

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ

М.А. Соседкова, Ф.С. Дубинский, В.Г. Дукмасов, А. В. Выдрин

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES WITH A VIEW TO IMPROVING THE TECHNOLOGY OF BAR ROLLING

M.A. Sosedkova, F.S. Dubinsky, V.G. Dukmasov, A.V. Vydrin

Созданы математические модели, описывающие температурные процессы, происходящие в очаге деформации и технологическом потоке стана. На их основе решены задачи оптимизации технологических режимов для достижения заданной температуры полосы и устранения неравномерности распределения температуры по длине полосы. Математические модели напряженно-деформированного состояния и температурных полей в очаге деформации позволяют решать задачи прогнозирования дефектообразования на готовом профиле. Предложены мероприятия по совершенствованию существующих и разработке новых технологий и компоновки оборудования для прокатки сортовых профилей высокого качества с помощью моделирования температурных процессов.

Ключевые слова: моделирование процессов прокатки, температурные режимы, сортовые профили, очаг деформации, оптимизация технологических режимов, калибровка прокатных валков.

Mathematical models are created describing the thermal processes occurring in the deformation focus and process stream of the mill. On this basis the problems of optimization of technological regimes to achieve desired band temperature and eliminate uneven temperature distribution along the strip are solved. Mathematical models of stress-strain state and temperature fields in the deformation focus allow to solve the problem of forecasting defect formation on the finished profile. The measures are proposed to improve existing and develop new technologies and to construct equipment for rolling high-grade sections by modeling thermal processes.

Keywords: simulation of rolling, temperature regimes, section bars, focus of deformation, optimization of technological regimes, roll sizing.

На качество прокатной продукции оказывают влияние различные технологические факторы и в том числе температурные режимы нагрева, деформации и охлаждения.

Моделирование и проектирование температурных режимов прокатки сортовых профилей служат базой для анализа и совершенствования существующих и разработки новых технологий прокатки, которые обеспечивают получение качественного конечного продукта.

Созданы математические модели, описывающие температурные процессы, происходящие в очаге деформации и технологическом потоке стана, для создания технологических процессов прокатки качественных сортовых профилей из различных металлов и сплавов.

На рис. 1 показана структурная схема решения задачи повышения качества сортового проката на основе реализации разработанных математических моделей.

Задача определения температурных режимов включает не только правильный выбор температу-

ры нагрева металла перед прокаткой, но и определение температуры металла в любой точке прокатного стана. Особенно важной эта задача является в процессе проектирования оптимальных технологий, выборе и компоновке оборудования прокатных станов.

Разработанная модель температурных режимов учитывает изменения температуры непосредственно в прокатной клети и межклетевом промежутке, в подогревающих или охлаждающих устройствах, при транспортировке металла в линии стана. Модель применима для расчета температуры различных прокатываемых материалов и может использоваться при разработке технологии прокатки на любом типе сортового стана.

Общий вид модели для определения температуры металла в любом месте прокатного стана имеет вид

$$t_i = t_{i-1} - \sum_{j=1}^{n_1} \Delta t_{nj} + \sum_{k=1}^{n_2} \Delta t_{pk} + \sum_{l=1}^{n_3} \Delta t_{nl} - \sum_{z=1}^{n_4} \Delta t_{oxz},$$

