



There is developed the program of calculation of the endless sorted rolling parameters, which is easy adapted for analysis of rolling conditions at section mills of different types with different design-structured composition of the main technological equipment. In the mathematical model of the process of the endless sorted rolling, put into basis of this program, there is taken into account more strongly the changing of the temperature field of breakdown bar along the length of the mill and its influence on changing of the stress of metal liquidity in the mill cages and in its interstage spaces.

С. М. ЖУЧКОВ, Л. В. КУЛАКОВ, К. Ю. КЛЮЧНИКОВ, А. П. ИВАНОВ,
Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины,
В. А. ТИЩЕНКО, РУП "БМЗ"

УДК 621.771.25.04.001.5

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ

Повышение эффективности использования энергии, потребляемой на прокатном переделе, 75–80% из общего объема которой расходуется непосредственно на деформацию металла, диктует необходимость разработки новых энергоэкономных подходов к деформированию металла в процессе прокатки, в том числе на непрерывных сортовых прокатных станах [1]. Это стимулирует развитие исследований, направленных на оптимизацию процесса прокатки, поиск путей повышения эффективности использования энергии.

Оптимизация процесса прокатки по энергопотреблению на действующих непрерывных сортовых прокатных станах, а также при проектировании новых агрегатов требует определения с достаточной степенью точности во взаимосвязи технологических параметров прокатки – деформационных, энергосиловых, температурно-скоростных и др. При этом должна быть обеспечена возможность варьирования параметрами прокатки для поиска рационального технологического решения. В связи с этим разработка соответствующих математических моделей, адекватно описывающих процесс непрерывной прокатки и программных средств, основанных на этих моделях, для расчета параметров непрерывной сортовой прокатки, является актуальной технической задачей.

Таким образом, для решения поставленной задачи прежде всего необходима методологически связанная и корректная математическая модель непрерывной сортовой прокатки, учитывающая основные параметры процесса и взаимное влияние параметров прокатки друг на друга. В разработанной программе расчета параметров сортовой прокатки используется математическая модель, созданная на основании результатов исследований и разработок в этой области специалистов отдела физико-технических проблем процессов прокатки сортового и специального проката Института черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины. Модель построена с учетом основных положений теории прокатки и особенностей процесса непрерывной сортовой прокатки [2–5].

Отличительной особенностью разработанной математической модели, описывающей процесс непрерывной сортовой прокатки, является более строгий учет параметра, в значительной степени определяющего изменение напряжения текучести металла в клетях стана и в его межклетевых промежутках – температурного поля раската по длине стана. При непрерывной прокатке процессы упрочнения и разупрочнения, определяющие величину напряжения текучести металла, протекают в условиях изменяющейся температуры прокатываемого металла, поэтому строгий учет температурного поля раската по длине стана весьма важен и осуществляется нами в соответствии с рекомендациями работ [6–10]. При этом температуру металла на выходе из очага деформации рабочей клетки определяли по выражению, которое учитывает разогрев металла от тепла деформации и теплоотдачи в валки:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{вх}} + \Delta t_{\text{д}} - \Delta t_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{вых}}$ – соответственно температура металла на входе и выходе клетки, °С; $\Delta t_{\text{д}}$ – повышение температуры металла за счет тепла деформации, °С; $\Delta t_{\text{в}}$ – падение температуры от контакта металла с валками, °С.

Прирост температуры металла за счет тепла деформации в клетях стана рассчитывали по формуле [11]

$$\Delta t_{\text{д}} = \frac{p_{\text{ср}} \varepsilon}{\rho_{\text{T}} c} \eta_{\text{вых}}, \quad (2)$$

где $p_{\text{ср}}$ – среднее контактное давление; ε – истинная (логарифмическая) степень деформации; $\eta_{\text{вых}}$ –

коэффициент выхода тепла (для стали $\eta_{\text{вых}} = 0,84 - 0,94$, в расчетах принято среднее значение $\eta_{\text{вых}} = 0,89$); ρ_T, c – соответственно плотность и теплоемкость стали.

По данным работы [15], теплоемкость стали при температуре раската $< 930^\circ\text{C}$ определяли по выражению $c = 2157,98 - 1,6454t_{\text{вх}}$; при температуре $> 930^\circ\text{C}$ теплоемкость стали принимали равной $660,47 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Для определения плотности стали в зависимости от изменения температуры использовали выражение

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + 3\alpha\Delta t \left[1 + \alpha\Delta t + \frac{1}{3}\alpha^2\Delta t^2 \right]}, \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность стали при нормальных условиях ($t_0 = 20^\circ\text{C}$); α – коэффициент линейного расширения стали; $\Delta t = t - t_0$ (t – температура стали).

