ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ ПРИ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВЕ НА МЕЛКОСОРТНОМ СТАНЕ

*И. Г. ШУБИН, канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, shubin64@mail.ru;
М. В. ШУБИНА, канд. техн. наук, доцент кафедры физической химии и химической технологии
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Россия, г. Магнитогорск)*

Аннотация. Выбор значений технологических параметров процесса производства высокоуглеродистой катанки определяет величину механических свойств и показателей качества. Вариация технологических параметров прокатки и химического состава стали предопределяет значительный разброс значений механических характеристик и показателей качества высокоуглеродистой катанки: временного сопротивления разрыву, относительного удлинения, относительного сужения и микроструктуры. Основной задачей исследования являлась стабилизация получаемых при производстве катанки значений механических характеристик и показателей качества. При выполнении работы использованы статистические методы обработки экспериментальных данных с проведением регрессионного анализа. Рассчитаны и применены уравнения для определения величины углеродного эквивалента. Построены регрессионные зависимости изменения показателей качества от химического состава стали и технологических факторов процесса прокатки, позволяющие прогнозировать их значения и эффективную коррекцию режимов прокатки катанки. Общие тенденции изменения показателей качества, моделируемые полученными уравнениями регрессии, коррелируют с производственными данными. При доверительной вероятности 95 % статистически значимыми являются все полученные уравнения взаимосвязи показателей качества катанки с технологическими факторами ее производства. Погрешность полученных регрессионных зависимостей находится в пределах 4–11 %. Результаты исследования позволяют рекомендовать использование этих математических зависимостей для создания модели, способной прогнозировать получение заданных свойств готовой продукции. При необходимости изменения регламентируемого уровня значений показателей качества использование полученных математических зависимостей позволит внести корректировку диапазона значений технологических параметров процесса прокатки катанки. Прогнозирование значений показателей качества и эффективная коррекция режимов прокатки катанки повышают стабильность воспроизводимости механических характеристик и показателей качества катанки.

Ключевые слова: высокоуглеродистая катанка, показатели качества, регрессионные модели, углеродный эквивалент, статистические методы, механические свойства.

Ссылка для цитирования. Шубин И.Г., Шубина М.В. Исследование возможности прогнозирования качества высокоуглеродистой катанки при ее производстве на мелкосортном стане // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 12. С. 60–67.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-12-60-67

STUDY OF A FORECASTING POSSIBILITY OF HIGH CARBON WIRE RODS QUALITY AT PRODUCTION OF THEM AT A WIRE ROD MILL

*I. G. SHUBIN, PhD (Tech), Associate Professor, Dpt "Technologies of materials processing", shubin64@mail.ru;
M. V. SHUBINA, PhD (Tech), Associate Professor, Dpt "Physical chemistry and chemical technology"
(Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov, Russia, Magnitogorsk)*

Abstract. The choice of technological parameters of high carbon wire rods production process determines the values of mechanical properties and quality indices.

Variations of technological parameters of rolling process and steel chemical composition predetermine considerable dispersion of mechanical characteristics values and quality indices of high carbon wire rods: tensile strength, percent elongation, reduction of area and microstructure. Stabilization of obtained mechanical characteristics values and quality indices during wire rods production was the main task of the study. During the work execution statistical methods of experiment data processing with application of regression analysis methods. Equations for carbon equivalent value determining were elaborated and applied. Regression dependences of quality indices change on the steel chemical composition and the rolling process technological factors plotted, which allow to forecast their values and effectively correct the wire rods rolling regimes. General tendencies of the quality indices change, simulated by the obtained regression equations, correlate with industrial data. At the confidence probability of 95%, all the obtained equations of wire rods quality indices interrelation with technological factors of their production are statistically significant. Error of the obtained regression dependences is in the range of 4–11%. Results of the study allow recommending application of those

mathematical dependences for a model elaboration, capable of finished products required properties forecasting. When it is necessary to change the regulation level of quality indices, application of obtained mathematical dependences will allow to make corrections on the value range of the wire rods rolling process technological parameters. Forecasting of quality indices values and effective correction of wire rods rolling regimes increase reproducibility stability of mechanical characteristics and wire rods quality indices.

