

# 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  $n_\sigma$  и обработка экспериментальных данных позволили получить обобщенную методику для описания величины  $n_\sigma$  [2]:

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

где  $k_f$  – коэффициент, учитывающий влияние формы калибра;

$n_\sigma^0$  – базовое значение коэффициента напряженного состояния.

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

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

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

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

где  $c$  и  $\rho$  – удельная теплоемкость и массовая плотность металла соответственно;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$\tau_s$  и  $H$  – сопротивление металла пластической деформации и интенсивность скоростей деформации сдвига соответственно.

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

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

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

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

$\psi_1, \psi_2$  – функции тока, позволяющие тождественно удовлетворить условие несжимаемости;

$\sigma$  – 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, °C;

$n_1, n_2, n_3, n_4$  – 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, энерго-силовых 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;

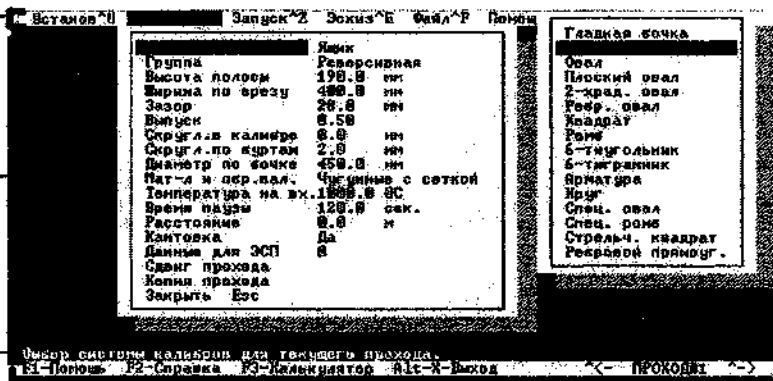
- моделирование и анализ действующих технологических процессов.

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»

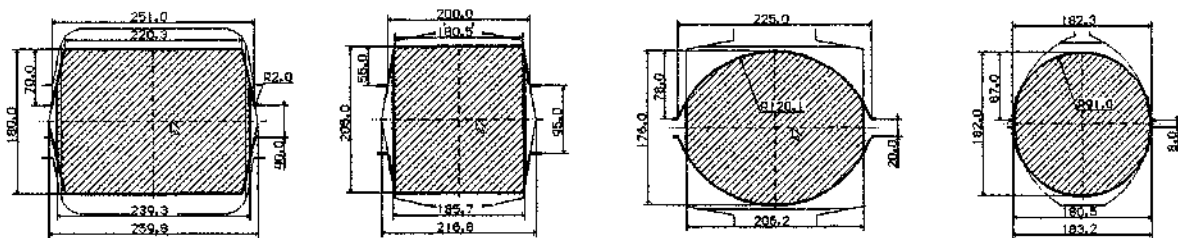


Рис. 2. Часть схемы прокатки круга диам. 180 мм на стане 780 (заштрихованные зоны – поперечное сечение полосы)

существующих технологий прокатки, так и проектировать новые.

Проектирование и моделирование технологий 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 формоизменения, температурного и скоростного режимов; энергосиловых параметров, а также схемы прокатки и чертежи калибров с обозначением их основных геометрических параметров (см. рис. 2). Вся технологиче-

Таблица 2

Результаты расчета формоизменения

| № прохода | Форма калибра | Размеры калибра |       |       | Размеры полосы |       |                 | $\Delta H$ | $\Delta B$ | $\lambda$ | $Z$   | $T$   | Диаметр валков |       | $n_p$             | $v_p$ |
|-----------|---------------|-----------------|-------|-------|----------------|-------|-----------------|------------|------------|-----------|-------|-------|----------------|-------|-------------------|-------|
|           |               | $H_k$           | $B_k$ | $s$   | $H_p$          | $B_p$ | $S_p$           |            |            |           |       |       | $D_b$          | $D_k$ |                   |       |
| –         | –             | мм              | мм    | мм    | мм             | мм    | мм <sup>2</sup> | мм         | мм         | –         | –     | °C    | мм             | мм    | мин <sup>-1</sup> | 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   |

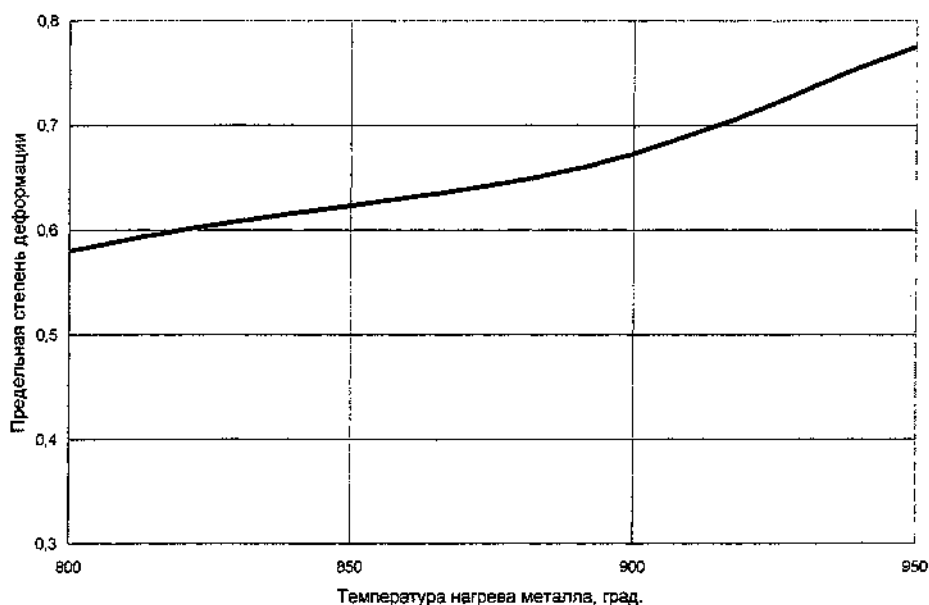


Рис. 3. Зависимость предельной степени деформации от температуры нагрева металла

ская 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 ( $\Lambda_{\max}$ ) 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 / Ф.С. Дубинский, В.Г. 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. Крайнов. – 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.