

На правах рукописи

КУРБАН ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ
ТРУБНОЙ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ
ПО МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.23 - Стандартизация и управление
качеством продукции (металлургия)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск - 2006

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

Актуальность работы. Повышение требований потребителей к качеству готового проката, непрерывное увеличение стоимости сырья, материалов и энергоносителей приводят к интенсивному развитию ресурсосберегающих технологий, которые позволяют получать требуемый комплекс механических свойств горячекатаного проката непосредственно в технологическом потоке. В этих условиях использование передовых информационных технологий становится чрезвычайно важным фактором в управлении технологическим процессом и качеством.

Механические свойства проката являются важнейшими показателями качества. Существующие в металлургических процессах возмущающие воздействия, такие как колебания химического состава стали в пределах одной марки, колебание температурно-деформационных режимов при производстве проката, приводят к изменению механических свойств.

Управлять состоянием сложных технологических систем можно на основании статистических методов, поскольку с их помощью удастся установить неслучайные связи и свойства анализируемых объектов или систем.

Одним из перспективных и необходимых направлений выявления фактических механических свойств проката является проведение механических испытаний, в том числе и неразрушающими методами. В основе последних лежат эффективные способы измерений интересных параметров. Далее применяются адекватные процедуры обработки полученных данных. Естественно, что при этом широко распространен статистический регрессионный анализ, с помощью которого получают математические модели – регрессионные уравнения для различных сортовых групп и марок сталей. Достоинством данного подхода является его четкость и методическая завершенность, отраженная не только в соответствующей учебной и монографической литературе, но и в стандартах.

Однако применение традиционного регрессионного анализа связано и с рядом недостатков:

- регрессионные уравнения рассчитываются для конкретной марки стали, для конкретного сортамента;
- отклонения фактических технологических параметров от базовых могут привести к значительному нарастанию погрешности;
- в регрессионных уравнениях используется относительно огра-

* Работа выполнена при научной консультации профессора, д.т.н. Песина А.М.

ниченное число факторов (в нашем случае 2-6);

- сложные нелинейные зависимости заменяются упрощенными - линейными.

Как показывает имеющаяся информация, эффективной альтернативой статистической обработке экспериментальных данных с помощью регрессионных моделей является применение искусственных нейронных сетей. Это исключительно мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости. Кроме того, нейронные сети справляются с «проклятием размерности», которое не позволяет моделировать линейные зависимости в случае большого числа разнотипных переменных. И в ситуациях, когда сложно построить четкую функциональную зависимость, а исходные данные содержат в себе некоторый «шум», имеет смысл использовать аппарат искусственных нейронных сетей.

Поэтому искусственные нейронные сети все шире применяются как составная часть современных информационных технологий для моделирования и контроля технологических процессов, прогнозирования и улучшения качества выпускаемой продукции.

Цели и задачи исследований. Целью работы является достижение повышенного качества горячекатаной стали при широкополосной прокатке на основе адаптации, регламентации и эффективного использования нейросетевой модели механических свойств продукции.

Указанная цель реализуется решением следующих задач:

- выбор, адаптация и обеспечение адекватности нейросетевых моделей прогнозирования механических свойств;
- нейросетевое прогнозирование механических свойств проката в условиях широкополосного стана 2000 ОАО «ММК»;
- разработка системы воздействия на технологический процесс горячей прокатки для достижения повышенных механических свойств продукции;
- промышленное опробование и внедрение на стане 2000 ОАО «ММК» разработанных мероприятий по повышению качества проката.

Научная новизна заключается в следующем:

- разработаны и адаптированы к условиям широкополосного стана горячей прокатки нейросетевые модели, отличающиеся способностью комплексного прогнозирования механических свойств проката ряда сталей трубных марок (прямая задача) и определения технологических параметров, обеспечивающих требуемые показатели механических свойств (обратная задача);

- с помощью нейросетевого моделирования, отличающегося увеличенным количеством учитываемых факторов и расширенными диапазонами их изменения, установлено влияние технологических параметров и химического состава стали на механические свойства сталей трубных марок и определены соответствующие коэффициенты;
- доказана возможность принципиального усовершенствования системы управления технологией и качеством продукции за счет введения новых блоков прогнозирования технологических параметров для получения заданных механических свойств, а также прогнозирования механических свойств при заданных технологических параметрах.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- повышена эффективность управления качеством горячекатаного листового проката трубных марок сталей;
- разработано оперативное управление технологическим процессом с целью получения продукции заданного качества;
- усовершенствован процесс функционирования системы управления технологией и качеством продукции путем использования в этой системе более эффективных процедур прогнозирования механических свойств и необходимых технологических параметров.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы приняты к внедрению на ОАО “ММК”. Выполненные разработки позволяют управлять технологическим процессом и, как следствие, качеством готовой продукции в режиме реального времени. Разработана и выпущена технологическая инструкция “Неразрушающий метод контроля качества готового проката с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС)”. Разработки по усовершенствованию системы управления технологией и качеством продукции приняты к внедрению в ЛПЦ-10 ОАО “ММК”. Их реализация позволит сэкономить более 2,98 млн рублей в год за счет:

