

УДК 621.771.25

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ**Шилов В.А.**, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением»**Куделин С.П.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика

в металлургии» (kudelinsp@mail.ru)

Инатович Ю.В., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением»**Бондин А.Р.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. В Уральском федеральном университете разработана экспертная система (ЭС) для анализа и проектирования технологии сортовой прокатки, которая может быть использована при оптимизации действующих и проектировании новых технологических процессов сортовой прокатки. Для функционирования ЭС созданы базы знаний о предметной области, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях, а также на обобщении опыта производства сортовых профилей на действующих станах. Комплексная математическая модель расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки, созданная на основе современных представлений о механике деформируемого тела, позволяет рассчитывать полный комплекс технологических и энергосиловых параметров моделируемого процесса. Программное обеспечение ЭС разработано для операционной системы Windows с использованием среды визуального программирования Borland C++ Builder.

Ключевые слова: экспертная система, база знаний, база данных, наборы правил, сортовая прокатка, калибровка валков, математическое моделирование, оптимизация.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-710-715

Решение задач автоматизированного проектирования технологических режимов прокатки возможно на основе применения методов искусственного интеллекта, одним из проявлений которого являются экспертные системы (ЭС), находящие все большее применение в различных предметных отраслях [1 – 3].

В Уральском федеральном университете (УрФУ) создана ЭС для анализа и проектирования технологии сортовой прокатки. Разработанная ЭС технологии сортовой прокатки предназначена для оперативного анализа и экспертной оценки технологических процессов прокатки сортовых профилей на станах с непрерывным и последовательным расположением рабочих клетей. При этом она позволяет решать достаточно широкий круг задач моделирования, диагностики и оптимизации действующих и проектируемых технологических процессов, а также определения параметров настройки прокатных станов при реализации рассчитанных технологических режимов.

В частности, специалисту-пользователю система предоставляет возможность:

- рассчитывать полный комплекс технологических параметров прокатки заданного профиля и проводить их экспертную оценку;
- определять влияние температуры нагрева заготовки на технологические параметры и нагруженность оборудования стана;

- моделировать влияние скоростного режима прокатки на изменение технологических параметров и условия работы прокатных клетей;
- определять влияние марки прокатываемой стали на заполнение калибров и параметры силовой загрузки оборудования;
- определять возможность прокатки заданной марки стали в условиях действующей калибровки валков прокатного стана;
- находить причины поломок оборудования рабочих клетей;
- прогнозировать точность прокатки заданного профиля на стане с заданной жесткостью рабочих клетей;
- выявлять резервы совершенствования технологии по различным показателям (повышение производительности, снижение расхода тепловой и электрической энергии, увеличение степени загрузки оборудования);
- проводить оптимизацию и рационализацию действующих и проектируемых технологических процессов по критериям быстродействия и экономии материально-энергетических ресурсов;
- определять установочные межвалковые зазоры в рабочих клетях при прокатке заданного профиля по запроектированным технологическим режимам.

Для функционирования ЭС технологии сортовой прокатки были созданы базы знаний о предметной области, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях, а также на обобщении опыта производства сортовых профилей на действующих станах.

Декларативные знания (характеристика прокатных станов, сортамент прокатываемых профилей, калибровки валков и режимы прокатки, требования к качеству и точности профилей и т.п.) представлены в виде пяти реляционных баз данных (БД).

Для представления процедурных (формализованных) знаний о технологических процессах сортовой прокатки допустимо использовать различные математические модели (классическую теорию прокатки и расчета крутящего момента [4], метод конечных элементов [4], генетический алгоритм расчета формоизменения [5] и др.). В ЭС применена математическая модель формоизменения и энергосиловых параметров, разработанная в УрФУ на основе использования вариационных принципов теории пластичности и статистического обобщения действующих калибровок валков [6].

Для обработки комплекса формализованных знаний с целью принятия решения использованы производственные модели.

Структурная схема ЭС технологии сортовой прокатки приведена на рис. 1. В ее состав входят 13 основных модулей.