где t_{i-1} — температура металла в точке предыдущей

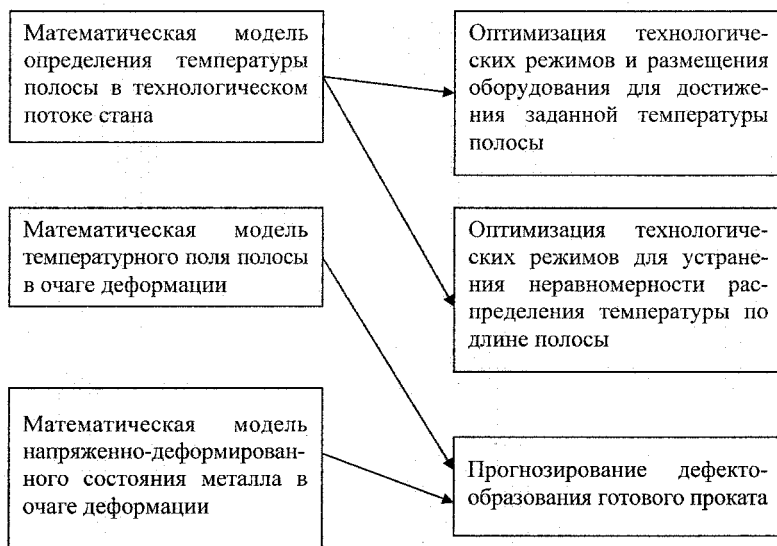


Рис. 1. Схема решения задачи повышения качества проката

го расчета или заданная температура; $\Delta t_{\text{п}}$ - потери температуры металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана; $\Delta t_{\text{р}}$ - разогрев металла в процессе его деформации; $\Delta t_{\text{н}}$ - нагрев раската в различных подогревающих устройствах в технологическом потоке стана; $\Delta t_{\text{ох}}$ - охлаждение раската в различных охлаждающих устройствах на стане; $i = \overline{1, n}$ - факторы, влияющие на изменение температуры раската; $j = \overline{1, n_1}$ - факторы, способствующие охлаждению металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана; $k = \overline{1, n_2}$ - факторы, вызывающие разогрев раската в процессе пластической деформации; $l = \overline{1, n_3}$ - подогревающие устройства в линии прокатного стана; $z = \overline{1, n_4}$ - охлаждающие устройства в линии прокатного стана.

Созданная математическая модель позволяет решать задачи управления температурным режимом прокатки и оптимизации технологических режимов и размещения оборудования для достижения требуемой температуры полосы.

В общем виде задачу управления температурным режимом прокатки можно сформулировать следующим образом: требуется определить значения тех или иных параметров и режимов процесса, которые в условиях, наложенных на них ограничений, обеспечивали бы получение необходимой температуры металла в определенном месте прокатного стана.

Целевая функция задачи управления температурным режимом может быть представлена следующим образом:

$$|t^* - t(x_1, x_2, \dots, x_n)| \rightarrow \min,$$

где t^* , t - заданная и расчетная температуры металла; x_1, x_2, \dots, x_n - управляющие параметры.

Проанализировав составляющие температурного баланса, учитывая тип прокатного стана, а также особенности технологии и оборудования были выбраны управляющие параметры процесса. На них накладываются деформационные, кинематические, энергосиловые и другие ограничения.

В качестве управляющих в зависимости от условий процесса, типа прокатного стана и поставленных задач могут быть предложены следующие параметры: начальная температура нагрева заготовок в печи, линейный массив значений скорости прокатки и показателей деформации в проходах, длина и площадь поперечного сечения заготовки, линейный массив значений расстояний между клетями, количество проходов, а также время пауз между ними.

Большой проблемой при сортовой прокатке является неравномерность распределения температуры по длине полосы, которая в большей мере происходит за счет неодновременной пластической деформации переднего и заднего концов раската, что приводит к отклонениям размеров профиля и снижению точности прокатки. Разработанная модель температурных режимов позволяет определять не только среднemasсовую температуру, но и при необходимости температуру переднего и заднего конца полосы. На рис. 2 приведена диаграмма результатов расчета температуры переднего и заднего концов полосы для условий прокатки круглого профиля диаметром 10 мм из заготовки 100 мм, длиной 10 м и температурой нагрева в печи 1200 °С на мелкосортном непрерывном стане 250 ОАО «ЧМК».

Как видно из диаграммы, максимальная разница между температурами переднего и заднего концов наблюдается на входе в первую клеть (90 °С), к последнему проходу разница уменьшается до 20 °С.

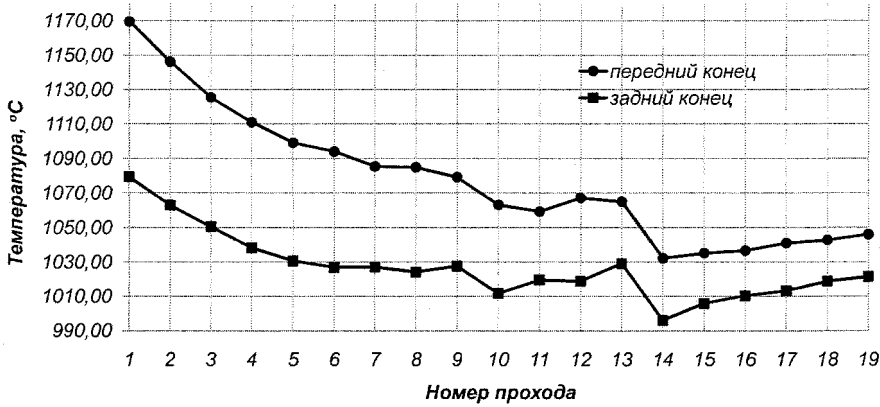


Рис. 2. Результаты расчета температуры полосы на непрерывном стане 250

На основе разработанной модели определения температурных режимов решается задача оптимизации технологических параметров для устранения неравномерности распределения температуры по длине полосы. Например, управляющими факторами в такой задаче могут быть приняты температуры нагрева переднего и заднего концов заготовки, т. е. использование технологии «косого нагрева» в методической печи, где путем регулирования подачи топлива на горелки создается разница нагрева по длине заготовки. Для обеспечения равномерной температуры по длине полосы во всех проходах в приведенном выше расчете температура нагрева заднего конца заготовки должна быть на 70 °C выше, чем переднего.