- снижения потерь на сверхнормативные простои железнодорожных вагонов под погрузкой;
- повышения сортности продукции;
- уменьшения рекламаций;
- сокращения расхода металла на изготовление образцов для механических испытаний продукции;
- снижения трудозатрат на испытания;
- ускорения процесса отгрузки и оформления товарно-сопроводительной документации.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на IV Международном конгрессе прокатчиков (Магнитогорск, 16–19 октября 2001 г.); на IV и V школах-семинарах “Фазовые и структурные превращения в сталях” (п. Кусимово, Башкортостан, 2004, 2006 гг.); ежегодных научно-технических конференциях Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова с 2004 по 2006 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Текст диссертации изложен на 164 страницах машинописного текста, иллюстрирован 64 рисунками, содержит 33 таблицы, библиографический список включает 171 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ нормативно-справочной документации, регламентирующей качественные показатели при производстве горячекатаного листового проката. Показано, что следует различать механические свойства готовой продукции и металла, идущего в дальнейшую обработку, т.е. подката. Зачастую последние неизвестны, так как не подлежат обязательному контролю. В связи с этим могут возникнуть ситуации, когда, например, в цехе холодной прокатки появляется необходимость термической обработки подката перед прокаткой, чтобы обеспечить требуемые свойства холоднокатаного металла.

Вообще механические свойства металлопроката в цехах горячей прокатки предлагается классифицировать в зависимости от количества контролируемых параметров по каждой марке стали, подвергающейся горячей прокатке.

Показано, что наибольшее количество контролируемых параметров механических свойств приходится на стали трубных марок, например, 13Г1С-У, 10Г2СФБ, 09ГБЮ и др., а наименьшее – на углеродистые стали обыкновенного качества марок Ст0, Ст3, Ст4, Ст5, 35, 40, 50 и др.

Большинство сталей товарной продукции подлежат обязательному нормированию в среднем по 6-7 параметрам, к которым относятся предел текучести σ_T , временное сопротивление разрыву σ_B , относительное удлинение δ_2 , δ_4 , δ_5 , δ_{10} , а также удлинение δ для базовых длин 50, 80, 100 и 200 мм, ударная вязкость KCU и KCV при различных температурах, изгиб на оправку, твердость HB и HRB, динамическая вязкость тонкой трещины (ДВТТ).

Механические свойства подката по стандартам не являются объек-

том обязательного контроля, за исключением ТУ 14-1-4516-88 “Полоса горячекатаная (подкат) из углеродистой качественной конструкционной стали”, по которым для стали марок 08Ю, 11кп, 11ЮА, 18кп и 18ЮА контролируются σ_b , δ_{10} и δ_4 .

Проведен литературный обзор факторов, влияющих на механические свойства горячекатаных полос. Показано, что среди этих факторов основными являются: химический состав стали, условия нагрева, скорость непрерывной прокатки, температуры конца прокатки и смотки, степень деформации и скорость охлаждения. Перечисленные факторы являются объектом обязательного контроля при осуществлении горячей прокатки.

Выполнен обзор существующих методов прогнозирования механических свойств горячекатаных полос. К основным среди них следует отнести неразрушающие способы контроля, при этом обработку массивов экспериментальных данных ведут методами регрессионного анализа. Однако недостатком последних является то, что полученные на их основе модели действуют в узких диапазонах изменения нормируемых параметров. При нештатных ситуациях, когда возникает сколько-нибудь значимое изменение параметров выборки, регрессионные модели перестают быть адекватными и возникает необходимость в построении новых для обновившихся условий.

Вместо регрессионных методов предлагается использовать нейросетевое моделирование, позволяющее работать при большом диапазоне изменения технологических параметров. Кроме того, к достоинствам нейронных сетей можно отнести и то, что в них заложена возможность к самообучению и самонастройке.

С учетом того, что применение искусственных нейронных сетей является перспективным направлением в обработке металлов давлением и позволит улучшить качество продукции и уменьшить энергозатраты на её производство, были сформулированы цели и поставлены конкретные задачи исследования, представленные выше (см. с. 4).

Во второй главе рассмотрено прогнозирование механических свойств проката в условиях широкополосного стана 2000 ОАО “ММК” на основе нейросетевого моделирования.

Выбраны входные параметры для прогнозирования механических свойств сталей трубных марок с учетом особенностей широкополосного стана 2000 горячей прокатки. Разработана методика сбора информации о значениях входных и выходных параметров для искусственной нейронной сети. При создании информационного массива в выборку включили результаты разрушающих испытаний следующих трубных марок сталей, прокатанных на стане 2000: 10Г2ФБ, 17Г1С, 17Г1СА, 17Г1СА-У, 17Г1С-У, 13Г1С-У. При этом соблюдались следующие правила:

- партии, имеющие нарушения по технологии производства, отбору проб, исключали из массива выборки;
- обеспечивали представительность выборки, для чего максимально охватывали возможные диапазоны изменений технологических факторов. Это достигалось в течение достаточно длительного промежутка времени (не менее полугода) и при объеме выборки не менее 100 партий по каждой марке стали.