Key words: high carbon wire rods, quality indices, regression models, carbon equivalent, statistical methods, mechanical properties.

For citation: Shubin I.G., Shubina M.V. Study of a forecasting possibility of high carbon wire rods quality at production of them at a wire rod mill. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 12, pp. 60–67. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-12-60-67

Высокоуглеродистая катанка представляет собой исходный материал для значительной части метизной продукции. Рассматривая вопрос качества катанки, можно выделить такие направления изучения, как механические свойства проката и состояние поверхности, геометрические размеры и микроструктура, а также ряд других показателей качества [1–5]. Как правило, выбирают один из перечисленных показателей качества и проводят соответствующие исследования.

Однако во многих случаях потребитель заинтересован в приобретении проката с комплексом регламентированных свойств заданного уровня. Наиболее часто выдвигается условие сочетания высокой прочности и пластичности. Наряду с выбором различных сочетаний свойств и показателей качества неоспоримым является требование к их стабильной воспроизводимости в процессе производства [6–12].

Технологический процесс производства на мелкосортном стане многооперационный и подвержен влиянию многих факторов. Каждый этап обработки, начиная с нагрева заготовки и до

смотки готовой катанки в бунт, вносит изменения в процесс формирования свойств и показателей качества готового проката [1–3, 13]. Вариация технологических параметров прокатки предопределяет возможный значительный разброс значений механических характеристик и показателей качества высокоуглеродистой катанки. Технологические инструкции нормируют диапазон варьирования технологических параметров в пределах возможных контролируемых значений. Стабилизация значений механических характеристик и показателей качества в регламентируемом диапазоне позволяет поддерживать требуемый уровень качества высокоуглеродистой катанки.

Анализ различных теоретических и экспериментальных методов исследований позволяет выбрать статистический метод управления качеством [14–19]. Одним из таких методов является множественный регрессионный анализ, позволяющий на основе модели влияния факторов на отклик спрогнозировать получение заданных свойств готовой продукции и увеличить количество годной продукции.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования была выбрана высокоуглеродистая катанка диам. 6,5 мм с содержанием углерода 0,65–0,9 %, прокатываемая на мелкосортном стане (табл. 1). В процессе производства заготовка последовательно подвергается операции нагрева, многократному обжатию в обжимных, черновых, предчистовых группах клетей и прокатке в чистовом блоке. Последующее охлаждение на отводящем транспортере и формирование бунта завершает процесс получения готовой металлопродукции.

Качество высокоуглеродистой катанки можно оценить по основным показателям качества, состоящим из механических свойств (временное сопротивление разрыву $\sigma_{в1}$, относительное удлинение λ_1 , относительное сужение ψ_1) и микроструктуры (пластинчатый перлит 1 балла $B_{пл}$) (табл. 2).

**ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КАТАНКИ**

**TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION
OF HIGH CARBON STEEL FOR WIRE
RODS PRODUCTION**

Химический элемент	Предельное содержание, %
Углерод	0,67–0,90
Марганец	0,40–0,7
Кремний	Не более 0,45
Фосфор	Не более 0,03
Сера	Не более 0,03
Хром	Не более 0,1
Никель	Не более 0,1
Медь	Не более 0,15
Алюминий	Не более 0,03

**ТАБЛИЦА 2. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА
ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ**

**TABLE 2. QUALITY INDICES
OF HIGH CARBON WIRE RODS**

Показатель	Предельное значение
Временное сопротивление разрыву $\sigma_{в1}$, Н/мм ²	Не более 1127
Относительное удлинение λ_1 , %	Не менее 9
Относительное сужение ψ_1 , %	Не менее 30
Пластинчатый перлит 1 балла $B_{пл}$, %	Не менее 30

При проведении исследований выполняли сбор и анализ технологических данных производства катанки и данных испытаний готовой продукции, для обработки которых был применен множественный регрессионный анализ с использованием программы Statistica [6–12, 20, 21].