Создана математическая модель, описывающая температурные процессы, происходящие в очаге деформации при прокатке сортовых профилей [1].

Задача решена методом конечных элементов [2] на основе дифференциального уравнения теплопроводности [3]:

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

где c - удельная теплоемкость металла; ρ - массовая плотность металла; λ - коэффициент теплопроводности; τ_s - сопротивление металла пластической деформации сдвига; H - интенсивность скоростей деформаций сдвига.

В результате реализации метода получаем значения температуры в узлах конечно-элементной сетки T_β , которые являются решением системы линейных относительно T_β уравнений

$$k_{\alpha\beta} T_\beta = B_\alpha,$$

где α, β - глобальный номер узла.

При этом коэффициенты системы линейных уравнений определяются по формулам вида:

$$kk_{\alpha\beta} = \sum_{e=1}^8 \int_{V^{(e)}} \left[c\rho N_\alpha^{(e)} \left(v_x \frac{\partial N_\beta^{(e)}}{\partial x} + v_y \frac{\partial N_\beta^{(e)}}{\partial y} + v_z \frac{\partial N_\beta^{(e)}}{\partial z} \right) + \right.$$

$$\left. + \lambda \left(\frac{\partial N_\alpha^{(e)}}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_\beta^{(e)}}{\partial x} + \frac{\partial N_\alpha^{(e)}}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_\beta^{(e)}}{\partial y} + \frac{\partial N_\alpha^{(e)}}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_\beta^{(e)}}{\partial z} \right) \right] dV - \alpha_s \int_{S_7} N_\alpha^{(2)} N_\beta^{(2)} dS.$$

Компоненты вектора свободных членов вычисляются по формулам вида:

$$B_\alpha = \sum_{e=1}^8 \int_{V^{(e)}} \tau_s H N_\alpha^{(e)} dV + \sum_{s=4}^6 \int_{S^{(s)}} c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_H}{100} \right)^4 \right] N_\alpha^{(e)} dS - \alpha_s T_b \int_{S_7} N_\alpha^{(2)} dS,$$

где $N_\alpha^{(e)}, N_\beta^{(e)}$ - функции формы элементов;

v_x, v_y, v_z - компоненты вектора скорости материальных частиц определяются по известным формулам, полученным энергетическим методом; α_s - коэффициент теплопередачи на контактной поверхности; $V^{(e)}$ - объем конечного элемента с номером (e); $S^{(s)}$ - площадь поверхности конечного элемента.

Разработанная математическая модель температурного поля и модель напряженно-деформированного состояния в очаге деформации [4] позволили в результате численного моделирования проводить анализ возможности образования дефектов проката как при проектировании новых технологий, так и при анализе и совершенствовании существующих.

Для определения возможности появления дефектов проката используется известная теория разрушения металлов, изложенная в работах Колмогорова [5].

Характеристикой способности материала пластически деформироваться при тех или иных значениях термомеханических параметров без разрушения является пластичность материала. Пластичность существенно зависит от схемы напряженного состояния и от температуры металла

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

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

Результаты пластометрических исследований и численного моделирования температурных полей при сортовой прокатке позволяют определить вероятность исчерпания ресурса пластичности и проводить различные исследования по анализу существующих и предлагаемых технологических решений.

Данная работа была проведена для исследования процесса прокатки профилей из сплавов титана на стане 450 АО «Корпорация ВСПО-АВИСМА».

Постоянно изменяющийся рынок выдвигает новые повышенные требования к качеству прокатной продукции. В этих условиях старые технологии стали сдерживающим фактором дальнейшего роста предприятия. В сортаменте стана появились сплавы, при прокатке которых возникают множественные поверхностные дефекты в виде глубоко проникающих поперечных рванин. Это приводило к тому, что припуск на механическую обработку достигал 4 мм.

После анализа технологического процесса на стане 450 были выявлены проблемы и определены задачи по совершенствованию технологии прокатки титановых сплавов:

- повышение точности прокатываемых профилей;
- обеспечение стабильности получения заданной внутренней структуры готовой продукции;
- повышение выхода годного за счет уменьшения поверхностных дефектов на прокатываемых профилях;

- повышение устойчивости полосы в калибрах путем совершенствования форм калибров и привалковой арматуры;

- уменьшение припуска на механическую обработку прутков.

