

УДК 621.771.07:004.94

DOI 10.24412/2413-7383- 2025-2-37-44-58

В. С. Солод

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк,
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118 б

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АРМАТУРНОГО ПРОКАТА

V. S. Solod

Federal State Budgetary Scientific Institution «Institute of Artificial Intelligence Problems»
283048, Donetsk, Artema str, 118-b

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL FOR DEVELOPING AN EXPERT SYSTEM FOR ACCELERATED COOLING OF REINFORCEMENT PRODUCTS

Целью исследования является разработка экспертной системы ускоренного охлаждения арматурного проката в виде искусственной нейронной сети с применением нового метода машинного обучения: использования фундаментального знания для решения практических задач. В качестве фундаментального знания используется физико-математическая модель ускоренного многостадийного охлаждения арматурной стали в потоке прокатного стана.

Указанная модель может применяться как в качестве инструмента для создания обучающего набора данных для обучения искусственной нейронной сети, так и для оптимизации технологии при охлаждении профилей из различных марок стали при возможных изменениях режимов прокатки.

Ключевые слова: закалка, арматурные профили, термоупрочнение, физико-математическая модель, алгоритм, термоустановки

The ultimate goal of the study is to develop an expert system for accelerated cooling of reinforcing steel in the form of an artificial neural network (ANN), using a new machine learning method: using fundamental knowledge to solve practical problems. A physical and mathematical model of accelerated multi-stage cooling of reinforcing steel in a rolling mill flow is used as fundamental knowledge.

This model can be used both as a tool for creating a training data set for training ANN, and for optimizing the technology for cooling profiles from various steel grades with possible changes in rolling modes.

Key words: hardening, reinforcement bars, thermal strengthening, physical and mathematical model, algorithm, thermal facility

Введение

Производство арматуры – это непрерывный процесс с большими объемами. После прокатки заготовки в нужную форму профиля она проходит контролируемый процесс охлаждения для достижения требуемой прочности и других механических свойств. Для этого предназначены автоматизированные системы заковки.

Цель заключается в заковке непрерывной длины арматуры на выходе из прокатного стана. Основные особенности и характеристики автоматизированных системы заковки арматуры состоят в следующем:

- непрерывная работа: эти системы интегрируются непосредственно в линию прокатного стана. Арматура непрерывно проходит через зону заковки.
- высокоскоростная работа: скорость заковки соответствует скорости производства прокатного стана. Заковка осуществляется водой: Системы подачи воды: обычно используют ряды распылительных форсунок для равномерного охлаждения арматуры.
- управление водными ресурсами: эффективные системы включают системы очистки и рециркуляции воды для минимизации потребления воды и воздействия на окружающую среду.
- управляемое охлаждение: системы часто используют несколько зон охлаждения для достижения определенной скорости охлаждения.
- контроль температуры: пирометры контролируют температуру арматуры, чтобы гарантировать постоянство процесса.
- управление с обратной связью: расход, давление воды и схемы включения зон охлаждения часто динамически регулируются на основе показаний температуры и скорости прокатки.
- автоматизированное управление процессом: Управление ПЛК (программируемый логический контроллер): ПЛК управляет временем, потоком, температурой и другими параметрами процесса.
- НМІ (человеко-машинный интерфейс): операторы используют НМІ для контроля процесса, внесения корректировок и устранения неполадок.
- регистрация данных: критически важные данные (например, температурные профили, скорости охлаждения) регистрируются для контроля качества и оптимизации процесса.
- адаптивность: Система должна быть адаптирована к различным диаметрам арматуры и иметь возможность обрабатывать стали разного химического состава.
- отделка поверхности: процесс заковки помогает избегать нежелательных поверхностных дефектов, таких как образование окалина.

К преимуществам автоматизированных систем заковки арматуры относят:

- постоянство свойства материала: достигается более постоянная прочность, пластичность и другие механические свойства по всей длине стержня;
- улучшенное качество продукции: приводит к более высокому качеству арматуры, которая соответствует или превосходит отраслевые стандарты;
- более высокая производительность: обеспечивает более высокие скорости прокатки без ущерба для качества продукции;
- сокращение отходов материалов: более точный контроль процесса снижает количество производимого материала, не соответствующего спецификации;
- энергоэффективность: некоторые передовые системы оптимизируют использование воды, что приводит к снижению эксплуатационных расходов.

Среди производителей арматуры, использующих автоматизированные системы закалики крупные сталелитейные заводы: компании, которые производят широкий сортament стальной продукции, включая арматуру, специализированные производители арматуры. Такие компании, как: ArcelorMittal, Nippon Steel, Baosteel, Nucor, Posco, используют эту технологию или ее запатентованную версию.

Поставщики оборудования для прокатных станов: компании, поставляющие прокатные станы, часто интегрируют системы закалики как часть своего общего решения. Примерами могут служить: Primetals Technologies, Danieli, SMS Group и Siemens, MWE. Некоторые компании специализируются на проектировании и производстве систем закалики для различных применений, включая арматуру (Danieli, Thermex). Основными поставщиками арматурного проката на российский рынок являются: СЗАО «ММЗ» (Молдавия), РУП «БМЗ» (Беларусь), ПАО «Северсталь», ОАО «ЗСМК», ОАО «ММК», ОАО «Амурметалл», «Мечел», «ОЭМК», «РЭМЗ» и др.

Интеграция автоматизированной системы закалики с существующим прокатным станом может быть сложной. Внедрение и настройка передовых систем управления для непрерывного производства требуют квалифицированных инженеров. Подробно исследовались процессы ускоренного охлаждения проката в линии сортовых станов Магнитогорского металлургического комбината [1], Донецкого металлургического завода [2-4], мелкосортно-проволочном стане 320/150 Молдавского металлургического завода [5], мелкосортном стане 250 завода «Криворожсталь» [6], сортовых станах Западно-Сибирского металлургического комбината [7-10] и др. Решению задачи построения математической модели процесса термического упрочнения, в основном – построению температурного поля в сечении горячекатаной арматурной стали, посвящена работа [11]. Для всех указанных исследований характерно использование усредненных характеристик охлаждающей воды по длине камеры. Кроме того, отсутствует взаимосвязь температурно-скоростных факторов и структурообразования и влияние структурных компонент на механические свойства конечного продукта.

Теоретические основы

В общем случае установка термоупрочнения арматуры состоит, как показано на рис. 1, из набора n камер охлаждения, длиной L_{ki} , установленных за чистой прокатной клетью на расстоянии L_{e0} , на расстоянии друг от друга L_{ei} , для обеспечения выравнивания температуры по сечению проката до последующей стадии охлаждения. Охлаждение обеспечивается водой, подаваемой через форсунки на входе в каждую камеру.

