

С.М. Жучков, Д.С. Черненко

ПРОГРАММА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В КОМПЛЕКСЕ «ПРИВОДНАЯ – НЕПРИВОДНАЯ КЛЕТИ»

Разработан алгоритм программы автоматизированного расчёта параметров процесса прокатки в комплексе ПК–НК и программа на языке С++, обеспечивающая расчёт энергосиловых и технологических параметров прокатки в комплексе ПК–НК с учётом ограничивающих процесс факторов.

Современное состояние вопроса.

В Институте чёрной металлургии (ИЧМ) разработаны научные и технологические основы процесса непрерывной сортовой прокатки с использованием съёмных неприводных клетей (НК), устанавливаемых на выходной стороне клетей дуо, при соответствующей калибровке валков этих клетей [1]. Этот процесс основан на более полном использовании резерва стягивающих сил трения, возникающих в очагах деформации приводных клетей при прокатке [2]. Эффективность использования этого процесса, реализованного в различных технических и технологических решениях [3], определяется экономией энергозатрат при прокатке, повышением технологической гибкости и компактности стана, снижением металлоёмкости стана и уменьшением капитальных затрат на его реконструкцию [4]

Для решения задач оптимизации процесса сортовой прокатки по энергопотреблению при использовании неприводных рабочих клетей на действующих непрерывных сортовых прокатных станах, а также при проектировании новых агрегатов, необходимо с достаточной степенью точности определять во взаимосвязи технологические параметры прокатки – деформационные, энергосиловые, температурно–скоростные и др., варьировать ими для поиска рационального технологического решения. В связи с этим разработка компьютерного средства расчёта параметров процесса прокатки в комплексе приводная – неприводная клетки (ПК – НК) с последующей оценкой его адекватности реальным условиям реализации процесса, в условиях непрерывного сортового стана является актуальной задачей.

Постановка задачи.

В соответствии с результатами ранее выполненных теоретических и экспериментальных исследований разрабатываемая программа автоматизированного расчёта параметров процесса прокатки в комплексе ПК – НК должна обеспечивать:

– учёт факторов, ограничивающих условия реализации процесса прокатки в указанном комплексе: устойчивости раската продольному изгибу в межклетевом промежутке комплекса и резерва сил трения, образующегося при прокатке в очаге деформации ПК;

- учёт реологических свойств и изменения температуры металла при прокатке;
- учёт влияния трения в опорах валков ПК на сопротивление, создаваемое при прокатке этой клетью;
- широкий диапазон адаптации разработанной компьютерной программы, позволяющей выполнить расчёт основных параметров процесса прокатки при использовании комплекса ПК – НК в условиях непрерывных заготовочного, крупно-, средне- и мелкосортного станов.

Математическая модель.

В основу математической модели, как базиса компьютерной программы автоматизированного расчёта параметров процесса прокатки в комплексе ПК – НК, положены полученные ранее аналитические выражения, описывающие условия реализации процесса, и определяющие границы его осуществимости [5,6]. Таким образом, концепция математического моделирования процесса прокатки в комплексе ПК – НК предусматривала построение математической модели на основе аналитического описания процесса. При выполнении расчётов с применением разработанной математической модели в качестве исходных данных используются параметры, характеризующие обрабатываемый материал (раскат): марка стали; геометрические параметры раската, в частности, размеры его исходного сечения; технологические параметры (температура металла перед ПК комплекса и скорость прокатки в этой клетке); параметры, характеризующие комплекс ПК – НК: материал и диаметры валков клеток комплекса, их расположение (горизонтальное или вертикальное), длина межклетевого промежутка комплекса.

Разработанная с использованием указанной математической модели компьютерная программа автоматизированного расчёта создана с учётом этих положений. С её помощью можно рассчитать основные параметры процесса прокатки в комплексе ПК – НК для заданных исходных параметров раската, технологических параметров прокатки и конструктивных особенностей комплекса ПК – НК. Одной из особенностей математической модели, положенной в основу разработанной компьютерной программы расчёта, является учёт специфических факторов процесса непрерывной прокатки с использованием неприводных рабочих клеток, возможность реализации которого ограничена резервом сил трения в ПК, и устойчивостью раската продольному изгибу перед НК [6]. Определение границ осуществимости процесса прокатки в комплексе ПК – НК во многом определяет технологические возможности его реализации в условиях конкретного производства – непрерывного сортопрокатного стана.

Условия реализации процесса прокатки на непрерывном сортовом стане с использованием комплекса ПК – НК описываются системой уравнений, определяющих заталкивающую способность ПК, то есть резерв сил трения в её очаге деформации, устойчивость раската продольному изгибу перед НК и усилие сопротивления, развиваемое НК.

