

С.В. Ершов¹, д-р техн.наук., проф., В.В. Степчук¹, асп., С.А. Воробей², д-р техн.наук., ст.научн.сотр.

1 - Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск, Украина,

2 - Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепропетровск, Украина

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ СОРТОВОЙ И ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Розглянуто особливості теоретичних методів дослідження температурного поля при прокатці сортової та листової продукції. Представлені результати теоретичного дослідження впливу температурного поля на напружено-деформований стан металу при сортовій і листовій прокатці. У результаті розрахунку були отримані: тривимірне поле швидкостей, температур та напруж.

The feature of the theoretical methods of rolled section steel and rolled sheet products are studies. Presented the results of theoretical study of the influence of temperature field on the stress-strain state of rolled section steel and rolled sheet. As a result of the calculation were obtained: three-dimensional velocity field, temperature and stress.

Введение. Прокатка сортовой и листовой продукции сопровождается значительными изменениями температурно-скоростных условий вдоль технологической линии стана. Обеспечить современные требования к качеству проката невозможно без применения систем управления технологическим процессом, которые должны учитывать максимальное количество влияющих параметров и физическую сущность деформации металла. Это приводит к необходимости разработки методов расчета технологических параметров, которые способны учесть все изменения деформационно-скоростного режима и оценивать влияния наиболее важных параметров на технологию.

Одним из важнейших показателей технологии является температура проката, которая оказывает большое влияние на энергосиловые параметры прокатки [1], структуру и механические свойства получаемой продукции [2].

На протяжении последних десятилетий изучение температурных условий прокатки велось в основном экспериментальными методами. Ярким примером может служить работа [1], где показано сильное влияние температуры на расход энергии при листовой прокатке и точность получаемых полос. В сборнике [2] приведены материалы, говорящие о важности управления температурой полос в последних клетях листовых станов для получения структуры с заданными показателями. Еще одна работа [3] посвящена теоретическим исследованиям. В этой работе подробно рассмотрено влияние составляющих теплового баланса на изменение усредненной температуры по сечению катанки и их влиянию на силовые условия прокатки, а также на структуру металла готовой продукции. Решение аналогичной задачи для условий листовой прокатки приведено в работе [4].

Однако экспериментальное определение значений температур и напряжений в промышленных условиях или методами натурального моделирования без существенного упрощения процесса весьма сложно, а для высокоскоростных проволочных и листовых станов практически невозможно. В этом случае важное значение имеет правильный расчет выше перечисленных величин.

В настоящее время появилась возможность отказаться от упрощающих допущений, таких как гипотеза плоских сечений и равномерность температур по сечениям. Появилась возможность анализа не упрощенных схем деформации, а схем, реально используемых на металлургических предприятиях. Это позволяет выполнять достаточно подробные исследования, которые находят свое применение в промышленности. Пример таких исследований можно видеть в работе [4].

Вместе с этим возникает и множество вопросов, на которые не так просто ответить без проведения специальных исследований. Так остается открытым вопрос о форме учета температурных условий прокатки при расчете напряженно-деформированного состояния металла. С одной стороны имеющиеся данные говорят о том, что изменение температурных условий в диапазоне 900–1150 °С оказывает незначительное влияние на деформированное состояние проката [5]. С другой стороны, имеются данные [3], которые показывают, что некорректный учет температурных условий прокатки не позволяет оценить влияние технологии на качество выпускаемой продукции и экономическую эффективность производства. При этом неизвестно, как скажется учет реального распределения температуры по сечению раската на напряженное состояние в очаге деформации и за его пределами. Причем, это влияние может количественно и качественно отличаться в разных клетях стана, так как условия прокатки в первых и последних клетях существенно отличаются.

Кроме этого неизвестно, какие особенности влияния температурных полей раската на напряженно-деформированное состояние при сортовой и листовой прокатке.

В связи с этим представляет интерес проведение исследований во всех группах клетей проволочного и листового стана для выяснения характера влияния условий прокатки и условий расчетов на видоизменение напряженно-деформированного состояния металла. При этом необходимо учесть реальные схемы деформации и

реальные температурно-скоростные условия без привлечения теории подобия и при максимальном отказе от упрощающих допущений при теоретическом решении задачи в трехмерной постановке.