Для подтверждения достоверности выборки проводился предварительный анализ исходных данных, при этом вычисляли статистические характеристики:

- среднее арифметическое, дисперсию;
- среднее квадратическое отклонение;
- асимметрию и эксцесс;
- коэффициент вариации;
- стандартную ошибку асимметрии и эксцесса.

Строились частотные распределения, которые должны иметь форму одномодальной куполообразной кривой. При любом другом типе распределения выборка исключается из обработки. Проверялась также стабильность технологического процесса в период, охватываемый выборкой.

В состав выборки вошли 1310 плавок сталей трубных марок (17Г1С-У, 17Г1СА-У, 17Г1СА, 17Г1С, 13Г1С-У, 10Г2ФБ), прокатанных на стане горячей прокатки в период с 2001 по 2005 годы, в том числе 808 плавок сталей 17Г1С-У, 17Г1СА-У, 17Г1СА, 17Г1С, 130 плавок сталей 13Г1С-У и 372 плавки стали 10Г2ФБ.

По критерию Колмогорова проверялось соответствие исходной информации нормальному закону распределения, а при помощи коэффициента вариации выборка проверялась на однородность.

На основании проведенных исследований для прогнозирования механических свойств трубных марок сталей была выбрана нейронная сеть на основе многослойного персептрона и определена его структура.

Принятые входные и выходные параметры представлены в табл. 1.

Для обучения выбранной искусственной нейронной сети был применен алгоритм обратного распространения. Это позволило выбрать нейронную сеть с минимальными значениями ошибок. Структура нейронной сети содержит 16 входных нейронов, по 43 нейрона на первом и втором скрытых слоях и 5 выходных нейронов.

Таким образом, на первом этапе работы была построена искусственная нейронная сеть, которая позволила по известным входным параметрам прогнозировать показатели механических свойств.

В третьей главе проведена проверка адекватности разработанной нейросетевой модели прогнозирования механических свойств сталей трубных марок в условиях стана 2000 ОАО “ММК”.

Параметры нейронной сети

Входной параметр	Выходной параметр
Толщина	Предел текучести σ_T Временное сопротивление разрыву σ_B Относительное удлинение Ударная вязкость: при температуре минус 40°C KCU ⁻⁴⁰ при температуре 0°C KCV ⁰
Содержание химических элементов: C, Si, Mn, S, P, Cr, Ni, Cu, N2, Al, V, Nb, Ti	
Температура конца прокатки $t_{кп}$	
Температура смотки $t_{см}$	

Проверка адекватности проводилась на 37 плавках стали, прокатанной на широкополосном стане 2000 горячей прокатки в период с 11.11.2005 по 16.02.2006 г. Параллельно с определением значений показателей механических свойств сталей трубных марок осуществлялось их сравнение с аналогичными показателями, полученными для стали марки 10Г2ФБ при помощи статистической модели по следующим уравнениям множественной регрессии:

$$\sigma_T = 428,8 - 0,2186t_{см} + 437,28C + 59,2Mn + 392,2Cr + 249,9Ni + 568,0V ;$$

$$\sigma_B = 328,7 + 873,2C + 69,0Mn + 506,5Cr + 398,3Ni + 437,2V ;$$

$$\delta_5 = 34,8 - 42,1C - 291,6S - 15,4Cu - 80,0Nb ;$$

$$KCV^0 = -308,9 - 719,2C + 214,2Mn - 7169,0S - 567,2Ni + 2045,0Al - \\ -1015,9V + 0,3852t_{см} ;$$

$$KCU^{-40} = 345,3 - 564,9C - 8398,5S - 474,5Ni - 1294,5V .$$

Сравнение результатов натуральных испытаний образцов, расчетов, произведенных с применением регрессионных уравнений и нейросетевой модели, представлено в табл. 2.

В разработанной нейросетевой модели коэффициент корреляции составил 0,936 для предела текучести и в среднем 0,83 – для временного сопротивления разрыву, относительного удлинения, ударной вязкости KCU⁻⁴⁰ и KCV⁰.

При прогнозировании механических свойств проката с помощью регрессионного анализа составлялась собственная система уравнений. Разброс коэффициентов корреляции при этом по определяемым параметрам составил от 0,525 до 0,680 для стали марки 10Г2ФБ, от 0,46 до 0,70 –

для сталей 17Г1СА-У, 17Г1СА, 17Г1С-У, 17Г1С и от 0,47 до 0,56 – для стали 13Г1С-У.