Выбор технологических параметров в качестве факторов, влияющих на значения механических характеристик и показателей качества катанки, основывался на анализе технологического процесса производства, по результатам которого можно выделить ряд технологических параметров (табл. 3) [1–3].

**ТАБЛИЦА 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ
И ИХ РЕГЛАМЕНТИРУЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ**

**TABLE 3. TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF HIGH CARBON WIRE RODS PRODUCTION
AND THEIR REGULATING VALUES**

Технологический параметр (фактор)	Предельное значение
Температура перед 1-й клетью обжимной группы (T_1), °C	Не регламентируется
Температура по каждой нитке перед черновой группой (T_2, T_3), °C	930–970
Температура перед линией водяного охлаждения PREBOX, расположенной перед чистовым блоком (T_4, T_5), °C	990–1100
Температура после линии водяного охлаждения PREBOX, расположенной перед чистовым блоком (T_6, T_7), °C	880–910
Температура после чистового блока (температура конца прокатки) (T_8, T_9), °C	Не регламентируется
Температура после виткообразователя после линии водяного охлаждения (T_{10}, T_{11}), °C	800–840
Температура на конвейере воздушного охлаждения после участка с теплоизоляционными крышками (T_{12}, T_{13}), °C	300–560
Температура на виткосборнике после конвейера воздушного охлаждения (T_{14}, T_{15}), °C	300–340
Скорость прокатки в чистовом блоке V_1 , м/с	65–85
Фактор скорости Φ_1 , м ³ ·с/(м·ч)	7,92–10,81
Фактор скорости Φ_2 , м ³ ·с/(м·ч)	2,34–3,48

Принимая во внимание большой диапазон изменения химических элементов исследуемых сталей, решался вопрос учета химического состава стали как фактора, влияющего на показатели качества готового проката [14, 22]. Значительное разнообразие химических элементов усложняет эту задачу, так как наилучшим условием обеспечения высокой точности множественной аппроксимации является включение корреляции между параметрами, включенными в уравнения регрессии [23, 24]. В то же время в реальных условиях практической деятельности между массовыми долями различных элементов существуют значимые корреляционные связи.

Для решения вопроса значимой корреляции между параметрами, входящими в уравнение множественной регрессии при отображении влияния химического состава на свойства готового проката, необходимо использование такого параметра, как углеродный эквивалент $C_{э\text{кв}}$. Являясь комплексной характеристикой химического состава, углеродный эквивалент позволяет од-

ним числом характеризовать влияние на отклик сразу нескольких химических элементов. На практике, по отношению к производству проката, известен ряд упоминающихся в литературе следующих углеродных эквивалентов [25, 26]:

$$C_{э\text{кв}1} = C + \text{Mn}/5; \quad (1)$$

$$C_{э\text{кв}2} = C + \text{Mn}/5 + \text{Si}/7 + (\text{Cr} + \text{Ni} + \text{Cu})/12; \quad (2)$$

$$C_{э\text{кв}3} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Cr}/5 + \text{Ni}/40 + \text{Cu}/13 + \text{V}/14 + \text{P}/2; \quad (3)$$

$$C_{э\text{кв}4} = C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{V} + \text{Mo})/5 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15; \quad (4)$$

$$C_{э\text{кв}5} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/10; \quad (5)$$

$$C_{э\text{кв}6} = C + 0,3\text{Mn} + 0,12. \quad (6)$$

Выбор известного углеродного эквивалента или полученного из собственных эксперимен-

тальных данных во многом определяет достоверность прогнозирования исследуемых показателей качества.

Для разработки альтернативных углеродных эквивалентов был применен подход, основанный на том, что такого вида характеристики целесообразно разрабатывать на основе показателя Неймарк [27]. В этом случае используются только те компоненты химического состава стали, влияние которых на показатели качества проката является статистически значимым. В результате получаем формулу для расчета углеродного эквивалента X_Y , отражающую влияние химического состава на показатель качества Y , которую можно записать следующим образом:

$$X_Y = K_m \sum_{j=1}^m \frac{X_j}{A_j}, \quad (7)$$

где X_j и A_j — массовая доля и атомный вес элемента, для которого обнаружена значимая корреляционная связь с показателем качества; m — число элементов, проявляющих значимую корреляционную связь; K_m — масштабный

коэффициент, принимается равным 1, 10 или 100.