Выявленные проблемы показали необходимость глубокого анализа существующей технологии и разработки новой калибровки валков с учетом современных требований производства.

Благодаря разработанной системе прогнозирования дефектообразования, основанной на математических моделях напряженно-деформированного состояния и температурных полей в очаге деформации, проведен анализ причин образования дефектов при прокатке прутков из сплавов титана по существующей технологии. Выполненный комплекс теоретических исследований позволил создать основу для разработки технологии сортовой прокатки с целью получения качественной поверхности прокатываемых профилей

Разработана новая схема калибровки, фрагменты которой приведены на рис. 3 и 4. Согласно разработанной схеме прокатки предложены и спроектированы новые калибры и их сочетание, позволяющие получать качественный круглый профиль.

Предложенная схема позволила решить также и проблему высоких степеней деформации в черновой клети, что иногда приводило к перегреву внутренних слоев проката и, как следствие, ухудшению структуры сплава. Для разгрузки черновой клети предложена девятипроходная схема (см. рис. 3), что дало снижение степени деформации в ней. Такое решение позволило прокатывать ряд сплавов с одного нагрева, при температуре ниже температу-

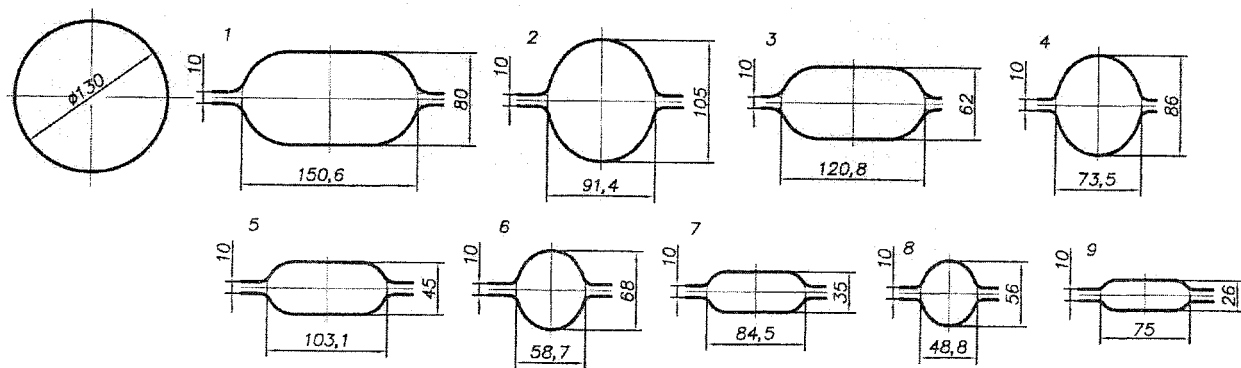


Рис. 3. Схема калибровки черновой клети

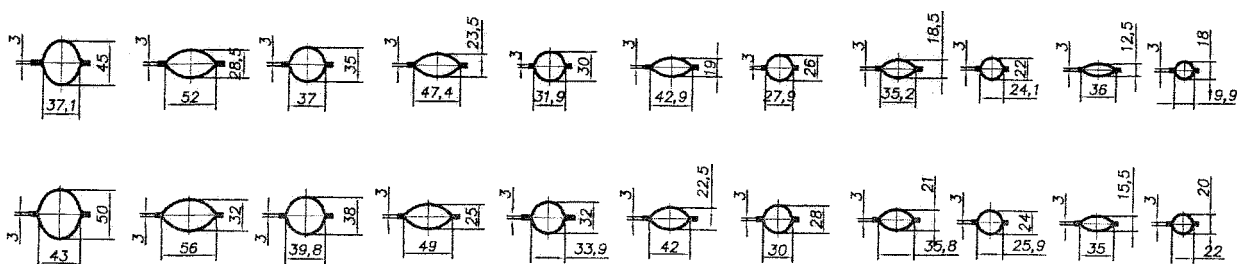


Рис. 4. Схема калибровки линии клетей 450

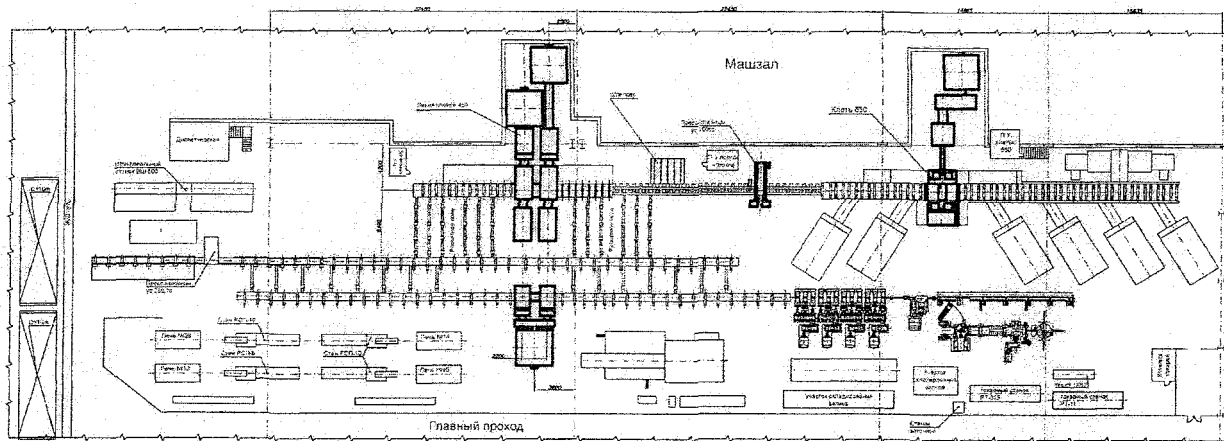


Рис. 5. Схема расположения оборудования

ры полиморфного превращения, для получения требуемой структуры.

Новая калибровка внедрена и используется на стане 450 АО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». По данным предприятия выход годного увеличился примерно на 2 %, уменьшился припуск для обточки с 4...5 мм до 0,18...2,5 мм.

Математическая модель температурных режимов прокатки и алгоритм реализации задачи оптимизации технологических параметров и размещения оборудования для достижения заданной температуры раската были использованы для разработки предложений по реконструкции сортовых станов 780 и 250 ОАО «Мечел», стана 450 АО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Приведем одно из предложений по реконструкции стана 450 в рамках разработки концепции развития сортового передела АО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Основной идеей реконструкции было создание комплекса для получения крупно-, средне-, мелкосортного проката и катанки. Были поставлены следующие задачи: замена устаревшего оборудования стана 450 с целью повышения точности проката, снижения дефектообразования, расширения марочного и профильного сортамента; возможность получения катанки диаметром 6,5... 16 мм и круглого профиля диаметром более 80 мм.