Система уравнений, описывающая условия реализации процесса прокатки в комплексе ПК – НК в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{рез} &= F(\sigma_{сп}, f_{п}, \Delta b_{п}, h_{0п}, h_{1п}, D_{п}) \\ \sigma_{кр} &= F((\sigma_{т}, , \\ &\left\{ \begin{aligned} \sigma_{рез} &= F(\sigma_{СП}, f_{п}, \Delta b_{п}, h_{0п}, h_{1п}, D_{п}), \\ \sigma_{кр} &= F(\sigma_{т}, E_t, k_L L_{пн}, h_{1п}, \rho_i), \\ \sigma_{пп} &= F(\sigma_{SH}, f_H, f_{ш.н}, \Delta b_H, h_{0H}, h_{1H}, D_H, k_1) \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad , (1)$$

где $\sigma_{рез}$ – напряжение резерва сил трения в очагах деформации ПК; $\Delta b_{п}$, Δb_H – уширения раската после ПК и НК соответственно; $h_{0п}$ и h_{0H} – высота раската задаваемого в приводную и не приводную клетки; $h_{1п}$ h_{1H} – высота раската на выходе ПК и НК соответственно; $D_{п}$ – диаметр приводных валков; D_H – диаметр не приводных валков; $L_{пн}$ – расстояние между приводной и не приводной клетями; $\sigma_{кр}$ – напряжение устойчивости раската продольному изгибу; $\sigma_{пп}$ – напряжение подпора создаваемое не приводной клетью; $\sigma_{сп}$ $\sigma_{сн}$ – сопротивление деформации металла в очагах деформации ПК и НК; k_i – показатель, характеризующий условия трения на валковых опорах и на контакте металла с валками НК (отношение радиусов трения в опорах и на бочке валка); $f_{ш.н}$ – коэффициент трения в валковых опорах НК; $k_L L_{пн}$ приведенная длина межклетевого промежутка между приводной и не приводной клетями с учётом условий заземления раската в очагах деформации; ρ_i – радиус инерции сечения раската в межклетевом промежутке между приводной и не приводной клетями; E_t и $\sigma_{т}$ – модуль упругости и предел текучести металла в межклетевом промежутке между ПК и НК.

При разработке компьютерной программы расчёта параметров процесса прокатки в комплексе ПК – НК использовалась система уравнений описывающих силовое взаимодействие между ПК и НК, и определяющая границы осуществимости процесса, полученная в работе [5], в результате анализа уравнений энергетического баланса системы «прокатываемый раскат – рабочий инструмент» комплекса ПК – НК.

Алгоритм разработанной программы обеспечивает последовательный расчёт:

- геометрических параметров раската и кинематических параметров прокатки в клетях комплекса;
- температурного режима прокатки в комплексе;
- напряжения текучести металла в клетях комплекса;
- энергосиловых параметров прокатки;
- учёт ограничивающих процесс факторов.

Разработанное программное средство предназначено для использования в операционной системе Windows 98 и выше. Данный программный продукт разработан в интегрированной среде визуального программирования Microsoft Visual C++ 6.0, на языке программирования C++.

На рис.1 представлено главное диалоговое окно программы на мониторе ПЭВМ.

КОМПЛЕКС ПК-НК

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В КОМПЛЕКСЕ

ВЫБРАННАЯ МАРКА: СтЭкл

ВЫБЕРИТЕ МАРКУ СТАЛИ

Сталь СтЭкл	Сталь 45
-------------	----------

Параметры выбранной марки:
Нижн. гр-ца Верхн. гр-ца

T, Celsius	900	1200
Sigma(0), МПа	60	26
D, МПа	615	407
Ex*	0.35	0.25
Ex1*	0.268	0.205
Ex2*	1.06	1.085
Sigma(y), МПа	85	35
n1	0.1465	0.206
n(y)	0.138	0.19
n(e1)	0.1	0.069
n(e2)	0.043	0.061
n2	0.11	0.057

ПАРАМЕТРЫ КОМПЛЕКСА

	ПК	НК
Р валка, мм	135	105
К-т трения(f)	0.35	0.35
Степ деф-ции	0.15	0.1
L (ПК-НК), мм	500	
Tмет(ПК), С	1100	
V0, мм/с в ПК	440	
h0, мм	25	b0, мм 25

ПАРАМЕТРЫ КОМПЛЕКСА ПО УМОЛЧАНИЮ

	ПК	НК
h1, мм	21.25	19.125
b1, мм	25.866	26.199
уширение delta(b)	0.8668	0.3328
ln(b1/b0)	0.0340	0.0127
ln(h0/h1)	0.1625	0.1053
относит. обжатие	0.15	0.1
коэф-т обжатия	0.85	0.9
коэф-т вытяжки	1.1370	1.0963
ск-ть деф-ции(1/с)	3.3353	4.0727
T-ра на выходе, С	1096.0	1081.1
Ср. напр. т-ти, МПа	82.807	79.893
Умет выхода мм/с	500.29	548.82
Полное давление мет на валок, МПа	3.8658	6.2003
Ср. давление мет. на валок, МПа	22.122	24.111