Применение масштабного коэффициента не искажает итоговый результат расчетов с использованием регрессионных моделей, включающих характеристику X_Y . За счет масштабного коэффициента малые (порядка 10^{-3} и менее) значения суммы отношений X_j/A_j преобразуются в значения порядка 10^{-1} , что облегчает решение системы уравнений на этапе поиска коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов. В итоговом уравнении регрессии коэффициент b_{X_Y} при X_Y окажется меньше на величину K_m и, таким образом, соответствующий член уравнения регрессии $b_{X_Y} X_Y$ останется таким же, как при X_Y , вычисленным при $K_m = 1$.

Выбрав объект исследования — высокоуглеродистую катанку — и методы обработки экспериментальных данных, выполнили исследования, направленные на поиск решения задачи по стабилизации получаемых при производстве катанки значений механических характеристик и показателей качества.

Результаты и их обсуждение

Проводя отбор факторов, влияющих на механические характеристики и показатели качества катанки, в первую очередь необходимо выбрать уравнение для расчета углеродного эквивалента. Понимая, что углеродный эквивалент отражает влияние нескольких химических элементов, необходимо учитывать особенности конкретного процесса прокатки при его взаимосвязи с марочным сортаментом прокатываемых сталей.

Для расчета использовали базу данных, состоящую из более 1000 значений показателей микроструктуры и химического состава стали, физико-механических свойств сталей марок 60–85, выплавленных как в электрошлаеплавильном агрегате, так и в мартеновской печи. Провели корреляционный анализ с применением программы Statistica для определения элементов химического состава, влияние которых на показатели качества продукции является статистически значимым. В результате оценки коэффициентов парной корреляции по критерию Стьюдента получены следующие уравнения углеродного эквивалента [23, 24]:

$$C_{\text{св}} = 0,833C + 0,356Si + 0,312S + 0,323P + 0,192Cr + 0,17Ni + 0,157Cu + 0,71N_2 + 0,383Al + 0,209Ti + 0,13As + 0,19V; \quad (8)$$

$$C_\lambda = 0,833C + 0,356Si + 0,312S + 0,323P + 0,17Ni + 0,157Cu + 0,71N_2 + 0,383Al + 0,209Ti + 0,13As + 0,19V; \quad (9)$$

$$C_\psi = 0,833C + 0,182Mn + 0,323P + 0,192Cr + 0,71N_2 + 0,383Al + 0,13As; \quad (10)$$

$$C_{\text{Бпл}} = 0,833C + 0,312S + 0,17Ni + 0,157Cu + 0,71N_2 + 0,209Ti + 0,13As + 0,10Mo. \quad (11)$$

Прежде чем отдать предпочтение какому-либо углеродному эквиваленту (1)–(6), (8)–(11), для каждого из них определяли корректность и точность отображения влияния химического состава на показатели качества катанки. Это выполняли, рассчитав значения коэффициента достоверности аппроксимации R^2 для соответствующих парных линейных зависимостей. Принимая доверительную вероятность 95 % и проведя расчеты, можно отметить, что значимость R^2 наблюдается только для показателей механических свойств (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТИ ОПИСАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА КАТАНКИ

TABLE 4. RESULTS OF DESCRIPTION ACCURACY CHECK OF STEEL CHEMICAL COMPOSITION INFLUENCE ON WIRE RODS QUALITY INDICES

Углеродный эквивалент	Коэффициент достоверности аппроксимации R^2			
	$\sigma_{в1}$	λ_1	ψ_1	$B_{пл}$
$C_{св1}$	0,6644	—	—	—
$C_{\lambda 1}$	—	0,3299	—	—
$C_{\psi 1}$	—	—	0,4158	—
$C_{Бпл}$	—	—	—	0,1056
$C_{эkv1}$	0,6037	0,3188	0,4233	0,1182
$C_{эkv2}$	0,6358	0,3283	0,4134	0,1122
$C_{эkv3}$	0,6303	0,3279	0,4152	0,1149
$C_{эkv4}$	0,6338	0,3299	0,4177	0,1136
$C_{эkv5}$	0,6123	0,3201	0,4231	0,1172
$C_{эkv6}$	0,5931	0,3149	0,4112	0,1176