Функционирование системы начинается с формирования исходной информации в модуле 1. При этом необходимые для решения задачи параметры вызываются из соответствующих баз данных и записываются в специальные файлы-таблицы. В разработанную ЭС включены следующие БД:

- по составу прокатных станов, работающих на отечественных металлургических заводах, и сортаменту прокатываемых на них профилей (БД «Заводы, станы, сортамент»);

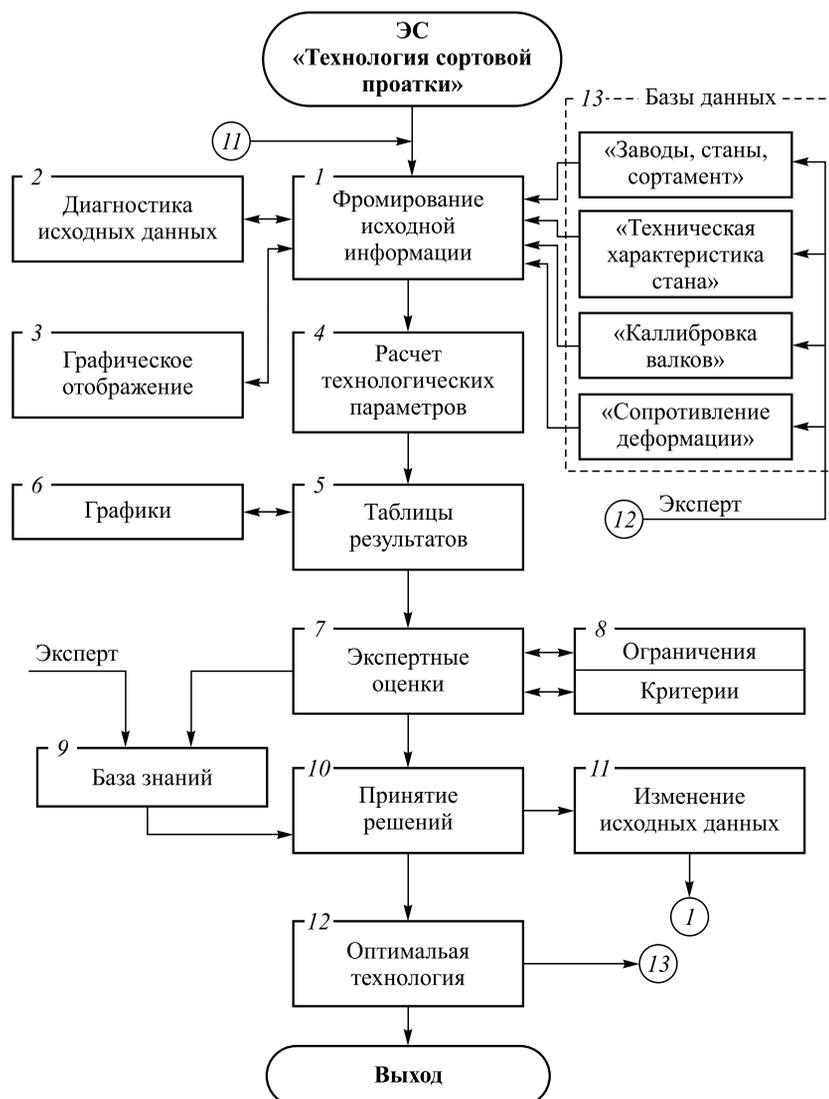


Рис. 1. Структурная схема экспертной системы технологии сортовой прокатки

Fig. 1. Structural diagram of Expert System of bar rolling technology

- по технической характеристике прокатных стан- ных (БД «Техническая характеристика стана»);
- по калибровкам валков и режимам деформации при прокатке характерных профилей (БД «Калиб- ровка валков»);
- по требованиям стандартов к точности прокаты- ваемых профилей (БД «Требования к точности»);
- по коэффициентам для определения сопротивле- ния деформации различных сталей и сплавов (БД «Сопротивление деформации»).

Если анализируемый прокатный стан и технологический режим в БД отсутствуют, то информация о техни- ческой характеристике этого стана, калибровке валков и технологических режимах прокатки предварительно вводится в соответствующие БД. Таким образом, идет постепенное накопление информации в БД, что создает возможность для проектирования технологии прокатки новых профилей по аналогам.

Сформированная исходная информация подвергается диагностике на предмет выявления ошибок (мо- дуль 2). Предусмотрено графическое изображение ана- лизируемых или проектируемых калибров и задаваемых в них полос на экране монитора (модуль «Графическое отображение»).