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ В КОМПЛЕКСЕ

Изменение температуры в междеформационной паузе, С

1096.0	1094.4	1091.8	1088.5
--------	--------	--------	--------

Абсолютное падение температуры в паузе, С

11.412

Температура на входе НК, С

1084.6

ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПЛЕКСА

Напряжение устойчивости раската прод. изгибу, МПа

66.459

Напряжение резерва сил трения в очаге деф-ции ПК, МПа

39.789

Сопротивление создаваемое НК, МПа

17.244

Мощность, подводимая к ПК, кВт

12.409

СИСТЕМОЕ СООБЩЕНИЕ

ПРОЦЕСС ОСУЩЕСТВИМ

Рис.1. Главное диалоговое окно программы на экране монитора ПЭВМ.

Расчёт выполняется после введения соответствующих параметров комплекса, по нажатию на кнопку «РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В КОМПЛЕКСЕ». В результате расчёта на экране монитора в соответствующих ячейках выводятся данные о деформационных, температурно – скоростных и энергосиловых параметрах прокатки в комплексе. Выполняется также расчёт, определяющий условия осуществимости процесса.

Для расчёта параметров прокатки в комплексе ПК – НК первоначально вводятся исходные данные для расчёта, в частности, марка прокатываемой стали, геометрические параметры сечения раската, температура металла и скорость прокатки на входе в комплекс, конструктивные параметры комплекса и пр. Если процесс не осуществим при заданных исход-

ных данных по устойчивости раската продольному изгибу или исчерпанию резерва вытягивающих сил трения, то на экране монитора выдается сообщение представленное на рис.2

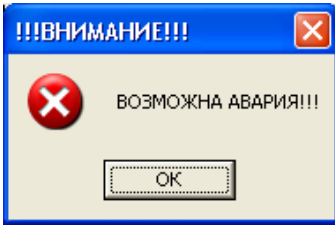


Рис.2. Сообщение о неосуществимости процесса на экране монитора ПЭВМ

На рис. 3 – 5 представлены результаты расчёта параметров прокатки в комплексе ПК – НК опытно–промышленного стана прокатной лаборатории ИЧМ.

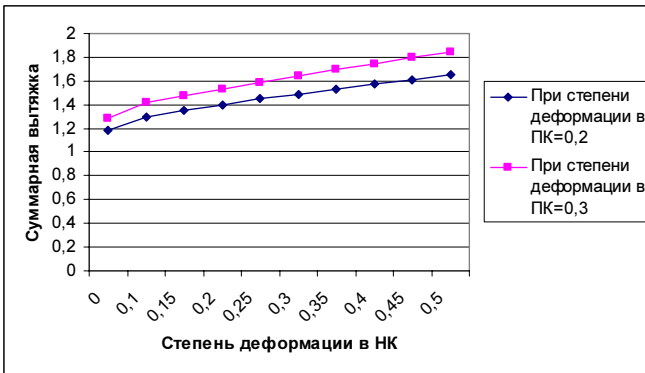


Рис.3. Зависимость изменения суммарной вытяжки в комплексе от степени деформации в НК.

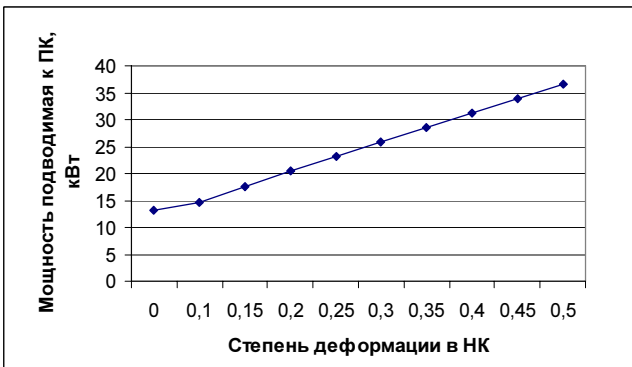


Рис.4. Зависимость изменения мощности подводимой к ПК от степени деформации в НК, при постоянной степени деформации $\varepsilon=0,2$ в ПК.