Анализ результатов показывает, что по сравнению с углеродными эквивалентами (1)–(6) предлагаемые (8)–(11) в основном дают более высокие значения R^2 . Применение показателей (8)–(11) можно считать более целесообразным, так как они включают именно те элементы химического состава, которые учитываются в плавочных химических составах стали марок 60–85, а также оказывают значимое влияние на свойства и микроструктуру канатной катанки. Применение предлагаемых углеродных эквивалентов в создаваемой модели взаимосвязи показателей качества с технологическими факторами процесса производства канатной катанки позволит снизить

погрешность аппроксимаций за счет исключения взаимокоррелирующих факторов.

Решение задачи стабилизации воспроизводимости механических характеристик и показателей качества основано на использовании регрессионных зависимостей показателей качества катанки от свойств исходной заготовки и технологических факторов производства. С этой целью использовали математический аппарат обработки статистических данных и программы Statistica [20, 21]. На основе регрессионного анализа по методу включения переменных рассчитали уравнения регрессии, содержащие факторы, которые наиболее значимо влияют на показатели качества (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КАНАТНОЙ КАТАНКИ

TABLE 5. REGRESSION EQUATIONS OF QUALITY INDICES OF ROPE WIRE RODS

Уравнение	R^2	$F_{табл.}$	F_p	Стандартная ошибка	Погрешность, %
$\sigma_{в1} = 226,602 + 711,635C_{св} - 0,092T_6 + 0,3887T_2 - 1,977\Phi_2$	0,93	4,48	15,553	41,158	4
$B_{пл} = 96,87184 + 33,53353C_{Бпл} - 0,05156T_4 + 0,00936T_6$	0,83	3,49	4,4349	4,6107	6
$\psi_1 = 135,6125 - 59,2948C_{\psi} - 0,0394T_2 + 1,0123\Phi_1 + 0,0089T_6 - 0,0352T_4 - 0,1668\Phi_2$	0,87	6,46	12,722	3,5936	11
$\delta_1 = 10,0731 - 10,7391C_{\delta} + 0,0494T_{14} - 0,0187T_2 + 0,3054\Phi_1 + 0,0126T_{10} - 0,0484\Phi_2$	0,91	6,46	10,11	1,0444	9

Анализ рассчитанных уравнений регрессии (см. табл. 5) позволяет сделать следующие выводы. Влияние углеродного эквивалента отражается присутствием его во всех уравнениях и связано с величиной содержания углерода и других химических элементов в стали. Увеличение значения углеродного эквивалента вызывает возрастание временного сопротивления разрыву $\sigma_{в1}$, в то время как повышение температуры перед чистовой группой клетей снижает его. В случае изменения пластических свойств увеличение значения углеродного эквивалента способствует

снижению величины относительного удлинения λ_1 и относительного сужения ψ_1 . Повышение температуры как в потоке стана (перед чистовой группой), так и при формировании бунта приводит к увеличению значений характеристик пластичности. Прослеживается возрастание доли пластичного перлита при увеличении значения углеродного эквивалента.

Общие тенденции изменения показателей качества, моделируемые полученными уравнениями регрессии, коррелируют с производственными данными.

При доверительной вероятности 95 % статистически значимыми являются все полученные уравнения взаимосвязи показателей качества катанки с технологическими факторами ее производства, так как рассчитанные числа Фишера больше табличных [23, 24]. Погрешность полу-

ченных регрессионных зависимостей находится в пределах 4–11 %, поэтому они могут быть использованы в качестве математических моделей в системе прогнозирования и управления механическими свойствами высокоуглеродистой катанки.