На основе сформированной исходной информации в модуле 4 производится расчет полного комплекса тех- нологических и энергосиловых параметров моделируе- мого процесса.

Комплексная модель расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки позволяет рас- считывать формоизменение металла и энергосиловые параметры для любой системы калибров простой фор- мы в зависимости от следующих безразмерных пара- метров, однозначно характеризующих форму и разме- ры очага деформации при прокатке по любой системе калибров, например, по системе овал–овал (рис. 2):

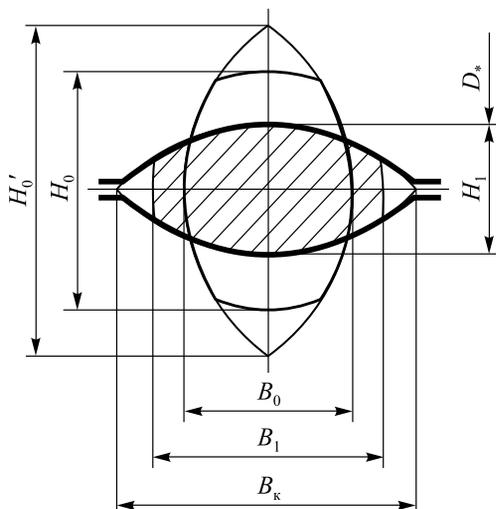


Рис. 2. Схема прокатки по системе калибров овал–овал

Fig. 2. The scheme of rolling on oval–oval caliber system

приведенный диаметр валков $A = D_*/H_1$; коэффициент обжатия $1/\eta = H_0/H_1$; отношение сторон задавае- мого раската $a_0 = H_0/B_0$ и калибра $a_k = B_k/H_1$; степень заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра $\delta_0 = H_0/H'_0$; для ящичных калибров, кроме перечи- сленных параметров, выпуск ящичного калибра $\text{tg}\varphi$. Условия трения на контактной поверхности характе- ризуются показателем трения $\psi = \tau/\tau_s$, определяемым в зависимости от температуры металла и схемы про- катки (τ – напряжения трения, τ_s – предел текучести металла на сдвиг).

С учетом данных параметров рассчитывают следу- ющие характеристики формоизменения металла:

- коэффициент уширения

$$\beta = 1 + C_0 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^{C_1} A^{C_2} a_0^{C_3} a_k^{C_4} \delta_0^{C_5} \psi^{C_6} \text{tg}\varphi^{C_7} \times \left[1 + 0,6 \left(\frac{\sigma_{s_i}}{\sigma_{s_6}} - 1 \right)^{0,544} \right];$$

- ширину полосы $B_1 = B_0\beta$;
- степень заполнения калибра $\delta_1 = B_1/B_k$;
- площадь поперечного сечения раската

$$\omega_1 = H_1^2 f(\delta_1, a_k, \text{tg}\varphi);$$

- коэффициент вытяжки $\lambda_1 = \omega_0/\omega_1$,

где $C_0, C_1, C_2, \dots, C_7$ – коэффициенты, принимающие численные значения в зависимости от схемы прокатки; σ_{s_i} и σ_{s_6} – сопротивление деформации прокатываемой (σ_{s_i}) и базовой низкоуглеродистой стали (Ст3), опреде- ляемое по методу термомеханических коэффициентов А.А. Третьякова-В.И. Зюзина, Л.В. Андреюка-Г.Г. Тю- ленева или каким-либо другим методом [7, 8].

Энергосиловые параметры рассчитывают по форму- лам:

- среднее контактное давление $p = 1,15 n_\sigma \sigma_s$;
- сила прокатки $P = pF$;
- крутящий момент деформации $M_{\text{вал}} = 0,287 \sigma_s H_1^3 \times A^2 n_{\text{вал}}$;
- мощность прокатки $N_{\text{пр}} = 2M_{\text{вал}} H_1 U/A$,

где n_σ – коэффициент напряженного состояния, учиты- вающий влияние контактного трения и жестких концов; F – контактная площадь; $n_{\text{вал}}$ – коэффициент мощности прокатки; U – скорость прокатки. Коэффициенты n_σ , $n_{\text{вал}}$ и контактную площадь определяют в зависимости от схемы прокатки по формулам, имеющим общую структуру следующего функционального вида:

$$n_\sigma = f_1 \left(\frac{l}{H_{\text{cp}}}, a_k, A, a_0, \psi \right); n_{\text{вал}} = f_2(\lambda, A, \psi);$$

$$F = H_1^2 f_3 \left(\frac{1}{\eta}, A, a_0, a_k, \delta_0 \right).$$

Для схем прокатки, включающих калибры, форма которых отличается от обычных размеров калибров простой формы, система расчетов предусматривает определение энергосиловых параметров, при этом фасонные калибры и раскаты заменяются соответственными прямоугольными.