В качестве исходного использовался подкат квадратного сечения со стороной 25мм из стали марки Ст.3кп, нагретой до температуры порядка 1100°C . Экспериментальный комплекс ПК – НК состоит из приводной клетки с прокатными валками диаметром 270 мм и неприводной клетки, которая, в зави-

симости от решаемых задач, может использоваться как горизонтальная, вертикальная или четырёх валковая универсальная клеть с рабочими валками диаметром горизонтальных – 240мм; вертикальных – 200мм. Длина межклетьевого промежутка комплекса ПК – НК составляет 550 мм [1] Проверка адекватности математической модели, использованной в разработанном программном средстве автоматизированного расчета параметров сортовой прокатки, выполнена путем сравнения расчетных и экспериментальных данных о параметрах прокатки образцов квадратного сечения со стороной 25мм на опытно – промышленном стане 250 прокатной лаборатории ИЧМ.

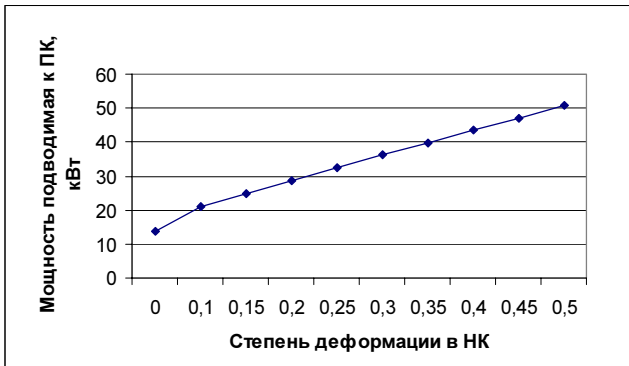


Рис.5. Зависимость изменения мощности подводимой к ПК от степени деформации в НК, при постоянной степени деформации $\epsilon=0,3$ в ПК.

Выводы.

Разработан алгоритм программы автоматизированного расчёта параметров процесса прокатки в комплексе ПК–НК и программа на языке C++, обеспечивающая расчёт энергосиловых и технологических параметров прокатки в комплексе ПК–НК с учётом ограничивающих процесс факторов. С использованием разработанной программы выполнены расчёты параметров прокатки в комплексе ПК–НК для условий опытно–промышленного стана 250 прокатной лаборатории ИЧМ. Анализ результатов расчетов, выполненных с использованием разработанного программного средства, и сравнение их с практическими данными показал, что разработанное программное средство может быть применено для решения задач оптимизации процесса непрерывной сортовой прокатки с использованием в линии стана неприводных рабочих клетей.

Результаты расчётов показали, что при использовании комплекса ПК – НК можно решить техническую задачу – увеличить вытяжную способность комплекса стана (рис.3). Средний коэффициент вытяжки металла $\mu_{об}$ в комплексе ПК – НК возрастает с увеличением степени деформации в НК, при низком коэффициенте вытяжки в ПК. При этом, при степени деформации в ПК, $\epsilon=0,2$ (принятом условии моделирования) $\mu_{об}$ в комплексе ПК – НК, то–есть с одной линии привода может быть увеличена с 1.2 (при

нулевой загрузке НК) до более чем 1.6 (при деформации металла в НК со степенью $\varepsilon=50\%$ в случае степени деформации в ПК – $\varepsilon=20\%$). С увеличением степени деформации в ПК до $\varepsilon=30\%$ при тех же условиях, общий коэффициент вытяжки металла $\mu_{об}$ в комплексе ПК – НК, т.е. с одной линии привода может быть увеличен до 1.8, что сопровождается естественным увеличением затрат мощности, проиллюстрированных для этих условий рисунками 4 и 5.

1. *Непрерывная* прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клеток.//А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков, и др. –К.: Наукова думка. – 1998. – 242 с.
2. *Штернов М.М., Бахтинов Б.П.* Калибровка прокатных валков. М.:Металлургиздат. – 1953. – 783 с.
3. *Жучков С.М.* Эффективность использования современных технологических концепций при реконструкции непрерывных сортовых станов. *Металлургия.* – 1998. – №1 – С.29 – 32
4. *Эффективность* процесса непрерывной сортовой прокатки с использованием неприводных деформирующих устройств.//С.М.Жучков, Л.В.Кулаков, А.П.Лохматов и др.//Металл и литье Украины. – 2004. – №8 – 10 – С.50 – 52.
5. *Разработка* метода анализа силового и энергетического взаимодействия рабочих валков комплекса «приводная – неприводная клетки».//Жучков С.М., Лохматов А.П., Кулаков Л.В., Сивак Э.В.//Известия вузов. Чёрная металлургия – 1997 – №10. – С.34 – 40.
6. *Жучков С.М.* Область осуществимости процессов непрерывной сортовой прокатки с использованием неприводного рабочего инструмента. *Производство проката,* – 2002. – №3. – С.27 – 30.

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук И.Ю.Приходько