Проведены выбор и компоновка оборудования, привязка ее к существующим производственным площадям. Схема расположения оборудования приведена на рис. 5. С целью снижения стоимости проекта предлагается оставить без изменения реверсивную клеть 650, а участок клетей 450 выполнить в виде трех непрерывных групп клетей. Для производства катанки диаметром 6... 16 мм предусмотрено размещение мелкосортно-проволочной группы в одном технологическом потоке со станом 450 без дополнительного нагрева полосы, что подтверждено расчетами по разработанной модели. Для данного расположения оборудования разработаны технология и схема прокатки, проведен расчет температурных режимов, который по-

казал возможность реализации такого варианта реконструкции.

Выводы

1. Разработана математическая модель температурных режимов прокатки сортовых профилей.
2. Решены задачи оптимизации технологических режимов и размещения оборудования для достижения заданной температуры полосы в определенном месте прокатного стана и устранения неравномерности распределения температуры по длине полосы.
3. Математических модели напряженно-деформированного состояния и температурных полей в очаге деформации позволяют решать задачи прогнозирования дефектообразования на готовом профиле.
4. На основе моделирования температурных процессов, происходящих в очаге деформации и технологическом потоке стана, предложены мероприятия по совершенствованию существующих и разработке новых технологий и компоновки оборудования для прокатки профилей высокого качества.

Литература

1. Моделирование температурных полей в очаге деформации при прокатке сортовых профилей / Ф.С. Дубинский, А.В. Выдрин, М.А. Соседкова, П.А. Мальцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». - 2006. - Вып. 7. - № 10 (65). - С. 82-85.
2. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. - М.: Мир, 1981. - 304 с.
3. Поздеев, А.А. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения / А.А. Поздеев, П.В. Трусов, Ю.И. Няшин. - М.: Наука, 1986. - 232 с.
4. Моделирование напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при прокатке сортовых профилей / Ф.С. Дубинский, А.В. Выдрин, И.В. Левин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». - 2004. - Вып. 4. - № 8. - С. 79-81.
5. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. - М.: Металлургия, 1986. - 688 с.

Поступила в редакцию 17 сентября 2010 г.