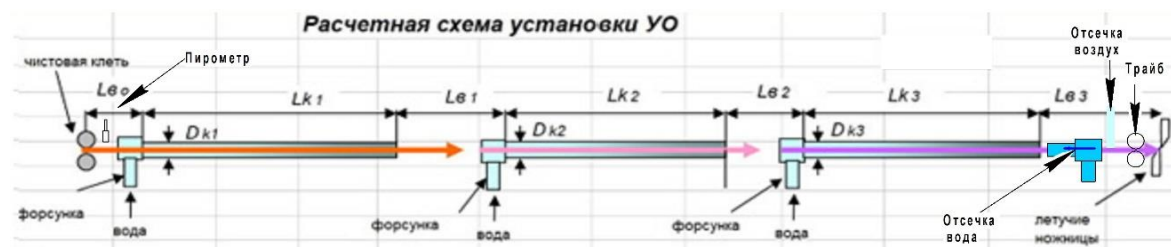


Рисунок 1 - Схема установки ускоренного охлаждения

Расход воды обеспечивается давлением, устанавливаемым оператором в ручном режиме в каждой включенной секции. Такой процесс называют многостадийным ускоренным прямоточным охлаждением водой сортового проката, комбинированным с выравниванием температуры по сечению на воздухе.

При установке избыточного давления в камере или включении большего количества камер происходит переупрочнение металла, при недостаточном давлении механические свойства получают ниже обусловленных стандартами.

Разработанная математическая модель построения температурного поля по сечению профиля при многостадийном ускоренном охлаждения водой сортового проката, комбинированного с выравниванием температуры по сечению на воздухе описана в работе [13]. Модель основана на применении численного решения дифференциального уравнения теплопроводности (1) при прокатке круглых (арматурных) профилей при заданных условиях внешнего теплообмена.

$$C(t) \cdot \rho(t) \frac{dt}{d\tau} = \frac{d}{dr} \left(\lambda(t) \frac{dt}{dr} \right) + \frac{m}{r} \lambda(t) \frac{dt}{dr} + q_v \quad (1)$$

с начальными условиями $\tau = 0$; $t_n = f(r)$, методом «прогонки» для определения распределения температуры по сечению цилиндрического бесконечного стержня [14]. Необходимые для расчета зависимости теплофизических коэффициентов углеродистой стали, в частности – плотности, удельной теплоемкости, энтальпии, коэффициента теплопроводности от температуры охлаждения получены статистической обработкой табличных данных [15] с высокой степенью точности на всем интервале температур охлаждения.

Основной проблемой, возникающей при построении модели формирования механических свойств проката при термоупрочнении является большое количество факторов, влияющих на конечные значения свойств.

Типичная диаграмма изотермического распада аустенита [16] для доэвтектоидных сталей имеет вид, показанный на рис. 2. Простейшим подходом является построение статистической (регрессионной модели) для конкретных условий обработки. Однако этот подход возможен только при построении модели существующего процесса и не может быть использован для целей прогнозирования при выходе значений параметров за пределы, использованные при получении экспериментальных данных для создания модели.

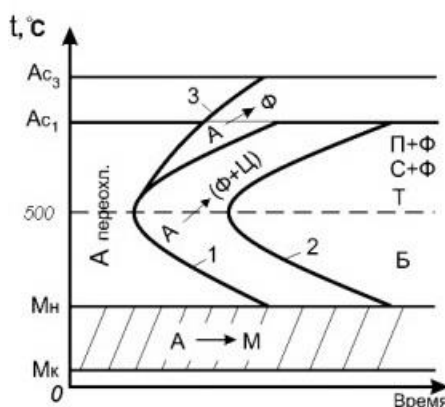


Рисунок 2 - Диаграмма изотермического распада аустенита для доэвтектоидных сталей:

1 – линия начала распада аустенита, 2 – линия конца распада аустенита, 3 – линия выделения избыточного феррита (цементита)

Преодолеть это ограничение можно при построении модели, основанной на уравнениях, описывающих физическую сущность происходящих процессов.

Предложен следующий вариант сочетания физических и эмпирических (статистических) компонентов модели.

1. На основании данных решения уравнения (1) строятся кривые изменения температуры во времени для конечного числа элементарных слоев поперечного сечения профиля.
2. С использованием модели изотермической С-диаграммы и принципа аддитивности анализируется процесс превращения при заданных переменных условиях охлаждения в каждом слое.
3. На основании данных о долевого фазовом составе структуре в каждом слое производится определение интегральных долевого характеристик компонент структуры
4. Исходя из предположения о механических свойствах каждой структурной составляющей, производится вычисление интегральных механических характеристик всего поперечного сечения профиля.

Разработана адаптируемая термодинамическая модель изотермического распада аустенита углеродистых и низколегированных сталей, позволяющая прогнозировать структурный состав охлажденного проката из углеродистых и низколегированных сталей. Остановимся кратко на характеристике этой модели.

Скорость образования новой фазы R при изотермическом распаде аустенита определили в виде произведения двух факторов f_T и f_S , первый из которых зависит от температуры и некоторых параметров, определяемых на основании экспериментальных данных, а второй – зависит от соотношения объемных долей фаз, но не зависит от температуры:

$$R = \frac{dS}{d\tau} = f_T(T, T_0, T_c, \lambda, \mu) f_S(S), \quad (2)$$

где S – объемная доля новой фазы; τ – время; T – температура; T_0 – температура минимальной устойчивости исходной фазы; T_c – критическая температура начала превращения; λ, μ – эмпирически определяемые параметры.

Факторы f_T и f_S далее будем именовать соответственно термодинамическим и конфигурационным, что вполне отражает их содержание.

Для построения кривых изотермического распада вид зависимости конфигурационного фактора f_S , входящего в уравнение (2), от объемной доли S не имеет принципиального значения. В частности, в качестве интеграла конфигурационного фактора можно использовать уравнение М. Аврами. Исходя из представлений о термически активируемом росте [17-19], термодинамический фактор получен в виде:

$$f_T = \left\{ A \frac{kT}{h} \exp \left[\frac{1}{T} \left(T_0 - \lambda T_c \coth \left(\lambda \frac{T_c - T_0}{T_0} \right) \right) \right] \cdot \left[\exp \left(\lambda \frac{T_c - T}{T} \right) - \exp \left(-\lambda \frac{T_c - T}{T} \right) \right] \right\}^\mu, \quad (3)$$

где A – микроскопическая мобильность межфазной границы; k – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка.

Если из эксперимента известно время, соответствующее минимальной устойчивости исходной фазы τ_0 , и соответствующая температура T_0 , то координаты кривой изотермического распада определяются как

$$\tau(T) = \tau_0 \frac{f_T(T_0, T_0, T_c, \lambda, \mu)}{f_T(T, T_0, T_c, \lambda, \mu)}. \quad (4)$$

В результате анализа ряда С-диаграмм для углеродистых и низколегированных сталей [20] получены уравнения, позволившие построить температурно-временную модель трансформации аустенита. На рис. 3 приведены расчетные С-диаграммы для некоторых марок сталей, используемых при термоупрочнении арматурных профилей. Определяющим фактором для построения является химический состав стали по трем элементам С, Мп, Si. Для определения переменных теплофизических характеристик охлаждающей среды по длине трубы, таких как температура насыщения, плотность, динамическая вязкость, теплоемкость и теплопроводность воды необходимо знать изменение её гидродинамических параметров. Эти параметры зависят от конструкции охлаждающей трубы и начальных условий охлаждения.