Заключение

Выбор значений технологических параметров процесса производства высокоуглеродистой катанки определяет величину механических свойств и показателей качества. При наличии вариации каких-либо технологических параметров происходит отклонение от заданных значений показателей качества. Представленные уравнения регрессии дают возможность прогнозирования значений показателей качества и эффективной коррекции режимов прокатки катанки,

что повышает стабильность воспроизводимости механических характеристик и показателей качества катанки.

При необходимости изменения регламентированного уровня значений показателей качества использование полученных математических зависимостей позволит внести корректировку диапазона значений технологических параметров процесса прокатки катанки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рашников В.Ф., Сеничев Г.С., Гасилин А.В. и др. Опыт коренной реконструкции сортового производства ОАО ММК // *Сталь*. 2007. № 2. С. 67–73.
2. Матвеев Б.Н. Методы повышения качества сорта и катанки // *Производство проката*. 2001. № 1. С. 40–47.
3. Горбанев А.А., Юнаков А.М., Шарф Й.М. и др. Исследование качества катанки, прокатанной на стане 150 с использованием низкотемпературного блока клетей // *Производство проката*. 2000. № 2. С. 20–27.
4. Kwon H.-C., Lee H.-W., Kim H.-Y. etc. Surface wrinkle defect of carbon steel in the hot bar rolling process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. P. 4476–4483.
5. Sakiyama S., Sattoh K., Nakajima T. etc. Progress of Bar and Wire Rod Rolling Process, and Improvement of Basic Quality // *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2016. Vol. 111. P. 50–58.
6. Соколов А.А., Шубин И.Г., Гун Г.С. и др. Моделирование процесса волочения с целью оценки его влияния на структуру и свойства проволоки // *Производство проката*. 2005. № 6. С. 21–23.
7. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Попов А.О., Шурыгин В.И. Особенности автоматизированного проектирования режимов прокатки на ШСГП при решении задачи обеспечения стабильности контрольных параметров процесса и полосы // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2012. № 4 (40). С. 42–45.
8. Лунев В.Е., Куранов К.Ю., Шубин И.Г. и др. Управление шероховатостью лент с помощью несимметричной прокатки // *Производство проката*. 2003. № 6. С. 28, 29.
9. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Митасов В.С., Насонов В.В. Сравнение методов прогнозирования деформационного упрочнения металла при автоматизированном проектировании режимов холодной прокатки // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2012. № 2. С. 39–42.
10. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Попов А.О. и др. Автоматизированное проектирование технологии горячей прокатки высокопрочной стали на широкополосных станах различных типов для автомобилестроения // *Черные металлы*. 2012. № 12. С. 17–21.
11. Малаховский Д.Е., Румянцев М.И., Шубин И.Г. и др. Моделирование процесса прокатки и охлаждения на толстолистовом стане для оценки концептуальных проектных технических и технологических решений в условиях неопределенности основных параметров оборудования // *Производство проката*. 2009. № 7. С. 24–31.
12. Бородин Е.Н., Шубин И.Г., Румянцев М.И. К оценке влияния показателей качества и количества брака на комплексную оценку результативности производства канатов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2012. Т. 1. № 70. С. 280–282.
13. Kiriha K. Production Technology of Wire Rod for High Tensile Strength Steel Cord // *Kobelco Technology Review*. 2011. Vol. 30. P. 62–65.
14. Шубин И.Г., Румянцев М.И., Торопицина У.А. и др. Конструирование характеристик влияния химического состава стали на показатели качества высокоуглеродистой канатной катанки // *Производство проката*. 2009. № 3. С. 12–15.
15. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Загузов Д.Ю. и др. К вопросу построения модели для расчета составляющих температурного режима металла в линии широкополосного стана горячей прокатки // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2006. № 1. С. 26–34.
16. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Носенко О.Ю. Конструирование модели для расчета температуры низколегированных сталей при прокатке на ШСГП // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2007. № 1. С. 54–57.
17. Шубин И.Г., Румянцев М.И., Степанова Е.Н. Оценка результативности и стабильности производства грузоподъемных канатов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 6. С. 46–48.
18. Бородин Е.Н., Шубин И.Г., Румянцев М.И. Управление качеством канатной проволоки и канатов на основе множественного регрессионного анализа // *Механика и актуальные проблемы металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр.; под ред. О.С. Железкова*. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. С. 136–145.
19. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Корнилов В.Л. и др. К вопросу создания модели изменчивости показателей качества оцинкованного проката в зависимости от режимов цинкования // *Производство проката*. 2011. № 3. С. 22–25.