Падение температуры от контакта металла с валками находили по выражению Венцеля [11]:

$$\Delta t_b = \frac{4,87}{h_{\text{опр}} + h_{\text{инп}}} (t_{\text{вх}} - t_b) \sqrt{\frac{2l_d h_{\text{опр}}}{1000(h_{\text{опр}} + h_{\text{инп}})v_{\text{пр}}}}, \quad (4)$$

где t_b – температура рабочего валка, $^\circ\text{C}$ (в расчетах принимали $t_b = 60^\circ\text{C}$); l_d – длина очага деформации, мм; $h_{\text{опр}}$ и $h_{\text{инп}}$ – соответственно высота приведенной полосы до и после очага деформации, мм; $v_{\text{пр}}$ – скорость прокатки, м/с.

Для определения изменения температуры раската в межклетьевом промежутке использовали зависимости, учитывающие потери тепла излучением и конвекцией. При этом время междеформационной паузы τ_n условно делили на ряд равновеликих временных промежутков $\Delta\tau_i$. Снижение температуры Δt_i полосы за время $\Delta\tau_i$ рассчитывали по выражению:

$$\Delta t_i = \alpha_{\Sigma} \frac{\Pi}{F_{\text{сеч}}} \frac{(t_i - t_0)}{c\rho_i} \Delta\tau_i, \quad (5)$$

где i – порядковый номер временного промежутка; $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{и}} + \alpha_{\text{к}}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи; $\alpha_{\text{и}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением; $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией; $\Pi/F_{\text{сеч}}$ – отношение периметра к площади поперечного сечения; t_i – температура металла в начале i -го временного промежутка; t_0 – температура окружающей среды.

Коэффициент теплоотдачи излучением вычисляли по выражению:

$$\alpha_{\text{и}i} = \frac{\xi C_0 \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{T_i - T_0}, \quad (6)$$

где ξ – степень черноты раската; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_i – температура металла в начале i -го временного промежутка, К; T_0 – температура окружающей среды, К.

Степень черноты для стали рассчитывали с помощью зависимости, полученной Ф.Серединским [10]:

$$\xi = \left(\frac{T_i - 273}{1000} \right) \left(0,125 \cdot \frac{T_i - 273}{1000} - 0,38 \right) + 1,1. \quad (7)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекций определяли по известным критериальным уравнениям теории подобия с учетом формы сечения раската в межклетьевом промежутке [11].

Другой особенностью математической модели, положенной в основу разработанной программы расчета параметров непрерывной сортовой прокатки, является учет изменения температурного поля раската, а также процессов упрочнения и разупрочнения прокатываемого металла вдоль линии прокатного стана в расчетах изменения напряжения текучести металла в клетях стана и в его межклетьевых промежутках.

В процессе непрерывной горячей прокатки происходит многократное нагружение металла в очагах деформации рабочих клетей с последующей его разгрузкой в межклетьевых промежутках. При этом упрочнению металла в процессе деформации в каждой клетке непрерывного стана сопутствует либо полное, либо частичное его разупрочнение между клетями стана. Неполное разупрочнение металла в промежутках стана приводит к накоплению остаточного упрочнения от клетки к клетке, что вызывает рост напряжения текучести прокатываемого металла по ходу прокатки.

Определению напряжения текучести металла при прокатке посвящены работы многих исследователей. Следует отметить работы М.Я.Бровмана [12], А.И.Целикова [13], П.И.Полухина, Г.Я.Гуна, А.М.Галкина [14], В.Н.Жучина, Г.С.Никитина, Я.С.Шварцбарта, И.Г.Зуева [11] и др.

При разработке математической модели процесса непрерывной сортовой прокатки для определения величины напряжения текучести металла и анализа влияния на нее температурно-скоростных и деформационных условий использовали методику, приведенную в работе [11]. Указанная методика достаточно полно учитывает природу металла, его температуру, длительность междеформационной паузы, историю предшествовавшего паузе деформирования.

Аналитическое выражение итогового упрочнения в очаге деформации в данном случае имеет вид

$$\sigma = \left[\sigma_{0t_1}^* \dot{\epsilon}_{x_1}^{n_{11}} + D_{t_1} \epsilon \exp \left(- \frac{\epsilon}{\epsilon_{x_1}^* \dot{\epsilon}^{n_{21}}} \right) \right]^{\left(\frac{t_2-t}{t_2-t_1} \right)} \left[\sigma_{0t_2}^* \dot{\epsilon}_{x_2}^{n_{12}} + D_{t_2} \epsilon \exp \left(- \frac{\epsilon}{\epsilon_{x_2}^* \dot{\epsilon}^{n_{22}}} \right) \right]^{\left(\frac{t-t_1}{t_2-t_1} \right)}, \quad (8)$$

где $\sigma_{0t_1}^*$, $\sigma_{0t_2}^*$, D_{t_1} , D_{t_2} , $\epsilon_{x_1}^*$, $\epsilon_{x_2}^*$, n_{11} , n_{12} , n_{21} , n_{22} – табличные значения коэффициентов для расчета упрочнения в очаге деформации; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; ϵ – истинная степень деформации металла; t_1 и t_2 – табличные значения температуры, °С; t – температура полосы, °С.

