

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ

Ф.С. Дубинский, А.В. Выдрин, П. А. Мальцев, М.А. Соседкова

В настоящее время автоматизация прокатных станов имеет определяющее значение для обеспечения эффективной работы предприятия и качества выпускаемой продукции.

Не менее важны вопросы автоматизации подготовки производства, например, разработка технологических режимов, проектирование и управление работой рабочего инструмента и др. Для решения этих вопросов необходимо иметь соответствующий комплекс, включающий математическое, методическое и программное обеспечение.

На кафедре ОМД проведены работы по теоретическому и экспериментальному исследованию процессов прокатки, в том числе при прокатке на станах сортового передела. Разработаны методики для точного описания сечения полосы и калибра, горизонтальной проекции площади контакта полосы с валками, определения величины коэффициента напряженного состояния при прокатке в различных системах калибров.

Для описания сечения полосы и калибра предложена методика описания фигур кусочно-аналитическими функциями [1].

Суть метода заключается в том, что плоская фигура разбивается на простейшие элементы, которые можно описать функционально. Площадь полосы или калибра рассчитывается путем интегрирования каждого из элементов и суммирования полученных результатов.

При описании симметричного калибра целесообразно рассматривать N -ю часть сечения в зависимости от количества валков образующих калибр.

$$S = N \cdot \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} f_i(x) dx,$$

где N – коэффициент, учитывающий количество валков образующих калибр.

$$N = \begin{cases} 4 & \text{– при двухвалковом калибре;} \\ 6 & \text{– при трехвалковом калибре;} \\ 8 & \text{– при четырехвалковом калибре.} \end{cases}$$

Получены выражения для описания элементов калибров и их пределов интегрирования для большого количества схем прокатки сортовых профилей.

Использование этого метода позволяет с высокой точностью при проектировании технологии определять ряд важных параметров процесса прокатки, таких как площадь сечения полосы, коэффициент вытяжки, скорость полосы на выходе из клетей и др.

Анализ известных методов определения коэффициента напряженного состояния n_σ и обработка экспериментальных данных позволили получить обобщенную методику для описания величины n_σ [2]:

$$n_\sigma = k_f \cdot n_\sigma^0,$$

где k_f – коэффициент, учитывающий влияние формы калибра;

n_σ^0 – базовое значение коэффициента напряженного состояния.

В качестве примера для диапазона $\frac{l}{h_c} \in [0,1 \dots 0,4]$:

$$n_\sigma^0 = 0,603 + e^{-1,09 \frac{l}{h_c}}.$$

Численные значения коэффициента формы k_f для диапазона $\frac{l}{h_c} \in [0,1 \dots 0,7]$ приведены в табл. 1.

Создана математическая модель формоизменения металла в очаге деформации с использованием метода конечных элементов [3]. Разработанная модель позволяет с высокой точностью определить параметры формоизменения металла, и может быть использована при прогнозировании вероятности появления дефектов.

Разработаны математические модели температурного поля в очаге деформации и напряженно-деформированного состояния, которые позволяют проводить моделирование процессов в очаге деформации при прокатке сортовых профилей.

Таблица 1

Таблица значений коэффициента формы

Схема прокатки	Овал – круг	Овал – квадрат	Ящичные	Ромб – квадрат	Круг – гладкие валки	Шестиугольник – квадрат
Коэффициент k_f	1,035	1,205	1,140	1,350	1,100	1,400

Математическая модель температурного поля в очаге деформации решена методом конечных элементов на основе дифференциального уравнения теплопроводности

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T) + \tau_s H,$$

где c и ρ - удельная теплоемкость и массовая плотность металла соответственно;

λ - коэффициент теплопроводности;

τ_s и H - сопротивление металла пластической деформации и интенсивность скоростей деформации сдвига соответственно.