С-диаграмма Ст3пс

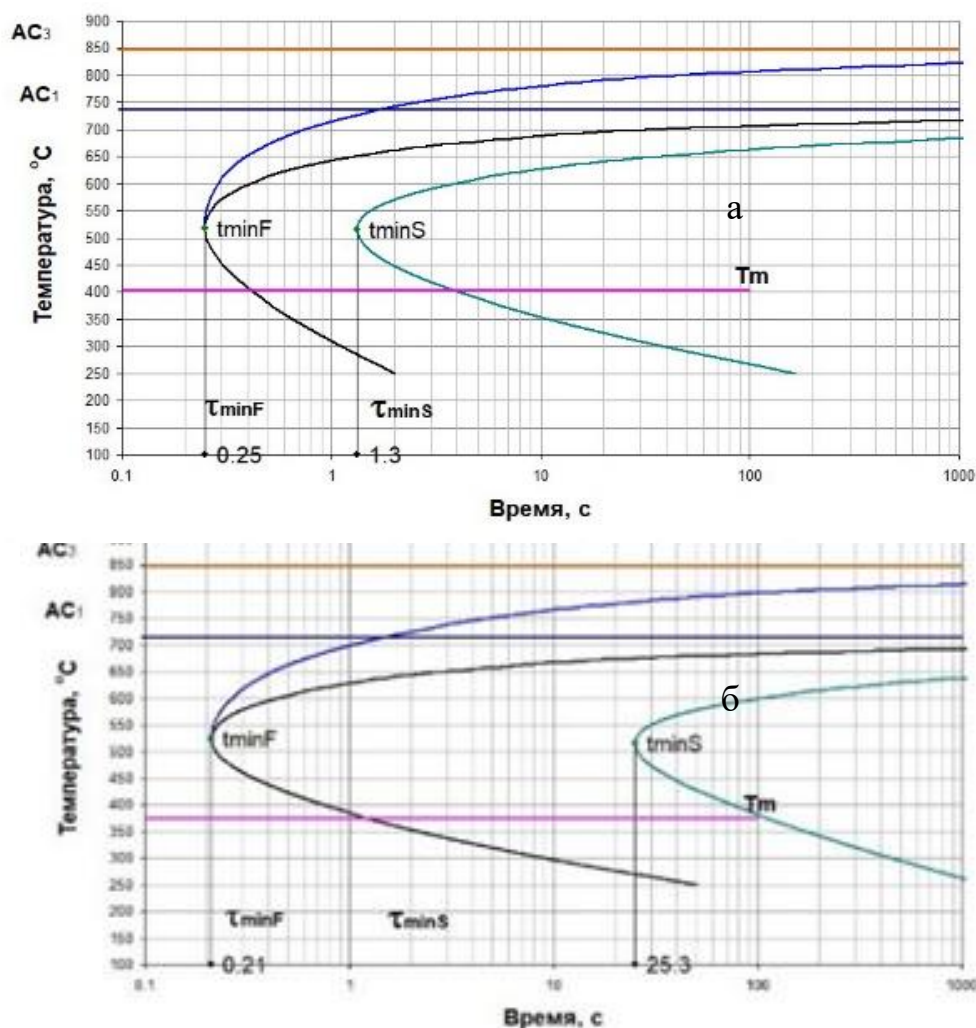


Рисунок 3 - Расчетные С-диаграммы сталей: а- Ст3пс, б- 25Г2С:

AC_1 , AC_3 – критические температуры превращения доэвтектоидных сталей; (t_{minF}, t_{minF}) , (t_{minS}, t_{minS}) – координаты точек наименьшей устойчивости феррита и перлита соответственно; M_s – температура начала мартенситного превращения.

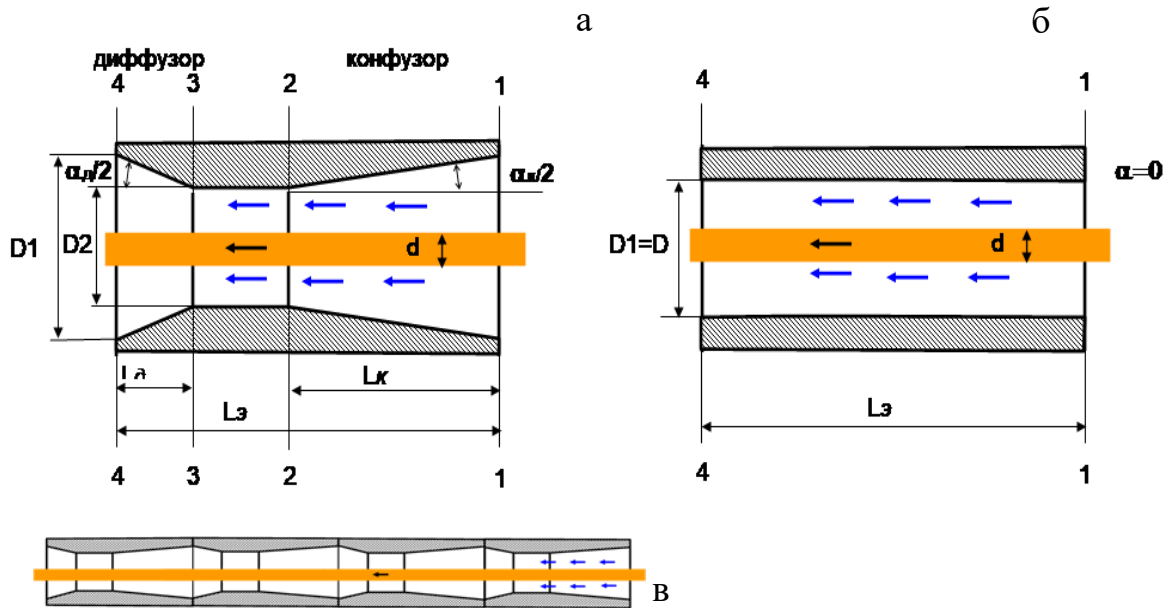


Рисунок 4 - Схемы конструкции элементов охлаждающих труб, применяемых на практике:
а- КД; б- гладкая; в- схема сборки элементов КД в камеру.

Известны два варианта конструкции – гладкая (постоянного диаметра) и конфузорно-диффузорная (КД), состоящая из элементов-вставок. На рис.4 приведены указанные конструкции.