Параметры деформационного упрочнения, приведенные в выражении (8), получены обработкой опытных данных при кручении и определяются по таблицам [11].

Процесс разупрочнения представлен в виде функции, содержащей ряд экспонент времени и температуры:

$$\sigma_n - \sigma_0 = (\sigma_{\text{вых}} - \sigma_0) \times \exp \left\{ - \tau_n A_6^{\frac{\tau}{\tau_6}} \exp \left[n_t \left(\frac{t}{t_6} - 1 \right) + a_\tau \left(1 - \frac{\tau}{\tau_6} \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

где σ_n – наследственное напряжение текучести металла (на входе в клеть); σ_0 – начальный предел текучести металла; $\sigma_{\text{вых}}$ – напряжение текучести металла на выходе из предыдущей клетки; τ – время паузы ($\tau \leq \tau_6$); τ_n – время междеформационной паузы; A_6 – средняя скорость разупрочнения в паузе при базовой температуре t_6 и времени τ_6 ; n_t – температурный коэффициент; a_τ – временной коэффициент; t – средняя температура полосы в паузе, определяемая по выражению:

$$t = t_{\text{вых}(n-1)} - 0,5 \Delta t_{(n-1),n}.$$

Здесь $t_{\text{вых}(n-1)}$ – температура раската на выходе из предыдущей клетки; n – номер пропуска и следующей за ним паузы; $\Delta t_{(n-1),n}$ – потеря температуры за время τ_n паузы с учетом теплоотдачи излучением и конвекцией.

Для учета остаточного упрочнения ϵ_n и расчета среднего значения сопротивления деформации $\sigma_{\text{ср}}$ в очагах деформации рабочих клеток непрерывного стана использовали выражения, приведенные в работе [11]:

$$\epsilon_n = \epsilon' \left(\frac{\sigma_n - \sigma_0}{\sigma' - \sigma_0} \right)^2, \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{ср}} = \left[\sigma_{0t_1}^* \dot{\epsilon}_{x_1}^{n_{11}} + \frac{D_{t_1} (\epsilon_{x_1}^* \dot{\epsilon}^{n_{21}})^2}{\epsilon_n + \epsilon} \left[\left(\frac{\epsilon_n}{\epsilon_{x_1}^* \dot{\epsilon}^{n_{21}}} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\epsilon_n}{\epsilon_{x_1}^* \dot{\epsilon}^{n_{21}}} \right) - \left(\frac{\epsilon_n + \epsilon}{\epsilon_{x_1}^* \dot{\epsilon}^{n_{21}}} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\epsilon_n + \epsilon}{\epsilon_{x_1}^* \dot{\epsilon}^{n_{21}}} \right) \right] \right]^{\frac{t_2-t}{t_2-t_1}} \times \left[\sigma_{0t_2}^* \dot{\epsilon}_{x_2}^{n_{12}} + \frac{D_{t_2} (\epsilon_{x_2}^* \dot{\epsilon}^{n_{22}})^2}{\epsilon_n + \epsilon} \left[\left(\frac{\epsilon_n}{\epsilon_{x_2}^* \dot{\epsilon}^{n_{22}}} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\epsilon_n}{\epsilon_{x_2}^* \dot{\epsilon}^{n_{22}}} \right) - \left(\frac{\epsilon_n + \epsilon}{\epsilon_{x_2}^* \dot{\epsilon}^{n_{22}}} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\epsilon_n + \epsilon}{\epsilon_{x_2}^* \dot{\epsilon}^{n_{22}}} \right) \right] \right]^{\frac{t-t_1}{t_2-t_1}}, \quad (11)$$

где ϵ_n – наследственная степень деформации; σ' – предел текучести для произвольной степени деформации ϵ' .

Давление, силу, момент и мощность прокатки определяли по методике А.И. Целикова [13].

На рис. 1 показана структурная схема разработанной программы расчета параметров сортовой прокатки, алгоритм которой обеспечивает последовательный расчет параметров каждой последующей рабочей клетки с учетом параметров прокатки в предыдущей клетке стана. Это особенно важно при расчете температуры прокатываемого металла, которая определяется с учетом разогрева металла в очаге деформации предыдущей клетки и последующего охлаждения в межклетьевом промежутке перед каждой рассматриваемой клетью. Аналогичным образом рассчитываются скоростные параметры непрерывной прокатки. Все теплофизические характеристики металла при расчете температуры раската определяются с учетом изменения температурного поля раската по длине непрерывного сортового стана.