20. Боровиков В.П., Боровиков И.П. Statistica. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. — М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1997. — 608 с.
21. Богатова В.П. Регрессионный анализ данных на ПК в примерах и задачах (система STATISTICA). — Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2001. — 35 с.
22. Шубин И.Г., Шубина М.В. Основы материаловедения: учебное пособие. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. — 193 с.
23. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1988. — 239 с.
24. Адлер Ю.П., Полховская Т.М., Нестеренко П.А. Управление качеством. Часть 1. Семь простых методов: учебное пособие. — М.: МИСиС, 1999. — 163 с.
25. ГОСТ 19281–89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 1989. — 18 с.
26. ГОСТ 5781–82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 1982. — 16 с.
27. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник / Под ред. Б.Е. Неймарк. — М.–Л.: Энергия, 1967. — 240 с.

Поступила 9 октября 2018 г.

REFERENCES

1. Rashnikov V.F., Senichev G.S., Gasilin A.V. etc. Experience of OJSC “MMK” long products production deep modernization. *Stal*, 2007, no. 2, pp. 67–73. (In Russ.).
2. Matveev B.N. Methods of quality increase of long products and wire rods. *Proizvodstvo prokata*, 2001, no. 1, pp. 40–47. (In Russ.).
3. Gorbanev A.A., Yunakov A.M., Sharf I.M. etc. Study of wire rods quality, rolled at 150 mills with low temperature stand blocks using. *Proizvodstvo prokata*, 2000, no. 2, pp. 20–27. (In Russ.).
4. Kwon H.-C., Lee H.-W., Kim H.-Y. etc. Surface wrinkle defect of carbon steel in the hot bar rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, pp. 4476–4483.
5. Sakiyama S., Satoh K., Nakajima T. etc. Progress of Bar and Wire Rod Rolling Process, and Improvement of Basic Quality. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 2016, vol. 111, pp. 50–58.
6. Sokolov A.A., Shubin I.G., Gun G.S., Bogatov A.A., Smirnov S.V. Drawing process simulation aimed at estimation of its influence on wire structure and properties. *Proizvodstvo prokata*, 2005, no. 6, pp. 21–23. (In Russ.).
7. Rummyantsev M.I., Shubin I.G., Popov A.O., Shurygin V.I. Peculiarities of automated designing of rolling modes at HRMs purposed on solving tasks of the process and strip control parameters stability provision. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2012, no. 4 (40), pp. 42–45. (In Russ.).
8. Lunev V.E., Kuranov K.Yu., Shubin I.G., Rummyantsev M.I., Purtov Yu.A. Control of bands roughness by asymmetric rolling. *Proizvodstvo prokata*, 2003, no. 6, pp. 28, 29. (In Russ.).
9. Rummyantsev M.I., Shubin I.G., Mitasov V.S., Nasonov V.V. Comparison of forecasting methods of metal deformation hardening at automated designing of cold rolling modes. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2012, no. 2, pp. 39–42. (In Russ.).
10. Rummyantsev M.I., Shubin I.G., Popov A.O., Gorbunov A.V., Vetrenko A.G. Automated designing of hot rolling technology of high strength automobile steel at different types HRMs. *Chernye metally*, 2012, no. 12, pp. 17–21. (In Russ.).
11. Malakhovskii D.E., Rummyantsev M.I., Shubin I.G., Mitasov V.S., Salo V.Yu., Zinchenko Yu.B., Kuz'min A.N. Plate mill rolling and cooling processes simulation for estimation of conception designing technical and technological solutions under conditions of uncertainty of equipment main parameters. *Proizvodstvo prokata*, 2009, no. 7, pp. 24–31. (In Russ.).
12. Borodina E.N., Shubin I.G., Rummyantsev M.I. About estimation of quality indices and amount of wastage influence on complex estimation of ropes production efficiency. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*, 2012, vol. 1, no. 70, pp. 280–282. (In Russ.).
13. Kiriara K. Production Technology of Wire Rod for High Tensile Strength Steel Cord. *Kobelco Technology Review*, 2011, vol. 30, pp. 62–65.
14. Shubin I.G., Rummyantsev M.I., Toropitsina U.A., Sirotyuk A.P., Demidova O.O., Azarov A.P. Designing of influence characteristics of steel chemical composition on high carbon rope wire rods quality indices. *Proizvodstvo prokata*, 2009, no. 3, pp. 12–15. (In Russ.).
15. Rummyantsev M.I., Shubin I.G., Zaguzov D.Yu., Nosenko O.Yu., Igumenov S.V. About model elaboration for calculation of metal temperature modes in the line of HRM. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*, 2006, no. 1, pp. 26–34. (In Russ.).
16. Rummyantsev M.I., Shubin I.G., Nosenko O.Yu. Model designing for temperature calculation of low carbon steels for rolling at HSMs. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2007, no. 1, pp. 54–57. (In Russ.).
17. Shubin I.G., Rummyantsev M.I., Stepanova E.N. Estimation of efficiency and stability of hoisting cranes. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2012, no. 6, pp. 46–48. (In Russ.).
18. Borodina E.N., Shubin I.G., Rummyantsev M.I. *Upravlenie kachestvom kanatnoi provoloki i kanatov na osnove mnozhestvennogo regressionnogo analiza* [Quality control of rope wire rods and ropes based on multiple regression analysis]. *Mekhanika i aktual'nye problemy metallurgicheskogo mashinostroeniya: mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Mechanics and current problems of metallurgical engineering: Proc.]. Zhelezkov O.S. ed. Magnitogorsk: izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2014, pp. 136–145. (In Russ.).
19. Rummyantsev M.I., Shubin I.G., Kornilov V.L., Papshev A.V., Shubina O.I., Shalimova K.E., Shubina N.I. About creation of a model of galvanized products quality indices variability depending on galvanizing modes. *Proizvodstvo prokata*, 2011, no. 3, pp. 22–25. (In Russ.).