Уравнение Бернулли (4) в избыточных давлениях, записанное для входного и выходного сечения трубы [21] имеет вид:

$$P_{\text{вх}} + \rho \frac{V_{\text{вх}}^2}{2} = P_{\text{вых}} + \rho \frac{V_{\text{вых}}^2}{2} + P_{\text{пот}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}$ – давление воды на входе и выходе камеры, Па; ρ – плотность воды, кг/м³; $V_{\text{вх}} = V_{\text{вых}} = V$ – скорость воды на входе и выходе камеры, м/с; $P_{\text{пот}}$ – потери давления за счет трения и местного сопротивления (в случае КД камеры), Па.

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{фор}}(1 - K_{\text{фор}})$$

$$P_{\text{пот}} = K_{\text{сопр}} \rho \frac{V^2}{2}. \quad (5)$$

$$K_{\text{сопр}} = N_{\text{эл}}(K_{\text{кон}} + K_{\text{диф}} + K_{\text{ц}}),$$

$$\text{где } K_{\text{диф}} = \frac{\mu_{\text{тр}}}{8 \sin(\frac{\alpha_{\text{д}}}{2})} \left[1 - \frac{1}{D_{\text{д}}^4} \right] + \sin \alpha_{\text{д}} \left[1 - \frac{1}{D_{\text{д}}^2} \right]^2,$$

$$K_{\text{ц}} = \mu_{\text{тр}} \frac{L_{\text{ц}}}{D_{\text{ц}}}, K_{\text{кон}} = \frac{\mu_{\text{тр}}}{8 \sin(\frac{\alpha_{\text{к}}}{2})} \left[1 - \frac{1}{D_{\text{к}}^2} \right],$$

$D_{\text{д}}, D_{\text{к}}, D_{\text{ц}}$ – средние диаметры живого сечения на соответствующих участках элемента,

$K_{\text{диф}}, K_{\text{кон}}, K_{\text{ц}}$ – коэффициенты сопротивления на участках диффузора, конфузора; и цилиндра соответственно. Остальные обозначения показаны ниже в табл.1

Таблица 1- Гидродинамические параметры КД и гладкой камеры

Входные данные				
Параметр	об.	ед. изм.	Знач.	Знач.
Максимальный диаметр вставки	D1	мм	44	38
Минимальный диаметр вставки	D2	мм	33	38
Диаметр арматуры	do	мм	16	16
Длина диффузора	Lд	мм	9	9
Длина конфузора	Lк	мм	71	71
Длина элемента	Lэ	мм	94	94
Число вставок	N		19	19
Давление на форсунке	Pф	ат	10	10
Коефф. гидравлического трения	$\mu_{тр}$		0.028	0.028
Коефф.потерь на форсунке	Kф	-	0.5	0.5
Выходные данные				
Давление на выходе из камеры	P _{вых}	ат	1.00	1.00
Угол сужения (конфузор)	$\alpha_k/2$	град	4.4	0.0
Угол расширения (диффузор)	$\alpha_d/2$	град	31.4	0.0
Общая длина трубы	N•Lэ	м	1.79	1.79
Минимальная скорость воды	V _{b_min}	м/с	10.0	21.1
Максимальная скорость воды	V _{b_max}	м/с	20.2	21.1
Средняя скорость воды	V _{b_cp}	м/с	14.1	21.1
Расход воды	Q	м ³ /ч	47.7	70.9

Приведенные выше зависимости позволяют определить гидродинамические параметры воды в любом сечении трубы охлаждения. В табл.1 показаны результаты расчета интегральных характеристик режима, а на рис.5 - графики распределения скорости и давления воды по длине камеры охлаждения при равных средних диаметрах живого сечения трубы.

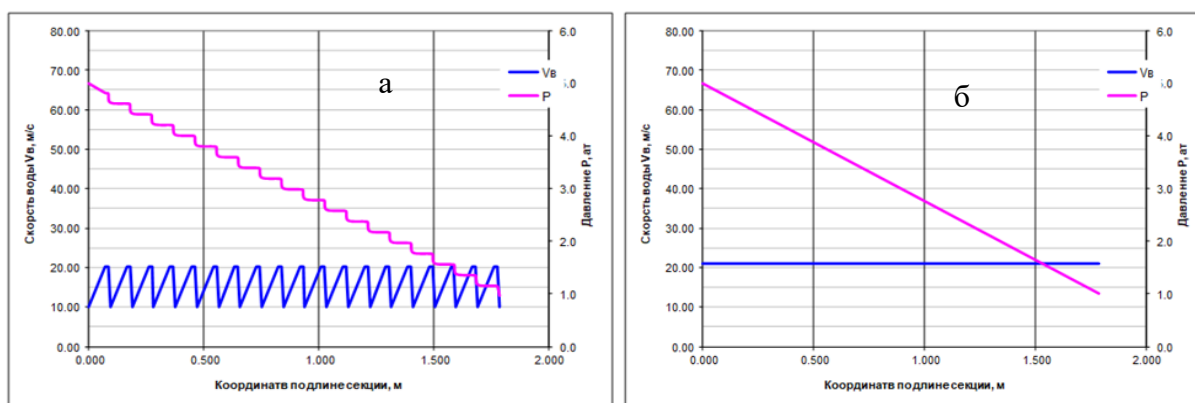


Рисунок 5 - Графики распределения скорости и давления воды по длине камеры охлаждения: а – КД; б -гладкой

Для получения связи предела прочности и твердости при термоупрочнении на стане 250 отобраны образцы упрочненных профилей арматуры №16 и №20, классов А500 и А800, на которых были проведены замеры твердости по Бринелю вдоль радиуса поперечного сечения с привязкой к компонентам микроструктуры. Результаты показаны в табл.2. Обозначения принятые в табл.2 показаны ниже:

C, Mn, Si — содержание углерода, марганца и кремния в стали (%);

C_{эк} – углеродный эквивалент;

σ_b , $\sigma_{0.2}$ — предел прочности и условный предел текучести (Н/мм²);

$\delta\%$ - относительное удлинение;

НВ, НВ_м, НВ_б, НВ_п, НВ_ф - твердость по Бринелю средневзвешенная, мартенсита, бейнита, перлита и феррита соответственно.