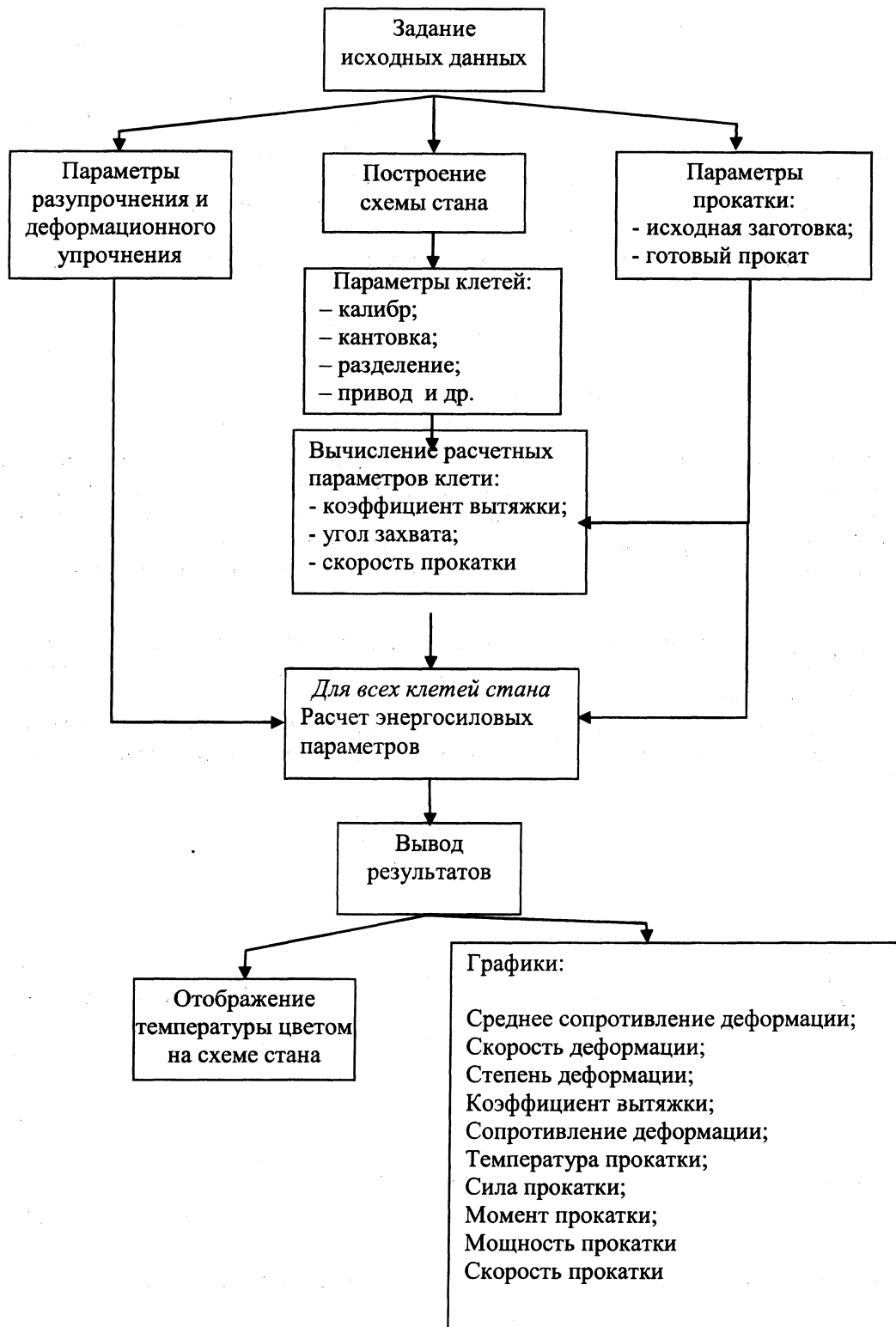














Рис. 1. Структурная схема программного средства автоматизированного расчета энергосиловых параметров непрерывной сортовой прокатки

Разработанная программа предназначена для использования в операционной системе Windows 95 и выше. Данная система разработана в интегрированной среде визуального программирования Borland C++ Builder 5, на языке программирования C++ с использованием объектно-ориентированного подхода. Справочная информация хранится в локальной базе данных в формате Paradox.

Особенностью разработанной программы расчета параметров сортовой прокатки является возможность ее адаптации для условий сортовых станов различных типов с разным конструктивно-структурным составом основного технологического оборудования. Программа содержит следующие блоки: главное меню, создание схемы стана, ввод параметров прокатки, расчет и анализ результатов.

Главное меню программы обеспечивает выполнение следующих операций:

- открыть/ сохранить схему стана   ;
- очистка текущей схемы  ;
- добавление новой клетки  ;
- изменение масштаба схемы для удобства просмотра   ;
- вызов окна для ввода общих параметров прокатки  ;
- выполнение расчета по стану с заданными параметрами  ;
- отобразить/скрыть полученные графики решения  ;
- показать таблицу калибровки стана  ;
- вызов окна, содержащего справочные данные  ;
- вызов окна "о программе"  ?

Внешний вид на экране ПЭВМ панелей инструментов главного меню разработанного средства автоматизированного расчета технологических параметров прокатки показан на рис. 2–7.

В блоке «Создание схемы стана» воспроизводится конструктивно-структурная схема непрерывного сортового стана (рис. 2), где учитываются количество рабочих клеток на стане, их тип (горизонтальная или вертикальная), длина межклетьевых промежутков, вводятся параметры рабочих клеток стана, их технические характеристики, используемая на стане калибровка валков (рис. 3) и др.