Таблица 2

Результаты испытаний и тестов нейросетевой модели для стали 10Г2ФБ

Наименование показателя	Разрушающий метод испытания	Статистический метод			Нейронная сеть		
		Значение показателя	Отклонение, %	Кэф. корреляции	Значение показателя	Отклонение, %	Кэф. корреляции
Предел текучести σ_s , Н/мм ²	455	462	2,0	0,525	449,1	1,3	0,936
Временное сопротивление разрыву σ_b , Н/мм ²	555	562	1,0	0,657	560,9	1,0	0,820
Относительное удлинение δ_s , %	25,5	26	2,0	0,470	25,7	1,0	0,804
Ударная вязкость КСУ ⁻⁴⁰ , Дж/см ²	179	181	1,0	0,560	179,1	0,0	0,870
Ударная вязкость КСВ ⁰ , Дж/см ²	157	118	25,0	0,680	147,5	6,1	0,820

Сравнительный анализ механических свойств проката из трубных сталей, проведенный при помощи нейросетевой модели, и данных, полученных при натурных испытаниях, показал, что ошибка прогнозирования для стали 10Г2ФБ составляет до 6,1%. В то же время отклонение этих показателей по регрессионной модели по отношению к показателям натурных испытаний проката из стали той же марки составило от 2 до 25%.

В итоге выполненный анализ доказал существенные преимущества по точности полученных результатов нейросетевой модели по сравнению с традиционной регрессионной.

В четвертой главе рассмотрен вопрос улучшения механических свойств трубных сталей с использованием искусственных нейронных сетей. Подход к прогнозированию механических свойств, описанный в главе 2, имеет пассивный характер. Он может учитывать последствия изменчивости технологических параметров, но не позволяет управлять процессом с целью получения заданного комплекса механических свойств горячекатаного проката. В реальных металлургических процессах неизбежно существуют возмущающие воздействия, такие как колебания химического состава стали в пределах заданной марки, нестабильность температурно-деформационных режимов прокатки, которые приводят к отклонениям получаемых механических свойств продукции от заданных.

Для преобразования указанного подхода к активному использованию предлагается решить обратную задачу, т.е. по известному плавочно-

му химическому составу стали, размеру проката (толщине) и заданному комплексу механических свойств получить требуемые технологические параметры производства при помощи искусственных нейронных сетей.

Горячая прокатка на непрерывных широкополосных станах – это сложный процесс многократной деформации, во время которого в широком диапазоне меняются температура металла, степень обжатия, скорости деформации и охлаждения полосы. Структура горячекатаного металла и его свойства формируются, в основном, в чистой группе клетей, на отводящем рольганге и при охлаждении.

Основными контролируруемыми параметрами металлопродукции в процессе горячей прокатки являются температуры конца прокатки и смотки рулона. Поэтому для разработки модели, позволяющей прогнозировать параметры технологического процесса для трубных сталей 10Г2ФБ, 17Г1С, 17Г1СА, 17Г1СА-У, 17Г1С-У, 13Г1С-У, были выбраны величины, которые представлены в табл. 3.

В решении задачи прогнозирования температуры конца прокатки и температуры смотки полосы в рулон наилучшие результаты показала обобщенно-регрессионная сеть (GRNN-сеть). GRNN-сети всегда состоят из четырех нейронных слоев: входного слоя, слоя из радиальных центральных элементов, слоя регрессионных элементов и выходного слоя.

Таблица 3

Параметры нейронной сети

Входной параметр	Выходной параметр
Толщина Содержание химических элементов: С, Si, Mn, S, P, Cr, Ni, Cu, N, Al, V, Nb, Ti Предел текучести σ_T Временное сопротивление разрыву σ_B Относительное удлинение δ_5 Ударная вязкость при температуре минус 40°C KCU ⁻⁴⁰ Ударная вязкость при температуре 0°C KCV ⁰	Температура конца прокатки $t_{кп}$ Температура смотки $t_{см}$

Адекватность модели исходным данным и её способность к прогнозированию определяли по значениям ошибок обучения, контрольной и тестовой. Качество работы сети оценивается отношением стандартного отклонения ошибки к стандартному отклонению данных. Это отношение для данного типа сетей должно быть не выше 0,4. В результате исследований была выбрана сеть с минимальными значениями ошибок. В ней отношение стандартного отклонения для температуры конца прокатки составило 0,34, а для температуры смотки – 0,29. Коэффициент корреля-

ции для температуры конца прокатки составил 0,95, а для температуры смотки – 0,96.

Выбранная сеть имеет 19 входов, два выхода и два скрытых слоя. Элементы радиального слоя представляют центры кластеров в обучающих данных. Радиальный слой содержит 1001 радиальный элемент, т.е. по одному на каждое обучающее наблюдение. В регрессионном слое число элементов всегда на единицу больше, чем в выходном. Регрессионный слой состоит из линейных элементов двух типов, представляющих соответственно значение условной регрессии и плотность вероятности для каждой выходной переменной. Выходные элементы делят первые величины на вторые и в результате формируются оценки регрессионных значений.

Обучение нейронной сети проводилось на 1310 плавках стали указанных выше марок. Сеть обучалась с помощью алгоритма K-средних.