Таблица 2 – Исходные данные и результаты эксперимента по определению механических свойств арматурных профилей в функции твердости структурных компонент

№	С	Мn	Si	Сэк	б _{0,2}	б _в	δ%	НВ	НВ _м	НВ _б	НВ _п	НВ _ф
1	0.21	0.61	0.071	0.319	632	745	21	212	227	210	-	196
2	0.18	0.61	0.063	0.288	582	687	21.5	203	211	203	-	171
3	0.18	1.24	0.62	0.449	882	1055	11.5	298	333	299	243	-
4	0.21	0.61	0.071	0.319	602	707	21.5	215	234	200	-	171
5	0.21	0.61	0.071	0.319	557	657	17.5	215	236	205	182	174
6	0.22	1.14	0.35	0.445	985	1140	15.5	293	295	295	-	-
7	0.22	0.67	0.089	0.341	615	717	17	218	229	210	-	-
8	0.24	1.5	0.77	0.567	975	1140	12.5	310	316	315	286	-
9	0.21	1.4	0.68	0.511	1010	1185	14	313	315	312	302	-
10	0.21	0.6	0.057	0.316	660	760	18.5	205	224	200	-	179

В результате статистической обработки данных табл.2 получены следующие зависимости твердости:

- феррит $НВ_{\text{ф}} = 361 - 0.357 T_{\text{фср}} + 50 \text{ Si}$, где $T_{\text{фср}}$ – средняя температура ферритного превращения;
- перлит $НВ_{\text{п}} = (730.7 - 0.73T_{\text{пср}}) \text{ C} + 204.17 - 0.155T_{\text{пср}}$, где $T_{\text{пср}}$ – средняя температура перлитного превращения;
- бейнит $НВ_{\text{б}} = 86.7 + 182.2\text{Mn} + 176.5\text{Si} - 157.15\text{Mn} \cdot \text{Si}$,
- мартенсит $НВ_{\text{м}} = 164.6 + 74.8\text{Mn} + 357.6 \text{ Si} - 205.7 \text{ Mn Si}$,

Для определения средневзвешенной твердости используется формула

$$НВ_{\text{ср}} = V_{\text{ф}} \cdot НВ_{\text{ф}} + V_{\text{п}} \cdot НВ_{\text{п}} + V_{\text{б}} \cdot НВ_{\text{б}} + V_{\text{м}} \cdot НВ_{\text{м}},$$

где $V_{\text{ф}}$, $V_{\text{п}}$, $V_{\text{б}}$, $V_{\text{м}}$ – относительные объемные доли соответствующих структурных составляющих ($\sum V_i = 1$).

Предел прочности определяется по уравнению регрессии:

$$\text{бв} = 4.531 \cdot НВ_{\text{ср}} - 242, R^2 = 0.9569,$$

условный предел текучести связан с пределом прочности выражением

$$\text{б}_{0,2} = 0.857 \cdot \text{бв} - 3.24, R^2 = 0.9979, \text{ где } R^2 - \text{коэффициент детерминации.}$$

$$\text{относительное удлинение } \delta_{\text{отн}} = 0.06e^{\frac{195}{НВ_{\text{ср}}}}$$

Укрупненная блок-схема полного алгоритма расчета модели показана на рис. 6.

Входными данными для моделирования являются:

N - количество включенных подряд камер ускоренного охлаждения;

d_0 - диаметр проката;

V_m - линейная скорость металла (скорость прокатки);

$t(x/r_0)$ - исходное распределение температуры по сечению на выходе из чистовой клетки прокатного стана;

C, Mn, Si - химический состав стали;

$L_{\text{вк}}$ - длины участков выравнивания на воздухе;

$L_{\text{вк}}, D_{\text{вк}}$ - конструкция установки ускоренного охлаждения (см. рис. 1);

$t_{\text{вх}i}$ - температура воды на входе в камеру;

$P_{\text{квх}i}$ - давление воды на входе в камеру.

Выходными данными модели являются:

$A, \Phi, П, Б, М$ – (аустенит, феррит, перлит, бейнит, мартенсит) количество структурных составляющих стали после распада аустенита в долях единицы;

$t_{\text{со}}$ - температура самоотпуска;

W_{Σ} - суммарный расход воды;

σ_{02} – условный предел текучести холодного металла;

$\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности холодного металла;

δ - относительное удлинение холодного металла, %;

$V_{\text{в}i}$ - средняя скорость воды в камере i ;

$t_{\text{вх}i}$ – температура воды на выходе из камеры i ;

$W_{\text{в}i}$ - расход воды в камере i ;

$t_{\text{мвх}i}, t_{\text{мвых}i}$ – среднемассовые температуры металла на входе и выходе из камеры i ;

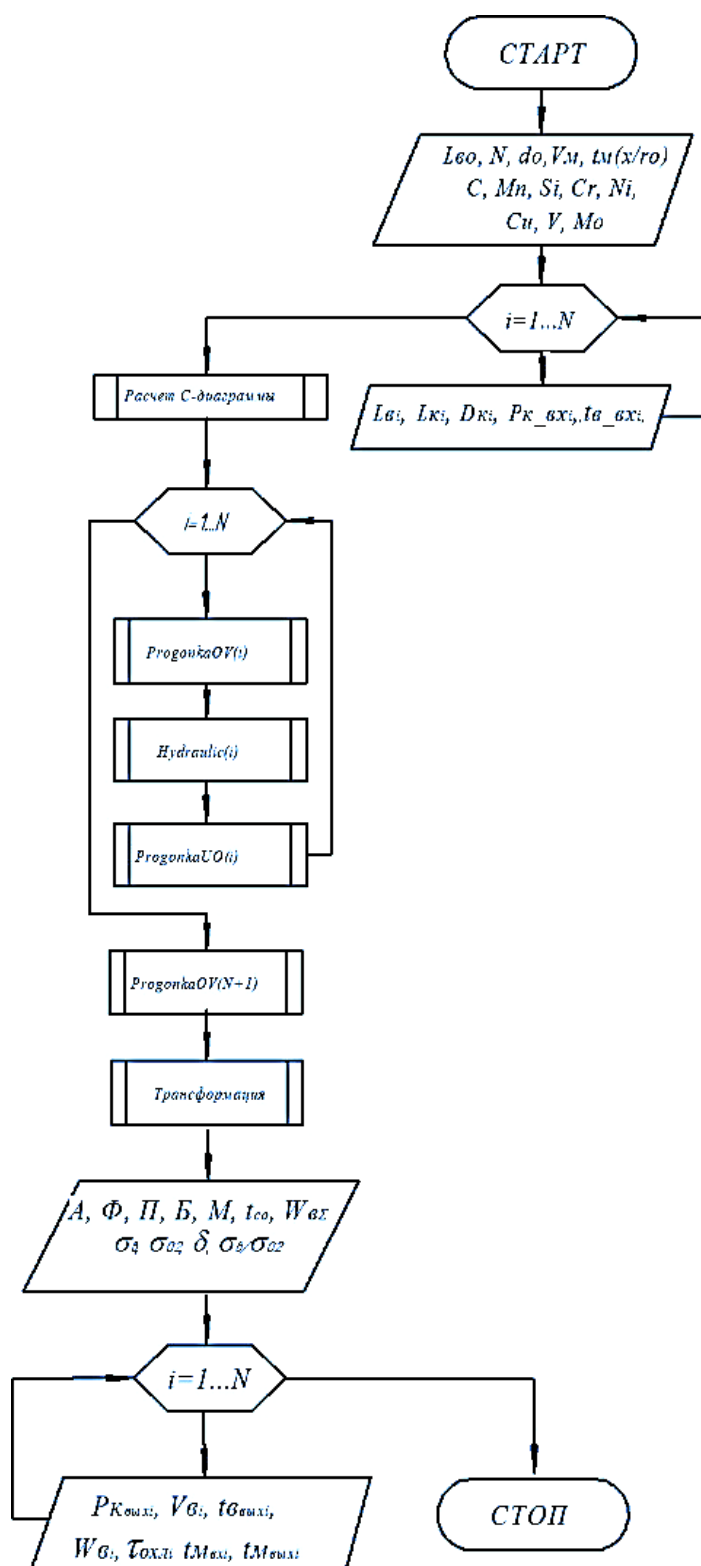


Рисунок 6 - Блок-схема алгоритма модели комбинированного охлаждения арматурного проката в потоке прокатного стана: «ProgonkaOV» – подпрограмма расчета температурного поля при охлаждении на воздухе; «ProgonkaUO» – подпрограмма расчета температурного поля при охлаждении водой в камере; «Трансформация» - подпрограмма расчета объемных долей структурных составляющих.