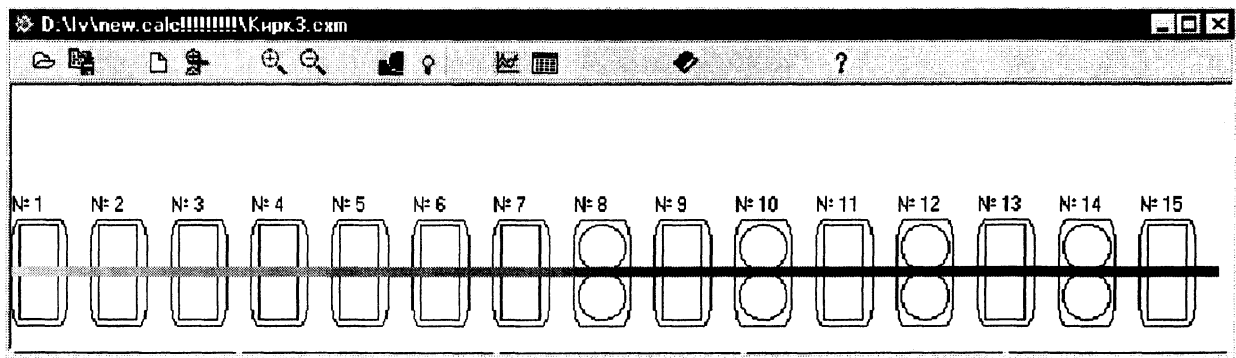


Рис. 2. Панель создания схемы стана

Номер	Тип клетки	наличие		разделен	Диаметр бочки	Высота h1	Ширина b1	Высота после	Ширина после	площадь сеч.	зазор	мощность	частота	Расстояние до
		контовки	раската											
1	г	0	1	400	62	86	0	0	4826	7	0	0	3	3
2	г	90	1	400	44	95	0	0	3695	6	0	0	3	3
3	г	0	1	400	59	59	0	0	2490	6	0	0	3	3
4	г	90	1	400	29	68	0	0	1603	5	0	0	3	3
5	г	0	1	400	41	37	0	0	1115	2	0	0	3	3
6	г	90	1	400	18,5	53	0	0	771	2	0	0	3	3
7	г	0	1	400	27,5	26,5	0	0	535	2	0	0	13	3
8	в	90	1	370	13	39,5	0	0	403	4	0	0	4	4
9	г	0	1	340	20,5	20,5	0	0	277	4	0	0	4	4
10	в	90	1	370	10	26	0	0	213	4	0	0	4	4
11	г	0	1	340	15,5	15,5	0	0	196	3	0	0	4	4
12	в	90	1	370	9	18	0	0	139	4	0	0	4	4
13	г	0	1	290	13,4	11	0	0	117	3	0	0	4	4
14	в	90	1	370	7,5	15	0	0	97	5	0	0	4	4
15	г	0	1	290	9,1	11,5	0	0	80	2	0	0	4	4

Рис. 3. Панель таблицы калибровки валков клеток стана

В блоке «Ввод параметров прокатки» вводятся исходные данные для расчета параметров прокатки, такие, как размеры исходной заготовки и готового проката, скорость прокатки на выходе из последней клетки стана, температура исходной заготовки (рис. 4). Параметры упрочнения и разупрочнения в зависимости от марки стали выбираются из справочника (рис. 5).