20. Borovikov V.P., Borovikov I.P. *Statistica. Statisticheskii analiz i obrabotka dannykh v srede Windows* [Statistica. Statistical analysis and data processing in Windows media]. Moscow: Informatsionno-izdatel'skii dom "Filin", 1997, 608 p. (In Russ.).
21. Bogatova V.P. *Regressionnyi analiz dannykh na PK v primerakh i zadachakh (sistema STATISTICA)* [Regression data analysis at PC in examples and tasks (STATISTICA system)]. Voronezh: Voronezhskii gos. un-t, 2001, 35 p. (In Russ.).
22. Shubin I.G., Shubina M.V. *Osnovy materialovedeniya* [Base of metal science]. Magnitogorsk: izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2014, 193 p. (In Russ.).
23. L'vovskii E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods of empirical formulas elaboration]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 239 p. (In Russ.).
24. Adler Yu.P., Polkhovskaya T.M., Nesterenko P.A. *Upravlenie kachestvom. Chast' 1. Sem' prostykh metodov* [Quality control. Part I. Seven simple methods]. Moscow: MISiS, 1999, 163 p. (In Russ.).
25. *GOST 19281–89. Prokat iz stali povyshennoi prochnosti. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 19281–89. Steel rolled products of increased strength. General technical specifications]. Moscow: Standartinform, 1989, 18 p. (In Russ.).
26. *GOST 5781–82. Stal' goryachekatanaya dlya armirovaniya zhelezobetonnykh konstruksii. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 5781–82. Hot rolled steel for reinforcing of concrete structures. Technical specifications]. Moscow: Standartinform, 1982, 16 p. (In Russ.).
27. *Fizicheskie svoystva stalei i splavov, primenyaemykh v energetike* [Physical properties of steels and alloys used in power engineering]. Neimark B.E. ed. Moscow–Leningrad, Energiya, 1967, 240 p. (In Russ.).

Received October 9, 2018