С использованием описанной физико-математической модели разработана программа, интерфейс пользователя которой показан на рис.7-8. Программа позволяет моделировать охлаждение проката $\varnothing 8\text{--}32\text{ мм}$ в установках, содержащих от 1 до 6 секций гладкого или КД типа при скорости прокатки $5\text{--}20\text{ м/с}$.

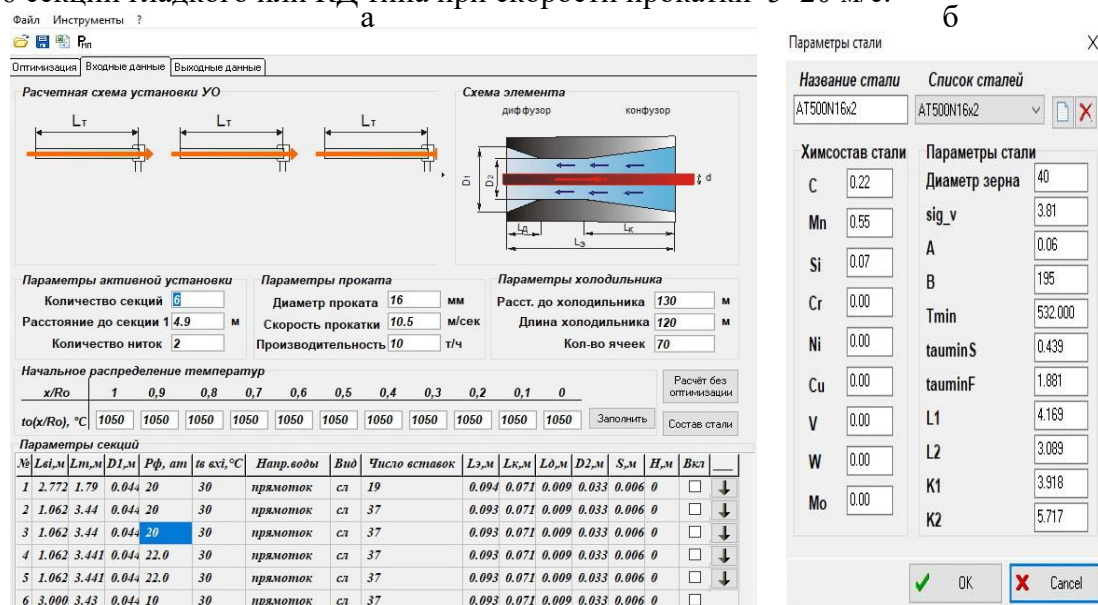


Рисунок 7 - Вид интерфейса пользователя при вводе данных:
а- конструкции установки; б- характеристик марки стали.

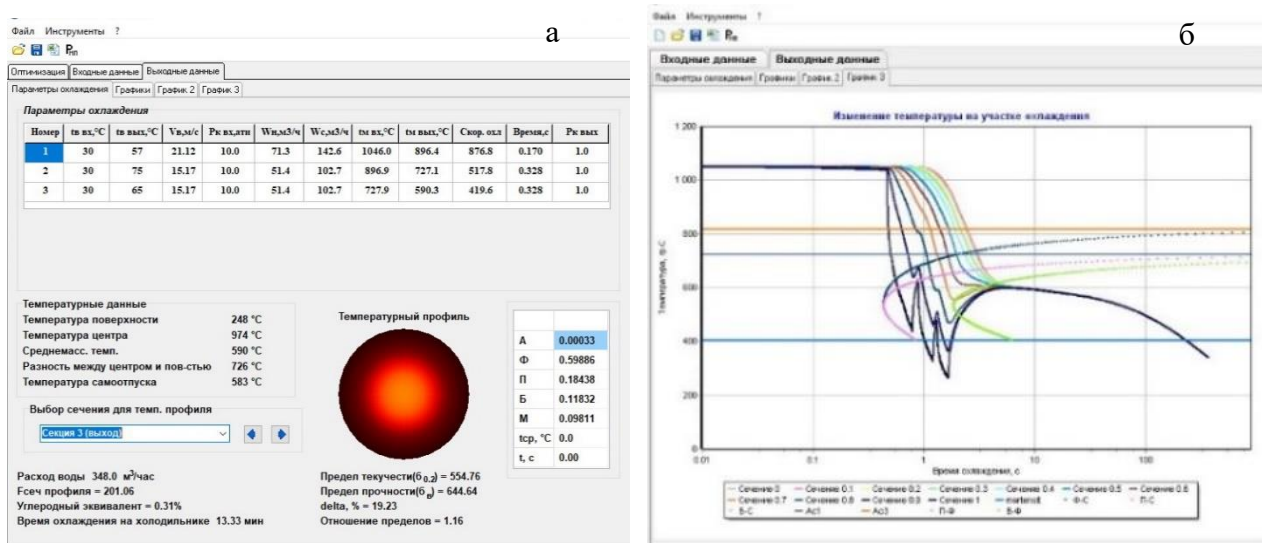


Рисунок 8 - Вид интерфейса пользователя: а- интегральные характеристики процесса; б- температурное поле профиля, наложенное на C-диаграмму

Заключение

Наличие физико-математической модели процесса ускоренного охлаждения в установках типа КД в потоке сортового стана позволяет осуществить разработку экспертной системы для оптимизации процесса термоупрочнения арматурной стали на основе ИНС с глубоким обучением. Процесс обучения, требующий в обычных условиях проведения дорогостоящего широкого производственного эксперимента

для получения обучающего набора данных, заменяется расчетом по разработанной модели на основе фундаментальных знаний. Производственный эксперимент в этом случае заключается в получении небольшого числа данных для подстройки модели, которая предусмотрена в программе.

Результаты проверки точности прогноза механических свойств по данным заводской практики показал удовлетворительную сходимость расчетных и практических данных.