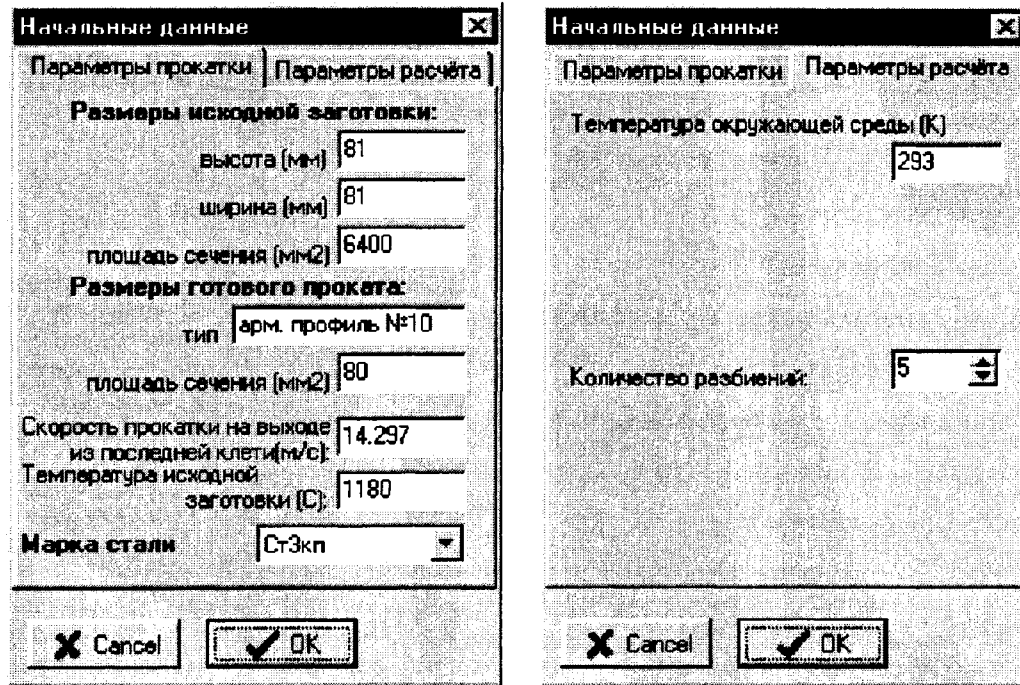


Рис. 4. Панели ввода исходных данных

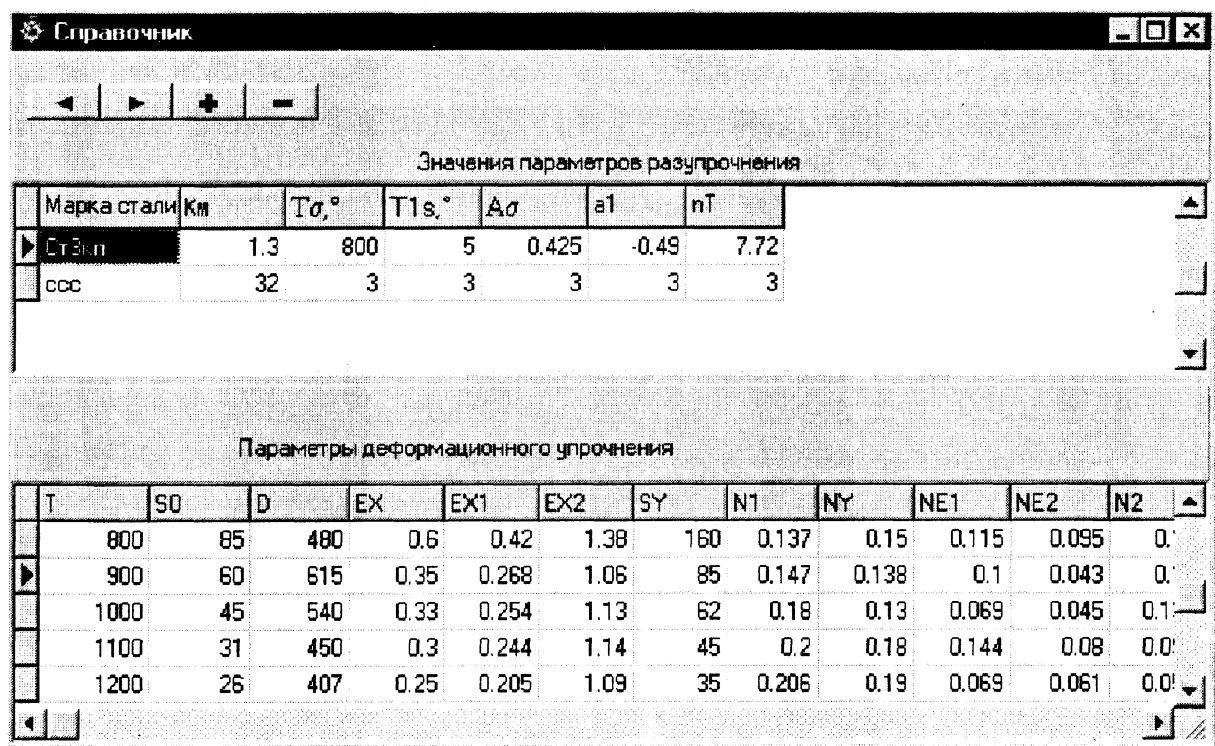


Рис. 5. Панель справочника параметров упрочнения и разупрочнения металла в линии стана

После введения указанных данных выполняется расчет параметров прокатки на стане с выводением требуемых результатов расчета на экран (на печать). Результаты расчета могут быть представлены в виде графиков или таблиц значений. На рис. 6, 7 показан внешний вид на мониторе ПЭВМ отдельных результатов расчета: напряжения текучести металла по клетям стана и температуры прокатки по клетям стана. Аналогичным образом могут быть представлены и другие параметры прокатки.