Скорости прокатки U_i в каждой i -ой клети непрерывного и последовательного стана рассчитываются с учетом условия постоянства секундных объемов: $U_i = u_{i-1} \lambda_i$. Одновременно рассчитываются минимально и максимально допустимые скорости прокатки $U_{\min i}$ и $U_{\max i}$ в зависимости от предельной частоты вращения и катающего диаметра валков каждой клети.

Для расчета температуры раската по проходам в системе предусмотрены две математические модели:

- с учетом потерь тепла за счет лучеиспускания и разогрева металла от деформации (две статьи теплового баланса);
- с учетом потерь тепла за счет лучеиспускания, конвекции, теплопроводности и разогрева металла от деформации (четыре статьи теплового баланса).

В результате расчетов формируются таблицы расчетных данных (модуль «Таблицы результатов»). Предусмотрена возможность представления расчетных параметров в виде графиков их изменения по проходам. С этой целью в состав системы включен модуль «Графики».

Полученная расчетная информация подвергается экспертной оценке с проверкой всех ограничений, рассчитываются критерии качества проектируемого процесса (модули 7 и 8).

В ЭС предусмотрены следующие ограничения режимов прокатки в каждом i -ом проходе:

- по степени заполнения калибров металлом $0,6 \leq \delta_i \leq 1,0$;
- по условиям захвата металла валками $\alpha_i < [\alpha]$;
- по условиям устойчивости полос в калибрах $[a]_{\min} < a_i < [a]_{\max}$;
- по прочности оборудования рабочих клеток $R_i < P_{\text{доп}i}, M_{\text{пр}i} < M_{\text{доп}i}$;
- по степени загрузки электродвигателей привода клеток (с учетом его типа) $k_{\text{дв}i} = (M_i / M_{\text{дв}i}) < 1$ или $N_{\text{пр}i} < N_{\text{дв}i}$;
- по скоростному режиму работы стана $U_{\min i} < U_i < U_{\max i}$;
- по производительности нагревательной печи $\Pi_j < \Pi_{\Pi}$,

где R_i и $M_{\text{пр}i}$ – реакция силы прокатки на шейку валка и крутящий момент прокатки и их допустимые значения $P_{\text{доп}i}$ и $M_{\text{доп}i}$; $k_{\text{дв}i}$ – коэффициент загрузки электродвигателя привода клетки; M_i , $M_{\text{дв}i}$ – крутящий момент, приведенный к валу двигателя, и момент, развиваемый электродвигателем; $N_{\text{пр}i}$ и $N_{\text{дв}i}$ – мощность прокатки и мощность электродвигателя; α_i , $[\alpha]$ – расчетный и максимально допустимый угол захвата металла валками; a_i ,

$[a]_{\min}$ и $[a]_{\max}$ – расчетное, минимально и максимально допустимое по устойчивости отношение осей раскатов неравноосных поперечных сечений; Π_j и Π_{Π} – производительность стана при прокатке j -го профилеразмера и производительность нагревательной печи.

Для оценки качества и оптимизации анализируемых и проектируемых технологических процессов в системе предусмотрено использование следующих критериев:

- производительность прокатного стана, рассчитываемая в зависимости от такта T_T или конечной скорости прокатки U_K ;
- расход электроэнергии на прокатку W_3 ;
- расход топлива W_T , контролируемый по температуре нагрева металла t_0 ;
- степень заполнения калибров δ_1 , влияющая на качество формоизменения металла;
- степень нагруженности оборудования рабочих клеток стана:

$$k_p = \frac{P_{\text{доп}}}{R_{\text{max}}}, k_m = \frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{max}}}, k_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{н}}}{N_{\text{дв}}}.$$

Результаты оценки системы ограничений приводят к безразмерному виду и формируются в виде алфавита (см. таблицу).