Результаты тестирования работы нейросетевой модели, прогнозирующей для сталей трубных марок температуру конца прокатки и температуру смотки полос в рулон с учетом плавочного химического состава, толщины готового проката и требуемых механических свойств, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение расчетных и фактических параметров технологического процесса

Марка стали	$t_{\text{кп}}, ^\circ\text{C}$		Отклонение, %	$t_{\text{см}}, ^\circ\text{C}$		Отклонение, %
	ИНС	факт		ИНС	факт	
17Г1СА	836,3	830	-0,76	568,3	567	0,23
	843,2	845	0,21	576,2	573	0,56
	843,2	845	0,21	554,7	551	0,67
	848,3	852	0,43	580,3	581	-0,12
17Г1СА-У	850,9	848	-0,34	615,1	617	-0,31
	838,0	838	-0,00	621,9	628	-0,97
	861,8	863	0,14	618,8	618	0,13
	852,0	853	0,11	569,3	569	0,05
10Г2ФБ	821,7	821	-0,08	631,9	630	0,31
	813,9	813	-0,12	650,1	650	0,01
	810,9	811	0,01	631,8	632	-0,03
	817,2	815	-0,28	641,2	641	0,04
17Г1С-У	863,1	867	0,44	635,0	639	-0,16
	854,9	857	0,24	605,3	609	-0,61
	853,2	854	0,09	640,9	643	-0,33
	847,6	849	0,17	559,2	556	0,57

Марка стали	$t_{\text{кп}}, ^\circ\text{C}$		Отклонение, %	$t_{\text{см}}, ^\circ\text{C}$		Отклонение, %
	ИНС	факт		ИНС	факт	
13Г1С-У	839,0	833	0,72	657,1	658	-0,14
	847,0	847	-0,00	646,6	658	-1,73
	851,0	851	-0,00	655,9	658	-0,31
	849,1	849	-0,02	650,6	652	-0,22
17Г1С	836,1	836	-0,02	578,9	578	0,15
	849,8	855	0,60	568,4	564	0,78
	834,4	834	-0,05	613,8	615	-0,19
	834,8	828	-0,82	583,5	690	-1,11
Среднее значение			-0,01	Среднее значение		-0,01

Тестирование нейросетевой модели проходило на данных, представленных в выборке, но не использовавшихся в качестве обучающих и контрольных. Отклонение прогнозируемых значений температуры конца прокатки от фактической по тестируемой выборке в среднем составило 0,009%, а значений температуры смотки листа -0,086%.

При помощи разработанных нейросетевых моделей было проведено исследование влияния различных факторов производственных процессов на механические свойства сталей трубных марок. В частности, было рассмотрено влияние плавочного химического состава стали, температуры конца прокатки и температуры смотки рулона на механические свойства трубной стали 17Г1СА-У. Процедура исследования заключалась в следующем: один из указанных параметров изменялся от исходного значения с определенным шагом, а остальные параметры оставались постоянными.

На основе решения нейросетевым методом прямой и обратной задач, в частности, показано, что для стали марки 17Г1СА-У:

- при увеличении содержания углерода от 0,08 до 0,22% временное сопротивление разрыву и предел текучести увеличиваются от 491,22 до 591,70 и от 344,96 до 410,99 Н/мм² соответственно. При этом относительное удлинение снижается от 32,03% при содержании углерода 0,08% до 27,59% при содержании углерода 0,22%. Ударная вязкость КСУ⁻⁴⁰ и КСВ⁰ при том же изменении содержания углерода значительно снижается (со 126,49 до 45,08 и со 129,96 до 43,63 Дж/см² соответственно);
- увеличение содержания кремния в исследуемых пределах (от 0,30 до 0,65%) повышает предел текучести с 375,8 до 395,2 Н/мм², временное сопротивление разрыву – с 552,7 до

- 558,3 Н/мм² и практически не влияет на относительное удлинение. При увеличении содержания кремния в стали с 0,30 до 0,45% несколько снижается ударная вязкость при минус 40°C (КСU⁻⁴⁰), но дальнейшее увеличение содержания кремния в стали приводит к более заметному росту данного показателя (на 12,6 Дж/см²). Увеличение содержания кремния в стали с 0,30 до 0,65% значительно изменяет ударную вязкость КСV⁰ в сторону повышения (на 35,2 Дж/см²);
- увеличение содержания марганца в стали с 1,1 до 1,6% приводит к росту предела текучести с 380,36 до 410,50 Н/мм², а временного сопротивления разрыву – с 548,37 до 568,09 Н/мм². Относительное удлинение при увеличении содержания марганца в стали в исследуемых пределах изменяется незначительно, но на ударную вязкость марганец влияет в значительной степени. Так, увеличение содержания марганца в исследуемых пределах приводит к увеличению ударной вязкости при минус 40°C на 86,8, а при 0°C на 114%;
 - увеличение содержания серы в стали с 0,001 до 0,011% приводит к снижению предела текучести с 394,17 до 386,82 Н/мм², а временного сопротивления разрыву с 561,77 до 548,63 Н/мм². Увеличение содержания серы в стали в исследуемых пределах практически не изменяет относительное удлинение, но заметно снижает ударную вязкость при температурах минус 40°C (на 18,27 Дж/см²) и 0°C (на 21,19 Дж/см²);
 - увеличение содержания фосфора в стали с 0,001 до 0,020% приводит к увеличению предела текучести с 381,99 до 391,86 Н/мм², а временного сопротивления разрыву с 546,18 до 559,31 Н/мм². Относительное удлинение практически не зависит от изменения содержания фосфора в стали в исследуемых пределах. Ударная вязкость КСУ⁻⁴⁰ снижается с 75,4 до 70,5 Дж/см², а КСV⁰ увеличивается с 61,33 до 73,39 Дж/см²;
 - увеличение содержания хрома в стали с 0,008 до 0,070% приводит к увеличению предела текучести и временного сопротивления разрыву соответственно с 383,9 до 405,8 Н/мм² и с 548,1 до 572,9 Н/мм² и к незначительному снижению относительного удлинения. Увеличение содержания хрома с 0,008 до 0,030% привело к слабому снижению значений КСУ⁻⁴⁰ (с 71,49 до 70,26 Дж/см²) и КСV⁰ (с 67,08 до 66,45 Дж/см²) и дальнейшее повышение концентрации хрома в стали до 0,070% приводит к заметному повышению ударной вязкости КСУ⁻⁴⁰ (с 70,26 до 82,58 Дж/см²) и КСV⁰ (с 66,45 до 72,8 Дж/см²);
 - увеличение содержания никеля в стали от 0,02 до 0,06% прак-

