–351.
3. Попов А.А., Попова Л.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада

переохлажденного аустенита. Справочник термиста. М.: Металлургия, 1965. 495 с.

4. Федин В.М., Ронжина Ю.В., Борц А.И., Вакуленко С.П., Тихонов Д.П., Ушаков Б.К. Термическое упрочнение упругих элементов железнодорожного подвижного состава быстро движущимся потоком воды. М.: ВИНТИ РАН, 2012. 236 с.

5. Smoljan B., Ijckic D., Totten G.E. Mathematical Modeling and Simulation of Hardness of Quenched and Tempered Steel. Metall. Mater. Trans. B, v. 46, 2015, pp. 2666–2673.

6. Фиргер И.В. Термическая обработка сплавов. Л.: Машиностроение, 1982. 304 с.

7. Касаткин О.Г., Винокур Б.Б., Тимошенко В.Л. Расчетные модели для определения критических точек стали // МнТОМ. 1984. №1. С. 20–22.

8. Trzaska J., Dobrzanski L.A. Modelling of CCT Diagrams for Engineering and Constructional Steels // Journal of Materials Processing Technology. 2007. №192–193, pp. 504–510.

Сведения об авторах

Терентьев М.И. – ведущий инженер, АО «СиСофт Девелопмент»

Бройтман О.А. – канд. техн. наук, главный специалист, там же. E-mail: broytman.oleg@csoft.ru

Монастырский А.В. – канд. техн. наук, руководитель отдела, там же

Чикинова Е.Е. – главный технолог, ООО «Термаль»