Математическая модель напряженно-деформированного состояния сводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{T}{H}\right)_{\text{cp}} \text{div}\left(\overrightarrow{\text{grad}} \frac{\partial \psi_1}{\partial z}\right) + \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0; \\ \left(\frac{T}{H}\right)_{\text{cp}} \text{div}\left(\overrightarrow{\text{grad}} \frac{\partial \psi_2}{\partial z}\right) - \frac{\partial \sigma}{\partial y} = 0; \\ \left(\frac{T}{H}\right)_{\text{cp}} \text{div}\left(\overrightarrow{\text{grad}} \frac{\partial \psi_2}{\partial y} - \frac{\partial \psi_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial \sigma}{\partial z} = 0, \end{cases}$$

где $\left(\frac{T}{H}\right)_{\text{cp}}$ - усредненное по объему очага де-

формации отношение интенсивности касательных напряжений T к интенсивности скоростей деформаций сдвига H ;

ψ_1, ψ_2 - функции тока, позволяющие тождественно удовлетворить условие несжимаемости;

σ - среднее нормальное напряжение.

С использованием математического обеспечения системы построена модель прогнозирования дефектообразования на готовой продукции как при анализе существующих, так и при проектировании новых технологических процессов.

Для определения возможности появления дефектов на поверхности проката используется известная теория разрушения металлов, изложенная в работах Колмогорова [4].

$$\Lambda_p = \Lambda_p \left(\frac{\sigma}{T}, t \right),$$

где $\frac{\sigma}{T}$ - показатель напряженного состояния;

t - температура.

При создании оптимальных технологий прокатки важной задачей является определение температуры раската и температурных режимов прокатки, так как от температуры зависят пластические и механические свойства раската, режимы обжатий, усилия и моменты прокатки, качество прокатываемых изделий. Создана модель температурных режимов прокатки, которая учитывает изменения температуры непосредственно в прокатной клетке и межклетевом промежутке, в подогревающих или охлаждающих устройствах в техно-

логическом потоке и при транспортировке металла в линии стана.

Общий вид модели для определения температуры металла в любом месте прокатного стана можно представить в виде:

$$t_i = t_{i-1} - \sum_{j=1}^{n_1} \Delta t_{пj} + \sum_{k=1}^{n_2} \Delta t_{рk} + \sum_{l=1}^{n_3} \Delta t_{нl} - \sum_{z=1}^{n_4} \Delta t_{охz},$$

где t_{i-1} , $\Delta t_{пj}$, $\Delta t_{рk}$, $\Delta t_{нl}$, $\Delta t_{охz}$ - соответственно температура металла в точке (объекте) предыдущего расчета или заданная температура; потери температуры металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана; составляющие разогрева металла в процессе его деформации; нагрев раската в различных подогревающих устройствах в технологическом потоке стана; охлаждение раската в различных охлаждающих устройствах на стане, °С;

n_1, n_2, n_3, n_4 - количество факторов, способствующих охлаждению металла в линии стана, вызывающих разогрев раската в процессе пластической деформации; количество подогревающих устройств на стане и охлаждающих установок в линии прокатного стана соответственно.

На основе накопленных математических и методических разработок на кафедре разработана система автоматизированного проектирования и моделирования оптимальных процессов прокатки сортовых профилей «Калибр». Интерфейс системы представлен на рис. 1.

Использование данной системы при проектировании и моделировании процессов прокатки обеспечивает:

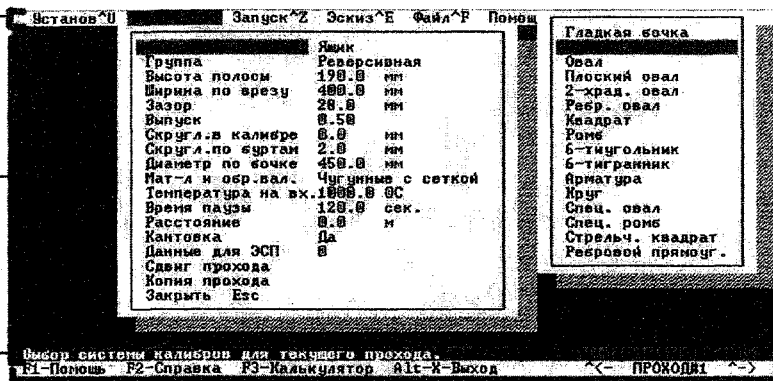
- определение (по выбранной схеме прокатки) на основе, как авторских, так и альтернативных методик показателей формоизменения, температурных и скоростных режимов прокатки, энергосиловых затрат и др.;
- расчет производительности стана;
- проектирование калибров (рис. 2);
- графический анализ основных параметров процесса прокатки, например, для того чтобы сопоставить расчетные показатели с заданными или допустимыми;
- сохранение и загрузка установочных данных разработанных калибровок и результатов расчета;
- формирование схем прокатки и технологических таблиц (исходных данных, результатов расчета показателей формоизменения и энергосиловых параметров);
- создание электронного архива калибровок валков стана;
- моделирование и анализ действующих технологических процессов.