- тически не влияет на изменение значений предела текучести, временного сопротивления разрыву и относительного удлинения, но приводит к снижению ударной вязкости при различных температурах (KCU^{-40} на 4,53, а KCV^0 на 10,17 Дж/см²);
- увеличение содержания меди в стали от 0,02 до 0,07% приводит к снижению предела текучести и временного сопротивления разрыву с 390,58 до 386,33 Н/мм² и с 558,76 до 551,94 Н/мм² соответственно и практически не влияет на относительное удлинение, но увеличивает значение KCU^{-40} с 66,84 до 73,41 Дж/см², KCV^0 – с 61,02 до 70,02 Дж/см²;
 - увеличение концентрации азота с 0,003 до 0,010% несколько повышает предел текучести (с 387,90 до 390,06 Н/мм²) и незначительно снижает временное сопротивление разрыву (с 555,3 до 552,2 Н/мм²), а на относительное удлинение практически не оказывает заметного влияния, но приводит к незначительному увеличению ударной вязкости KCU^{-40} (с 70,6 до 71,6 Дж/см²), при этом KCV^0 уменьшается с 66,92 до 64,60 Дж/см²;
 - увеличение содержания алюминия в стали от 0,02 до 0,05% приводит к снижению предела текучести и временного сопротивления разрыву с 393,05 до 385,27 Н/мм² и с 559,46 до 551,83 Н/мм² соответственно. На относительное удлинение алюминий почти не оказывает влияния (изменение от 27,34 до 27,52%), но на ударную вязкость влияние алюминия существенное – KCU^{-40} увеличивается со 130,7 до 174,2 Дж/см², KCV^0 – со 114,6 до 139,4 Дж/см²;
 - увеличение содержания вольфрама в стали от 0,001 до 0,040% приводит к увеличению предела текучести и временного сопротивления разрыву с 349,01 до 400,06 и с 522,99 до 564,60 Н/мм² соответственно и к небольшому снижению относительного удлинения (с 29,46 до 27,14%) и ударной вязкости KCU^{-40} (с 77,59 до 70,81 Дж/см²). Ударная вязкость KCV^0 при увеличении концентрации вольфрама с 0,001 до 0,020% снижается с 68,43 до 64,63 Дж/см², но при дальнейшем повышении концентрации вольфрама повышается до 70,35 Дж/см²;
 - при увеличении содержания ниобия в стали от 0,001 до 0,006% повышается предел текучести с 387,43 до 391,21 Н/мм², временное сопротивление разрыву и относительное удлинение при этом незначительно снижаются. Ударная вязкость при повышении содержания ниобия в стали увеличивает KCU^{-40} с 69,64 до 75,10, а KCV^0 – с 65,25 до 71,72 Дж/см²;
 - увеличение содержания титана в исследуемой стали с 0,001 до

0,007% предел текучести и временное сопротивление разрыву снижает соответственно с 359,33 до 379,95 и с 557,23 до 549,45 Н/мм², а относительное удлинение изменяется в очень малых пределах в сторону увеличения (с 27,13 до 28,0%). Изменение содержания титана в указанных пределах практически оставляет неизменным ударную вязкость КСУ⁻⁴⁰, но незначительно увеличивает КСВ⁰ (с 66,02 до 67,5 Дж/см²).

Полученная обширная информация отличается от известной расширенными диапазонами варьирования основных величин и более высокой точностью результатов.

В пятой главе рассмотрены три уровня систем управления качеством, имеющих некоторые концептуальные различия:

- системы, соответствующие требованиям стандарта ИСО 9000;
- система всеобщего управления качеством – TQM (Total Quality Management);
- системы, соответствующие критериям национальных стандартов.