Продукционные модели базы знаний (модуль 9) содержат набор правил, обобщающих опыт специалистов-экспертов по улучшению качества технологических процессов. Знания хранятся с использованием таблиц целей, выводов, правил, условий и фактов (рис. 3).

В зависимости от решаемой задачи (поставленной цели) предусмотрено несколько наборов (таблиц) правил, представляющих собой цепочку логических рассуждений, основанных на применении продукций вида [2, 3] «ЕСЛИ... ТО» (условие P действие). В указанной конструкции правил между условием и действием располагаются факты, в качестве которых используются полученные расчетные данные и их экспертные оценки (см. таблицу).

Например:

«ЕСЛИ $\alpha_i / [\alpha] > 1,05$, ТО необходимо уменьшить коэффициент обжатия $1/\eta$ »;

«ЕСЛИ степень загрузки электродвигателя $k_{\text{дв}}$ равна или меньше 0,4, ТО рекомендуется увеличить коэффициент вытяжки λ »;

«ЕСЛИ $k_p > 1$, ТО возможна поломка оборудования клетки, необходимо перераспределить обжатия» и т.п.

Наряду с этим используются правила типа AUBUA&B и преобразования Де Моргана [3].

Применяя соответствующий набор правил последовательно для каждого прохода, система определяет резервы улучшения технологического процесса и формирует в модуле 10 (Машине вывода) решение по изменению режима деформации металла, выдавая его в виде сообщения на экран монитора. Пользователю предоставляется возможность согласиться с этим ре-

Экспертная оценка режима прокатки в каждой i -ой клетки прокатного стана ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

Expert estimation of regime in each i rolling mill stand ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

Параметр	Резерв		Корректировка		Большая перегрузка
	значительный	небольшой	оптимальная	небольшая	
	уровень 1	уровень 2	уровень 3	уровень 4	уровень 5
$\alpha/[\alpha]$	0,3	0,8	1,0	1,05	1,10
U/U_{\max}	0,5	0,8	0,95	1,10	1,20
$a_1/[a]_{\max}$	0,5	0,8	1,0	1,05	1,15
k_p	0,4	0,7	1,0	1,1	1,15
k_m	0,4	0,7	1,0	1,1	1,15
$k_{дв}$	0,4	0,7	1,0	1,1	1,15

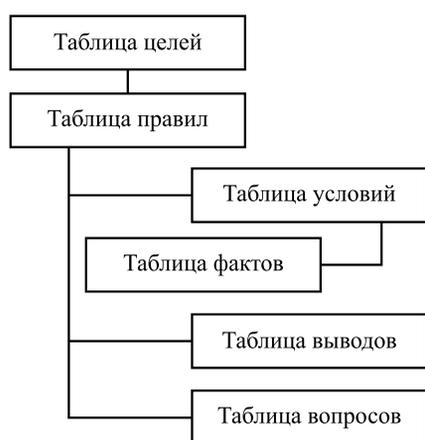


Рис. 3. Иерархия таблиц знаний

Fig. 3. The hierarchy of knowledge tables

шением или внести в него коррективы, изменить соответствующим образом исходные данные и произвести повторные расчеты. Путем такого диалога с компьютером пользователь добивается получения оптимального решения поставленной задачи. Параметры рассчитанного технологического процесса заносят в БД с целью накопления информации.

Программное обеспечение описанной ЭС разработано для операционной системы Windows с использованием среды визуального программирования Borland C++ Builder [9], БД основаны на использовании таблиц Paradox.

Указанные программные и технические средства обеспечивают достаточно простой и удобный интерфейс пользователя с компьютером посредством раскрывающихся на экране монитора окон, меню, списков, полей ввода, кнопок и т.п.

Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки» зарегистрирован в РОСПАТЕНТе [10].