Система «Калибр» позволяет моделировать процессы, происходящие в очаге деформации и технологической линии стана. С этой целью в ней формализованы различные математические модели, которые позволяют проводить как анализ су-

Главное меню

Область вывода результатов расчета и разделов меню

Развернутая подсказка для выбранного пункта меню



Информационная строка

Рис. 1. Элементы интерфейса системы «Калибр»

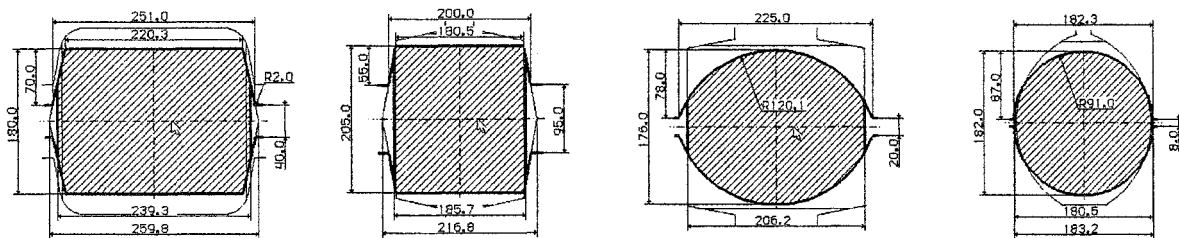


Рис. 2. Часть схемы прокатки круга диам. 180 мм на стане 780 (заштрихованные зоны – поперечное сечение полосы)

существующих технологии прокатки, так и проектировать новые.

Проектирование и моделирование технологии в системе «Калибр» можно вести в двух режимах:

- 1) текстовый режим предполагает вывод большинства основных параметров процесса прокатки для комплексного анализа полученных данных при прокатке металла в данном проходе (см. рис. 1).
- 2) графический режим, который позволяет визуально отображать результаты расчета в виде

эскизов калибров и моделировать режимы процесса при изменении различных технологических параметров (см. рис. 2).

Выходная документация системы, по желанию пользователя, может содержать таблицы с результатами расчета деформации, температурного и скоростного режимов; энергосиловых параметров, а также схемы прокатки и чертежи калибров с обозначением их основных геометрических параметров (см. рис. 2). Вся технологиче-

Результаты расчета деформации

Таблица 2

№ прохода	Форма калибра	Размеры калибра			Размеры полосы			ΔH	ΔB	λ	Z	T	Диаметр валков		n_b	v_n
		H_k	B_k	s	H_n	B_n	S_n						D_b	D_k		
–	–	мм	мм	мм	мм	мм	мм ²	мм	мм	–	–	°C	мм	мм	мин ⁻¹	м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	ящик	320,0	334,7	170,0	320,0	308,0	97964,8	44,0	5,0	1,150	0,920	945,8	950,0	800,0	25,0	1,0
2	ящик	280,0	351,5	130,0	280,0	313,0	84523,1	40,0	5,0	1,159	0,890	944,9	950,0	800,0	25,0	1,0
3k	ящик	260,0	329,5	110,0	260,0	287,3	74425,5	53,0	7,3	1,136	0,872	942,4	950,0	800,0	25,0	1,0
4	ящик	220,0	333,1	70,0	220,0	293,5	64142,0	40,0	6,2	1,160	0,881	940,0	950,0	800,0	25,0	1,0
5k	ящик	230,0	267,7	90,0	230,0	229,9	52292,1	63,5	9,9	1,227	0,859	937,3	950,0	810,0	25,0	1,1
6	ящик	180,0	259,8	40,0	180,0	239,3	42249,6	50,0	9,4	1,238	0,921	933,3	950,0	810,0	25,0	1,1
7k	ящик	205,0	216,8	95,0	205,0	185,7	37995,0	34,3	5,7	1,122	0,857	928,9	950,0	840,0	25,0	1,1
8	овал	176,0	225,0	20,0	176,0	206,2	29241,7	29,0	9,5	1,299	0,916	926,9	950,0	828,2	25,0	1,1
9k	круг	182,0	183,2	8,0	182,0	180,5	25984,8	24,2	4,5	1,125	0,985	922,7	950,0	814,1	25,0	1,1