Существующая информационная система управления технологией производства и качеством продукции состоит из двух уровней: уровня предприятия и уровня цеха.

Уровень предприятия содержит сведенную в единую структуру нормативную информацию по всем охваченным в настоящее время системой технологическим переделам. На этом уровне осуществляется информационное сопровождение баз данных, справочных таблиц и протоколирование всех процессов.

Уровень цеха содержит относящуюся к конкретному переделу нормативную информацию. Уровень отвечает за формирование технологических карт, обеспечение нормативной информацией цеховой системы управления качеством и оперативного персонала цеха.

Подсистема технологического протоколирования создана и работает на основе модуля «Конверт». Особенность подсистемы технологического протоколирования заключается в том, что вся информация о режимах обработки заготовки относится к конкретной части ее объема.

Подсистема контроля качества продукции отвечает за формирование технологического паспорта и паспорта качества.

Технологический паспорт содержит оценку уровня исполнения технологии, регламентируемой внутренними нормативами предприятия. К параметрам технологического паспорта относится, например, температурный режим прокатки металла на стане или режим обжарки.

Паспорт качества включает в себя оценку параметров, регламентируемых нормативным документом, на основании которого производится отгрузка продукции. Оценка всех параметров, входящих в паспорта, про-

изводится на основе технологических протоколов, что позволяет, например, связать место отбора пробы для прямых испытаний с участком полосы, на котором нарушена технология. Все параметры, входящие в паспорт, оцениваются по принципу «доля длины полосы, на которой выдержаны требования нормативного документа». Это позволяет получать количественную оценку любой характеристики продукции и сравнить ее с приемочным числом. Так, например, толщина полосы должна входить в границы допусков не менее, чем на 98% ее длины.

Предложен способ усовершенствования существующей информационной системы (рис. 1). Сущность предлагаемого процесса улучшения системы управления технологией производства и качеством продукции состоит в том, что созданные в данной работе нейросетевые модели прогнозирования механических свойств металлопроката и прогнозирования технологических параметров процесса объединяются в единую модель, которую включают в существующую систему.

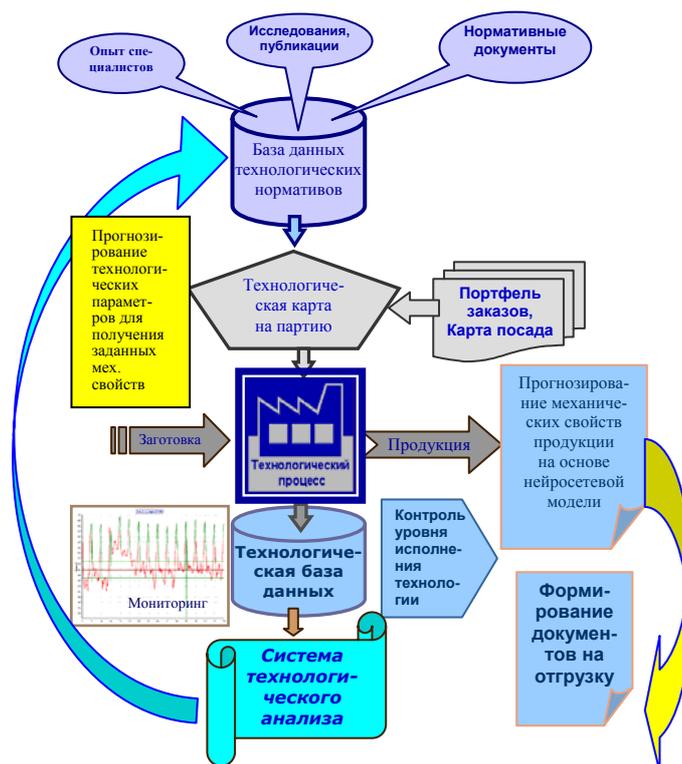


Рис. 1. Усовершенствованная архитектура системы управления технологией и качеством продукции

Полученная модель способна не только прогнозировать механические свойства металлопроката, но и может управлять технологическим процессом его производства с целью получения заданного комплекса механических свойств, а значит, реализовать стратегию предупреждения. Результаты работы приняты к внедрению на ОАО «ММК». Разработана и выпущена технологическая инструкция «Неразрушающий метод контроля качества готового проката с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС)». Разработки по усовершенствованию системы управления технологией и качеством продукции приняты к внедрению в ЛПЦ-10 ОАО «ММК». Их реализация позволит сэкономить более 2,98 млн рублей в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Разработана и адаптирована к условиям широкополосного стана 2000 ОАО «ММК» нейросетевая модель прогнозирования механических свойств проката из сталей трубных марок 10Г2ФБ, 17Г1С, 17Г1СА, 17ПСА-У, 17Г1С-У, 13Г1С-У (прямая задача). При моделировании получены коэффициент корреляции для предела текучести 0,936, для временного сопротивления разрыву, относительного удлинения δ_5 , ударной вязкости KCU^{40} , ударной вязкости KCV^0 – в среднем 0,83.