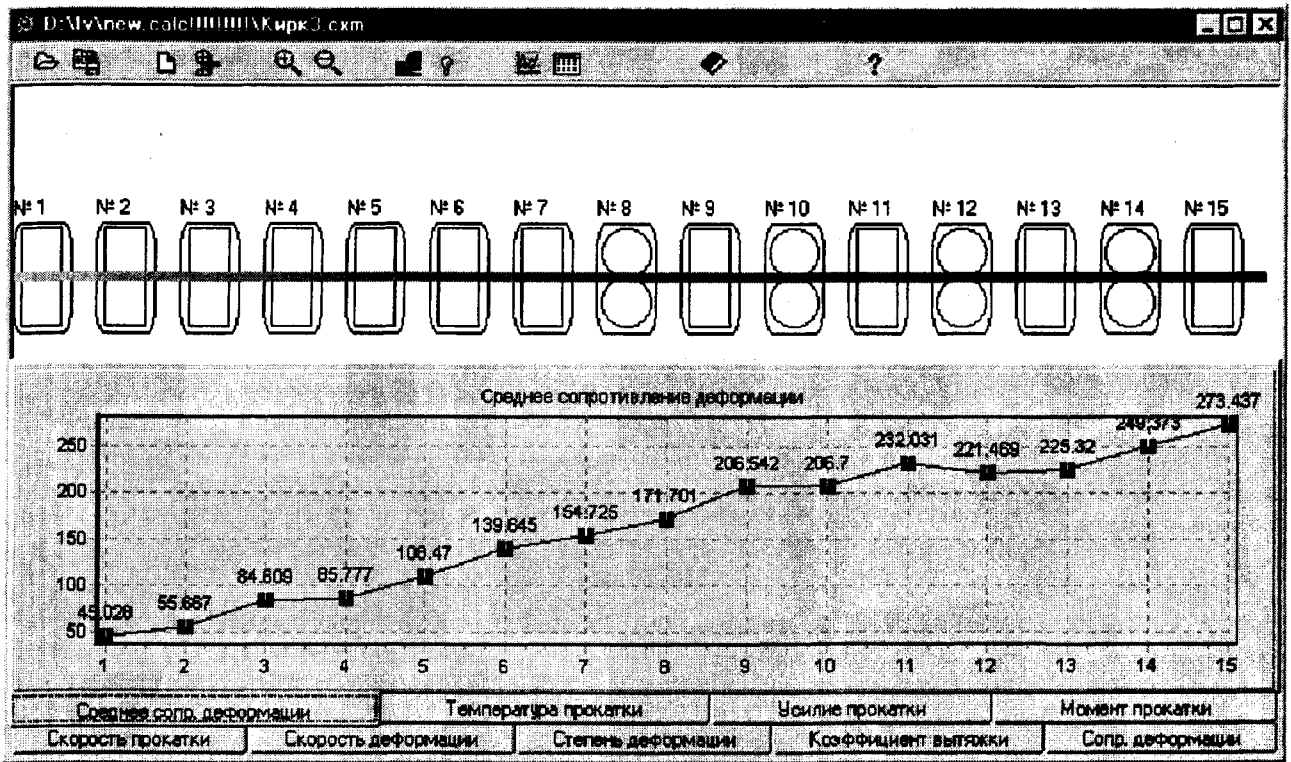


Рис. 6. Панель расчета сопротивления металла деформации по клетям стана

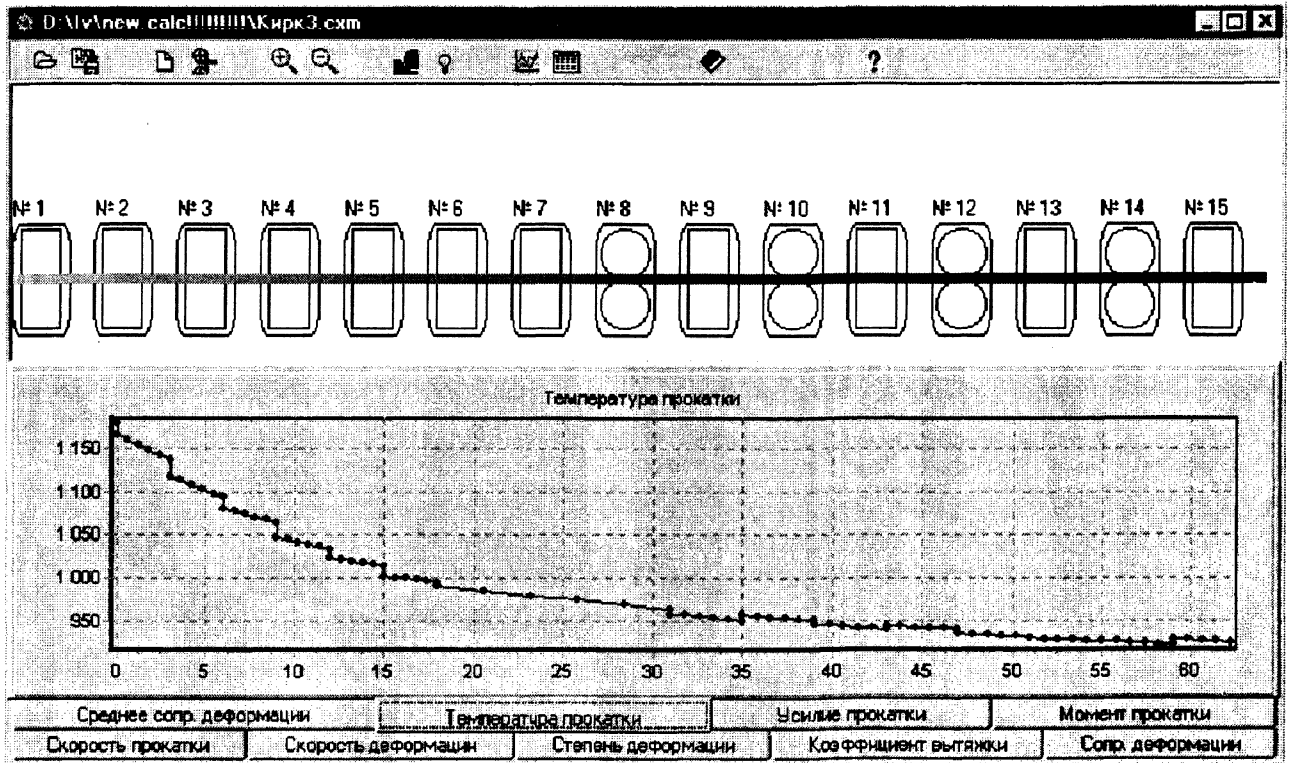


Рис. 7. Панель расчета температуры прокатки по клетям стана

В результате расчетов определяются следующие параметры процесса непрерывной сортовой прокатки:

- среднее сопротивление металла деформации в очаге деформации;
- скорость деформации;
- степень деформации;
- коэффициент вытяжки металла;

- сопротивление металла деформации в конкретной точке очага деформации;
- температура прокатки;
- сила прокатки;
- момент прокатки;
- мощность прокатки;
- скорость прокатки.

Проверка адекватности математической модели, использованной в разработанной программе расчета параметров сортовой прокатки, выполнена путем сравнения расчетных и экспериментальных данных о параметрах прокатки арматурного профиля №10 на непрерывном мелкосортном стане 250-1 комбината «Криворожсталь» [4, 5].

Анализ результатов расчетов, выполненных с помощью разработанного программного средства, и сравнение их с практическими данными показал, что оно легко адаптируется для анализа условий прокатки на сортовых станах различных типов с разным конструктивно-структурным составом основного технологического оборудования и может применяться для решения задач оптимизации процесса непрерывной сортовой прокатки по различным критериям, в том числе по энергопотреблению, а также может использоваться при создании новых эффективных технологий непрерывной сортовой прокатки.

Выводы

Разработана программа расчета параметров непрерывной сортовой прокатки на базе современной вычислительной техники, легко адаптируемая для анализа условий прокатки на сортовых станах различных типов с разным конструктивно-структурным составом основного технологического оборудования.

В математической модели процесса непрерывной сортовой прокатки, использованной при создании этой программы, осуществлен более строгий учет температурного поля раската по длине стана, а также изменение сопротивления металла деформации в клетях стана и его межклетьевых промежутках в зависимости от изменения температурного поля раската.