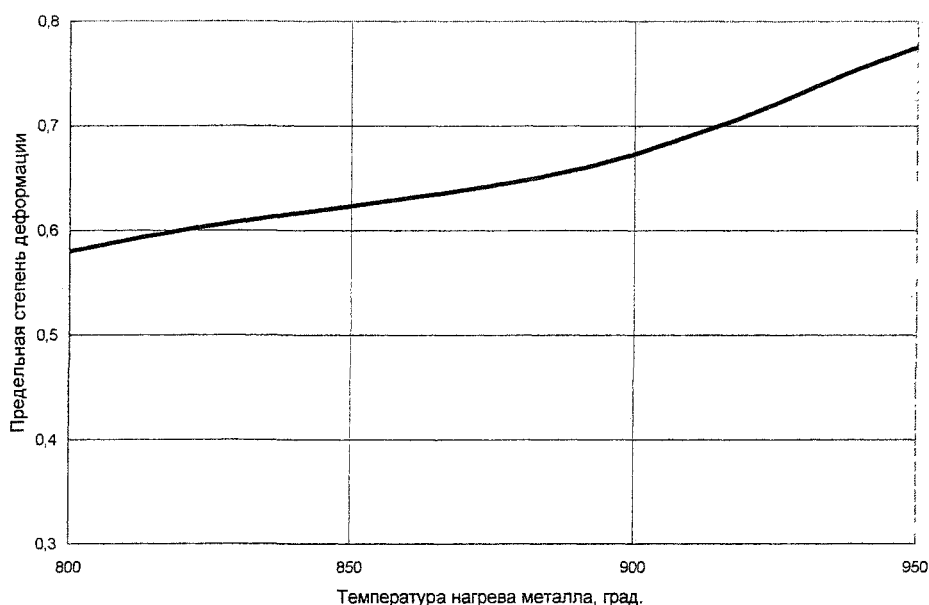


Рис. 3. Зависимость предельной степени деформации от температуры нагрева металла

екая документация хранится на электронных и бумажных носителях. Получение выходной документации (отчета) организовано через отдельный программный модуль «Мастер отчетов», используя который, пользователь, обладая даже базовыми навыками владения компьютером, может без труда получить отчет требуемой формы.

В табл. 2 приведены результаты численного моделирования формоизменения процесса прокатки круглого профиля диам. 180 мм на стане 780.

В результате численного моделирования температурных полей в системе имеется возможность сопоставить процессы остывания металла с вероятностью исчерпания ресурса пластичности. Например, на рис. 3 приведена зависимость предельной степени деформации (Λ_{\max}) от температуры нагрева металла, позволяющая проводить прокатку без образования поверхностных дефектов титанового сплава Ti + 8 % Al + 1 % Mo + 1 % V.

В настоящий момент авторами проводятся работы в направлении моделирования и проекти-

рования процессов прокатки фасонных профилей и листовой стали; расчета эффективности и оптимизации процессов прокатки с использованием современных интеллектуальных технологий.

Литература

1. Дубинский, Ф.С. Методика расчета площади сечения прокатываемой полосы и калибра I Ф.С. Дубинский, ВТ. Дукмасов, А. В. Шаламов // Известия Вузов. Черная металлургия. - 1998. - №12.
2. Дубинский, Ф.С. Расчет энергосиловых параметров процесса прокатки на станах сортового передела: учебное пособие / Ф.С. Дубинский, А.В. Выдрин, В.И. Крайнее. - Челябинск: Изд-во УЮрГУ, 2001.
3. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. — М.: Мир, 1975. - 543 с.
4. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. - М.: Металлургия, 1986. - 688 с.