Выводы. Разработана ЭС технологии сортовой прокатки, которая может быть использована в научно-исследовательских институтах и на металлургических заводах при совершенствовании действующих и проектировании новых технологических процессов сортовой прокатки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джексон П. Введение в экспертные системы: Учеб. пособие. – М.: Вильямс, 2001. – 624 с.
2. Егоров Н.В., Карпов А.Г. Диагностические информационно-экспертные системы. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. – 470 с.
3. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы. – СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2009. – 240 с.
4. Oduguwa V., Roy R. A Review of Rolling System Design Optimisation //International Journal of Machine Tools and Manufacture. June 2006. Vol. 46. Issues 7 – 8. P. 912 – 928. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1023/4/Review_Rolling_System_Design_Optimisation_2006.pdf
5. Huang B., Xing K., Abhary K., Spuzic S. Optimization of oval-round passdesign using genetic algorithm // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. August 2012. Vol. 28. Issue 4. P. 493 – 499. [Электронныйресурс]. Режим доступа: http://www.researchgate.net/publication/257242312_Optimization_of_ovalround_pass_design_using_genetic_algorithm
6. Смирнов В.К., Шилов В.А., Игнатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. – М.: Теплотехник, 2010. – 490 с.
7. Зюзин В.И., Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. – Челябинск: Металл, 2000. – 368 с.
8. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 399 с.
9. Шилдт Г. Теория и практика C++. – СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2001. – 412 с.
10. Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки» / С.П. Куделин, В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Игнатович // Свидетельство № 2001610602 от 25 мая 2001 г.

Поступила 10 апреля 2015 г.

EXPERT SYSTEM OF BAR ROLLING TECHNOLOGY

Shilov V.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming”

Kudelin S.P., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (kudelinsp@mail.ru)

Inatovich Yu.V., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming”

Bondin A.R., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. The Expert System (ES) was developed at the Ural Federal University for the analysis and design of bar rolling technologies and it can be used in the optimization of existing and design of new processes of bar rolling. For the operation of the ES a knowledge base was created about the subject area, based on theoretical and experimental studies, as well as generalizations of experience in the production of rolled bars at existing mills. A comprehensive mathematical model of calculation of rolling passes and technological rolling, created on the basis of modern ideas about the mechanics of deformable bodies, allows the calculation of a full range of technological and energy-power parameters of the simulated process. The ES software was developed for operational system Windows using the visual programming environment of Borland C++ Builder.

Keywords: Expert System, knowledge base, database, rule sets, rolling bar, rolling passes, mathematical modeling, optimization.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-710-715

REFERENCES

1. Jackson Peter. *Introduction to Expert Systems*. Addison-Wesley; 3rd Ed, 1998, 560 p. (Russ.ed.: Jackson P. *Vvedenie v ekspertnye sistemy: Ucheb. posobie*. Moscow: Vil'yams, 2001. 624 p.).
2. Egorov N.V., Karpov A.G. *Diagnosticheskie informatsionno-ekspertnye sistemy* [Diagnostic information and expert systems]. St. Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2002. 470 p. (In Russ.).
3. Ruchkin V.N., Fulin V.A. *Universal'nyi iskusstvennyi intellekt i ekspertnye sistemy* [Universal artificial intelligence and Expert Systems]. St. Petersburg: BHV-Sankt-Peterburg, 2009. 240 p. (In Russ.).
4. Oduguwa V., Roy R. A Review of Rolling System Design Optimisation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. June 2006, Vol. 46, Issues 7–8, pp. 912–928. Available at URL: https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1023/4/Review_Rolling_System_Design_Optimisation_2006.pdf
5. Huang B., Xing K., Abhary K., Spuzic S.. Optimization of oval-round pass design using genetic algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. August 2012, Vol. 28, Issue 4, pp. 493–499. Available at URL: http://www.researchgate.net/publication/257242312_Optimization_of_ovalround_pass_design_using_genetic_algorithm
6. Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Calibration of rolls]. Moscow: Teplotekhnika, 2010. 490 p. (In Russ.).
7. Zyuzin V.I., Tret'yakov A.V. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem: Spravochnik* [The mechanical properties of metals and alloys under pressure treatment: A Reference book]. Chelyabinsk: Metall, 2000. 368 p. (In Russ.).
8. Nikitin G.S. *Teoriya nepreryvnoi prodol'noi prokatki* [The theory of continuous longitudinal rolling]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2009. 399 p. (In Russ.).
9. Schildt Herbert. *Teoriya i praktika C++* [Theory and practice of C++]. SPb: BHV-Sankt-Peterburg, 2001. 412 p. (In Russ.).
10. Kudelin S.P., Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Programmnyi kompleks "Ekspertnaya sistema tekhnologii sortovoi prokatki"* [Program complex “Expert System for bar rolling technology”]. Certificate of authorship no. 2001610602, May 25, 2001. (In Russ.).

Received April 10, 2015