2. Разработана и адаптирована к условиям широкополосного стана 2000 ОАО «ММК» нейросетевая модель определения технологических параметров, обеспечивающих требуемые показатели механических свойств (обратная задача). Погрешность при моделировании не превышает, %: 1,47 для временного сопротивления; 0,74 для предела текучести; 0,68 для относительного удлинения; 2,44 для ударной вязкости KCU^{40} и 16,37 для ударной вязкости KCV^0 .

3. На основе моделирования с использованием разработанных искусственных нейронных сетей получили комплекс количественных результатов, которые показывают влияние химического состава стали и основных технологических параметров на показатели механических свойств проката. Варьируемыми по содержанию химическими элементами являлись: углерод, марганец, сера, кремний, фосфор, хром, никель, медь, алюминий, азот, ванадий, ниобий, титан. К изменяемым технологическим параметрам относились толщина полосы, температура конца прокатки и температура скотки.

4. Найденные зависимости трансформировали во взаимосвязи в приращениях, дающие возможность найти комплекс соответствующий

щих нелинейных коэффициентов влияния варьируемых параметров на показатели механических свойств. Эта информация является необходимой составной частью для построения системы управления последними.

5. Анализ полученной обширной информации о разнообразных влияниях на механические свойства широкополосной горячекатаной стали показал, что эта информация отличается от известной расширенным диапазоном варьирования основных величин и более высокой точностью результатов.

6. Усовершенствован процесс функционирования системы управления технологией и качеством продукции путем использования в ней разработанных более эффективных процедур прогнозирования механических свойств и необходимых технологических параметров. Это достигнуто путем синтеза в единую модель решений прямой и обратной задач с использованием предложенных искусственных нейронных сетей.

7. Для обеспечения процесса внедрения результатов работы подготовлена необходимая нормативно-технологическая документация "Инструкция о порядке разработки, внедрения и применения контроля качества готового проката с использованием искусственных нейронных сетей" и дополнение в СТП.

8. Разработки по усовершенствованию системы управления технологией и качеством продукции приняты к внедрению в ЛПЦ-10 ОАО "ММК". Их реализация позволит сэкономить более 2,98 млн рублей в год за счет снижения рекламаций и ускорения процесса отгрузки.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Принципы математического моделирования механических свойств проката на стане 2000 горячей прокатки с использованием нейронных сетей / В.В.Курбан, В.М.Салганик, А.М.Песин, Е.В.Карпов // Труды четвертого конгресса прокатчиков (Магнитогорск, 16–19 октября 2001 г.) Т.1. М., 2002. С. 139-142.

2. Принципы математического моделирования механических свойств проката на стане 2000 горячей прокатки с использованием нейронных сетей. Сравнительный анализ методов прогнозирования / В.В.Курбан, В.М.Салганик, А.М.Песин, Е.В.Карпов // Фазовые и структурные превращения в сталях: Сб. науч. тр. Вып. 2 / Под ред. В.Н. Урцева Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2002. С. 414-423.

3. Развитие систем управления качеством продукции на ММК / А.А.Морозов, Ф.В.Капцан, В.Н.Урцев, К.А.Лисичкина, В.Л.Корнилов, В.В.Курбан // Сталь. 2005. №5. С. 53-55.
4. Корпоративная система нормативно-справочного сопровождения / Г.С.Сеничев, И.В.Виер, В.В.Курбан, Ф.В.Капцан, В.Н.Урцев, А.В.Фомичев // Сталь. 2005. №5. С. 120-121.
5. Совершенствование системы управления НСИ в ОАО “ММК” / С.Н.Рахимов, В.В.Курбан, Ф.В.Капцан, И.В.Виер // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации: Сборник трудов Всероссийской науч.-техн. конф. Вып. 1. / Под ред. Д.Х.Девятова. Магнитогорск: ИПЦ ООО “Проф-Принт”, 2005. С. 110-114.
6. Курбан В.В., Салганик В.М., Песин А.М. Применение искусственных нейронных сетей для управления качеством горячекатаного листового проката на стане 2000 ОАО “ММК” // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Сборник научных трудов. Магнитогорск: ГОУ ВПО “МГТУ”, 2006. С. 20-26.
7. Нейросетевое прогнозирование механических свойств широкополосной горячекатаной стали / В.В.Курбан, В.М.Салганик, А.М.Песин, Н.Я.Яценко, А.Г.Ветренко // Материалы 64-й научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 2004–2005 гг.: Сб. докл. Магнитогорск: ГОУ ВПО “МГТУ”, 2006. Т.1. С. 22-27.
8. Внедрение систем управления качеством продукции на Магнитогорском металлургическом комбинате / А.А.Морозов, Ф.В.Капцан, В.Н.Урцев, К.А.Лисичкина, В.Л.Корнилов, В.В. Курбан // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации: Сборник трудов Всероссийской науч.-техн. конф. Вып.1. / Под ред. Девятова. Магнитогорск: ИПЦ ООО «Проф-Принт», 2005. С. 9-11.