Литература

1. Хензель А., Шпитель Т. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации. М.: Металлургия, 1985.
2. Разработка математической модели процесса непрерывной сортовой прокатки / К.Г.Макаров, А.В.Ноговицын, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков // Теория и практика металлургии. 1999. № 6. С. 7–10.
3. Математическая модель процесса непрерывной прокатки арматурного профиля / А.В.Ноговицын, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков, К.Г.Макаров: Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. "Теоретические проблемы прокатного производства" 16–18 мая 2000 г. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 8–9. С. 77–79.
4. Адаптация математической модели процесса непрерывной сортовой прокатки для анализа условий прокатки арматурного проката на непрерывном мелкосортном стане / А.В.Ноговицын, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков, К.Г.Макаров // Теория и практика металлургии. 2000. № 1. С. 33–36.
5. Макаров К. Г., Жучков С. М., Кулаков Л. В. Моделирование температурного режима прокатки арматурного профиля №10 на мелкосортном стане 250-1 меткомбината "Криворожсталь" // Теория и практика металлургии. 2000. №5. С. 16–18.
6. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов. Свердловск: Металлургиздат, 1960.
7. Выдрин В. Н., Федосиенко А. С., Крайнов В. И. Процесс непрерывной прокатки. М.: Металлургия, 1970.
8. Целиков А. И., Гришков А. И. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970.
9. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Н.И. Яловой, М.А. Тылкин, П.И. Полухин и др. М.: Высш. шк., 1973.
10. Seredyński F. // Journal of the Iron and Steel Institute. 1973. N 3. P. 197–203.
11. Расчет усилий при непрерывной горячей прокатке / В.Н. Жучин, Г.С. Никитин, Я.С. Шварцбарт и др. М.: Металлургия, 1986.
12. Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке. М.: Металлургия, 1991.
13. Теория прокатки. Справ. / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. М.: Металлургия, 1982.
14. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.
15. Теплофизические свойства веществ: Справ. М.: Госэнергоиздат, 1966.