Список литературы

1. Тахаутдинов, Р.С. Производство термомеханически упрочненной арматуры на мелкосортном стане 250-1 Магнитогорского металлургического комбината. *Черная металлургия. Бюлл. НТИ*. 2003. №12. С. 47-49.
2. Минаев, А.А. Особенности пульсирующего течения хладагента в камерах устройств ускоренного охлаждения / А.А. Минаев, Е.Н. Смирнов. *Изв. вузов. Черн. металлургия*. 1988. № 11. С. 156-157.
3. Минаев, А.А. Показатель эффективности устройств для охлаждения движущегося проката / А.А. Минаев, Ю.Е. Бердичевский, П.Ф. Бублик. *Изв. вузов. Черн. металлургия*. 1985. № 6. С. 154-155.
4. Минаев, А.А. Разработка методики расчета теплообмена в устройстве для регулируемого охлаждения в потоке прокатного стана / А.А. Минаев, С.А. Онищенко, А.В. Гребельный. *Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. VI Всесоюз. конф.* Ташкент, 1984. Ч. 3. С. 2
5. Савьюк, А.Н. Оптимизация химического состава стали, технологии прокатки и термообработки для обеспечения механических свойств проката в узком диапазоне значений / А.Н. Савьюк, И.В. Деревянченко и др. *Тр. 5-го конгресса прокатчиков*. М., 2004. С. 200-205.
6. Худик, Ю.Т. Исследование служебных характеристик установки для термического упрочнения арматурной стали в потоке стана 250-5 завода «Криворожсталь» / Ю.Т. Худик и др. *Термическая обработка металлов*. М., 1979. Вып. 8.-С. 65-66
7. Михаленко, И.А. Технология производства арматуры диаметром 25-28 мм класса прочности А500С с высокими пластическими свойствами / И.А. Михаленко. *Черная металлургия. Бюлл. НТИ*. 2004. Я» 6. С. 46-49.
8. Юрьев, А.Б. Прерывистое охлаждение в потоке стана 450 стальной арматуры большого диаметра / А.Б. Юрьев и др. *Тр. 4-го конгресса прокатчиков*. Т. 1. М., 2002. С. 301-304.
9. Юрьев, А.Б. Разработка технологии упрочнения стержневой арматуры диаметром 32-40 мм на класс А500С / А.Б. Юрьев и др. *Черная металлургия. Бюлл. НТИ*. 2002 № 10. С. 41-43.
10. Юрьев, А.В. Оптимизация технологии упрочнения стержневой арматуры диаметром 32-40 мм класса А500С / А.В. Юрьев и др. *Сталь*. 2002. № 2. С. 68-69.
11. Киркин, Д.С. Разработка математической модели процесса термического упрочнения горячекатаной арматурной стали / Д.С. Киркин, Ю.А. Калягин. *Молодые исследователи регионам: Материалы Всероссийской науч. конф. студ. и аспирантов*. Вологда, 21-22 апреля 2005 г. Вологда: ВГТУ, 2005.-Т. 1.-С79-81.
12. Киркин, Дмитрий Сергеевич. Исследование и совершенствование процесса ускоренного охлаждения проката в линии сортовых станов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.14.04 / Киркин Дмитрий Сергеевич; [Место защиты: Череповец. гос. ун-т]. Череповец, 2007. 16 с.
13. Математическое моделирование процесса комбинированного охлаждения сортового проката / В.С.Солод, Д.Н.Новиков, М.Н.Тытюк, С.И.Гинкул, М.А.Ларченко. *Металл и литье Украины*. 2007, №8.- с. 28-30.
14. *Тепломассообмен* / С.И.Гинкул, В.И.Шелудченко, В.В.Кравцов, С.В.Палкина. Донецк: Норд-Пресс, 2006. 298 с.
15. *Расчет усилий при непрерывной прокатке*/ В.Н.Жучин, Г.С.Никитин, Я.С.Шварцбарт, И.Г.Зуев М.:Металургия, 1986.- 198 с.
16. Чудина О.В. *Теория и практика термической обработки металлов: учебно-методическое пособие к мультимедийному изданию* / О.В. Чудина, Г.В. Гладова, А.В. Остроух. М.:МАДИ, 2013 64 с. ISBN 978-5-7962-0149-7
17. Glasstone S., Laidler K. J., Eyring H. *The Theory of Rate Processes*. McGraw-Hill, New York, 1941.
18. Cristian J. W. *Transformations in Metals and Alloys. Part I*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
19. Cahn J. W., Hagel W. C. *Decomposition of Austenite by Diffusional Processes*. Interscience, New York, 1962.

20. *Atlas of isothermal transformation diagrams*. United States Steel Corporation. 1957.
21. Губинский В.И., Минаев А.Н., Гончаров Ю.В. *Уменьшение окалинообразования при производстве проката*. К.:Техніка, 1981.-135 с.

References

1. Takhautdinov, R.S. Production of thermomechanically strengthened reinforcement bars at the 250-1 light-section mill of the Magnitogorsk Iron and Steel Works / R.S. Takhautdinov // *Ferrous metallurgy. Bulletin of NTI*. - 2003. - No. 12.-P. 47-49
2. Minaev, A.A. Features of the pulsating flow of the coolant in the chambers of accelerated cooling devices / A.A. Minaev, E.N. Smirnov // *News of the universities. Chern. metallurgy*. - 1988. - No. 11. - P. 156-157. 160
3. Minaev, A.A. Efficiency indicator of devices for cooling moving rolled products / A.A. Minaev, Yu.E. Berdichevsky, P.F. Bublik // *News of the universities. Chern. metallurgy*. - 1985. - № 6. - P. 154-155.
4. Minaev, A. A. Development of a method for calculating heat exchange in a device for controlled cooling in a rolling mill flow / A. A. Minaev, S. A. Onishchenko, A. V. Grebelny // *Thermal physics of technological processes: Abstract. report. VI All-Union Conf.* - Tashkent, 1984. - Part 3. - P. 2 5.
5. Savyuk, A. N. Optimization of the chemical composition of steel, rolling technology and heat treatment to ensure the mechanical properties of rolled products in a narrow range of values / A. N. Savyuk, I. V. Derevyanchenko et al. // *Proc. of the 5th congress of rolling mill workers*. - M., 2004. - P. 200-205.
6. Khudik, Yu. T. Study of service characteristics of the installation for thermal hardening of reinforcing steel in the flow of mill 250-5 of the Krivorozhstal plant / Yu. T. Khudik et al. // *Heat treatment of metals*. - M., 1979.-Issue. 8.-P. 65-66
7. Mikhaleiko, I. A. Technology of production of reinforcement bars with a diameter of 25-28 mm of strength class A500C with high plastic properties / I. A. Mikhaleiko // *Ferrous metallurgy. Bulletin of NTI*. - 2004. - Ya» 6. - P. 46-49.
8. Yuryev, A. B. Intermittent cooling in the flow of mill 450 of large-diameter steel reinforcement bars / A. B. Yuryev et al. // *Proc. of the 4th Congress of Rolling Workers*. - V. 1. - M., 2002. - P. 301-304.
9. Yuryev, A.B. Development of technology for strengthening reinforcement bars with a diameter of 32-40 mm to class A500C / A.B. Yuryev et al. // *Ferrous metallurgy. Bulletin of NTI*. - 2002 - No. 10. - P. 41-43.
10. Yuryev, A.V. Optimization of technology for strengthening reinforcement bars with a diameter of 32-40 mm of class A500C / A.V. Yuryev et al. // *Steel*. - 2002. - No. 2.-P. 68-69.
11. Kirkin, D.S. Development of a mathematical model for the process of thermal strengthening of hot-rolled reinforcing steel / D.S. Kirkin, Yu.A. Kalyagin // *Young researchers - to the regions: Proceedings of the All-Russian scientific conf. students and postgraduates*. - Vologda, April 21-22, 2005 - Vologda: VSTU, 2005.-T. 1.-P79-81.
12. Kirkin, Dmitry Sergeevich. Research and improvement of the process of accelerated cooling of rolled products in the line of section mills: author's abstract of dis. candidate of technical sciences: 05.14.04/ Kirkin Dmitry Sergeevich; [Place of defense: Cherepovets. state University]. - Cherepovets, 2007. – 16 p.
13. Mathematical modeling of the process of combined cooling of rolled products / V.S. Solod, D.N. Novikov, M.N. Tytyuk, S.I. Ginkul, M.A. Larchenko // *Metal and casting of Ukraine*. 2007, No. 8. - p. 28-30.
14. Heat and mass transfer / S.I. Ginkul, V.I. Sheludchenko, V.V. Kravtsov, S.V. Palkina. - Donetsk: Nord-Press, 2006.-298 p.
15. Calculation of forces during continuous rolling / V.N. Zhuchin, G.S. Nikitin, Ya.S. Schwartzbart, I.G. Zuev M.: Metallurgy, 1986.- 198 p.
16. Chudina O.V. Theory and practice of heat treatment of metals: a teaching aid for a multimedia publication / O. V. Chudina, G. V. Gladova, A. V. Ostroukh. - M.: MADI, 2013. - 64 p. ISBN 978-5-7962-0149-7.
17. Glasstone S., Laidler K. J., Eyring H. *The Theory of Rate Processes* // McGraw-Hill, New York, 1941.
18. Cristian J. W. *Transformations in Metals and Alloys. Part I* // Pergamon Press, Oxford, 1975.
19. Cahn J. W., Hagel W. C. *Decomposition of Austenite by Diffusional Processes* // Interscience, New York, 1962.
20. *Atlas of isothermal transformation diagrams*. United States Steel Corporation. 1957.
21. Gubinsky V.I., Minaev A.N., Goncharov Yu.V., *Reduction of scale formation in the production of rolled products* - K.: Tekhnika, 1981.-135 p

RESUME

V. S. Solod

Physical and mathematical model for developing an expert system for accelerated cooling of reinforcement products

Research into accelerated cooling processes in a section mill line has been actively conducted since the 1980s and continues to this day. Mathematical modeling was mainly carried out at the level of integral characteristics of the process. All of the above studies are characterized by the use of averaged characteristics of cooling water along the length of the chamber. In addition, there is no relationship between temperature-speed factors and structure formation and the influence of structural components on the mechanical properties of the final product.

Methods:

Application of numerical solution of differential equation of heat conductivity by the "run" method for constructing temperature field in cross-section of profile. Dependences of thermophysical coefficients of carbon steel on cooling temperature were obtained by statistical processing of tabular data with high degree of accuracy over the whole range of cooling temperatures. Use of fundamental provisions of hydraulics for determination of change of hydrodynamic parameters of cooling medium during accelerated cooling. Construction of model of diagrams of temperature-rate transformation of deformation structures of low-carbon steels (TTT-diagrams) based on statistical processing of coordinates of critical points for different grades of steel. Statistical processing of results of metallographic studies of types of structures of hardening and tempering in reference to them of values of hardness.

Results:

For the first time, based on fundamental knowledge in the field of heat engineering, hydraulics, metal science, a mathematical model, algorithm and program for simulating the process of accelerated cooling of reinforcement bars in the flow of a bar rolling mill have been developed.

The model takes into account the real conditions of the process associated with the design of the cooling line, cooling chambers, temperature and speed conditions of rolling, steel grade.

Conclusion:

The development is intended to create an expert system based on AI for optimizing the process of reinforcement bars thermal strengthening based on water and electricity consumption.

As a simulation model, this model can be used in the educational process for students to study the influence of a number of factors on the flow and results of thermal strengthening of deformed metal during accelerated cooling.

РЕЗЮМЕ

В. С. Солод

Физико-математическая модель для разработки экспертной системы ускоренного охлаждения арматурного проката

Исследования процессов ускоренного охлаждения проката в линии сортовых станов активно проводились начиная с 80-х годов XX века и продолжаются до настоящего времени. В основном математическое моделирование проводилось на уровне интегральных характеристиках процесса. Для всех указанных исследований

характерно использование усредненных характеристик охлаждающей воды по длине камеры. Кроме того, отсутствует взаимосвязь температурно-скоростных факторов и структурообразования и влияние структурных компонент на механические свойства конечного продукта.

Методы:

- применение численного решения дифференциального уравнения теплопроводности методом «прогонки» для построения температурного поля в поперечном сечении профиля;
- зависимости теплофизических коэффициентов углеродистой стали, от температуры охлаждения получены статистической обработкой табличных данных с высокой степенью точности на всем интервале температур охлаждения;
- использование основных положений гидравлики для определения изменения гидродинамических параметров охлаждающей среды во времени ускоренного охлаждения;
- построение модели диаграмм температурно-скоростной трансформации деформационных структур низкоуглеродистых сталей (С- диаграмм) на основе статистической обработки координат критических точек для разных марок стали.
- статистическая обработка результатов металлографических исследований типов структур закалки с отпуском в привязке к ним значений твердости.

Результаты:

Впервые, на основе фундаментальных знаний в области теплотехники, гидравлики, металловедения разработана математическая модель, алгоритм и программа для моделирования процесса ускоренного охлаждения арматурного проката в потоке сортового прокатного стана.

Модель учитывает реальные условия процесса, связанные с конструкцией установки, камер охлаждения, температурно-скоростными условиями прокатки, маркой стали.

Заключение:

Разработка предназначена для создания на основе ИИ экспертной системы оптимизации процесса термоупрочнения арматуры по расходу воды и электроэнергии.

Как имитационная, эта модель может использоваться в учебном процессе для исследования студентами влияния ряда факторов на течение и результаты термоупрочнения деформированного металла при ускоренном охлаждении.

Солод Владимир Сергеевич –научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта». *Область научных интересов:* компьютерное моделирование технологии прокатного производства, эл. почта vs.solod@mail.ru, адрес:283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118б, телефон +7(949) 459- 02 -42.

Статья поступила в редакцию 29.03.2025.