Целями работы являются:

1. Оценка точности расчета температурного поля раската при сортовой и листовой прокатке;
2. Учет влияния распределения температурного поля по объему проката на напряженно-деформированное состояние при прокатке в первом черновом калибре проволочного стана и первом черновом калибре листового стана;
3. Получение количественных данных о степени влияния температурного поля в очаге деформации на напряженное состояние металла.

Исследование. Исследование основано на использовании метода конечных элементов и результатов экспериментов в производственных условиях.

Для расчета деформированного состояния использовано вариационное уравнение

$$\delta \left[\frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV - \int_S \sigma_\tau \nu_\tau dS + t_1 \int_V \varepsilon_0^2 dV + t_2 \int_S (\nu_n - \omega_n)^2 dS \right] = 0, \quad (1)$$

где μ – условная вязкость металла ($\mu = \frac{\tau_s}{H_{it-1}}$); H – интенсивность скоростей деформации сдвига; σ_τ и ν_τ –

полное напряжение трения и скорость скольжения металла по поверхности инструмента S ; t_1 – штрафная константа

на невыполнение условия несжимаемости; $\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\xi_x + \xi_y + \xi_z)$ – скорость относительного изменения объема;

t_2 – штрафная константа на невыполнение условия непроницаемости; ν_n – проекция скорости течения металла в данной точке контактной поверхности на нормаль к поверхности в этой точке; ω_n – проекция скорости движения инструмента на нормаль к поверхности контакта в данной точке.

В основе метода расчета температурного поля раската лежит решение уравнения теплопроводности, которое сводится к минимизации функционала

$$I_n = \int_V \frac{1}{2} \left[k(t) \left(\frac{\partial t_n}{\partial x} \right)^2 + k(t) \left(\frac{\partial t_n}{\partial y} \right)^2 + k(t) \left(\frac{\partial t_n}{\partial z} \right)^2 + 2t_n \left(c(t) \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} - T_n H_n \right) \right] dV + \int_S \frac{1}{2} \alpha_{obm} [t_n^2 - 2t_n t_\infty + t_\infty^2] dS, \quad (2)$$

где $k(t)$ – коэффициенты теплопроводности в зависимости от температуры; $c(t)$ – удельная теплоемкость металла в зависимости от температуры; $t_n = N_{i_n} t_{i_n}$ – распределение температуры по объему конечного элемента; N_{i_n} – функции формы конечного элемента; t_{i_n} – узловое значения температур элемента n ; ρ – плотность металла; α_{obm} – коэффициент теплообмена; t_∞ – температура окружающей среды (известная); T_n – интенсивность касательных напряжений; H_n – интенсивность скоростей деформации сдвига.

Значения физических констант и коэффициентов выбирались в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [3].

При анализе сортовой прокатки использовали схему деформации, которая применяется при прокатке катанки $\varnothing 5.5$ мм из квадратной заготовки со стороной 125 мм в первом черновом калибре (рис. 1). Моделировали прокатку с равномерной температурой по сечению раската ($1065^\circ C$) и с расчетным температурным полем, сформировавшимся к первому черновому калибру после выхода из печи заготовки, нагретой до $1250^\circ C$. Количество оборотов валков принималось равным 8 об/мин, диаметр валков по буртам – 550 мм, зазор по буртам – 15 мм. Обжатие по вершине калибра – 36 мм.

При анализе листовой прокатки использовали режим деформации, который применяется при прокатке полосы толщиной 1.8 мм из подката толщиной 24 мм в первой клетки чистовой группы. Моделировали прокатку с равномерной температурой по сечению раската ($927^\circ C$) и с расчетным температурным полем, к первой клетки чистовой группы при температуре раската на промежуточном рольганге $1106^\circ C$. Количество оборотов валков принималось равным 45 об/мин, диаметр валков – 660 мм, зазор между валками – 12.63 мм. Обжатие – 11.37 мм.

Напряженное состояние рассчитывалось в соответствии с методикой, опубликованной в работе [6] и адаптированной для метода конечных элементов в работе [7]. Высокая точность методики расчета напряженного состояния металла подтверждена в работе [8].

Анализ полученных результатов. В результате расчета были получены: трехмерное поле скоростей, температур и напряжений. Точность расчета температуры оценивали по результатам ее замеров в производственных условиях проволочного и листового станов.

Результаты экспериментов для сортовой прокатки показали, что первоначально нагретая до температуры 1250°C заготовка, проходя технологическую линию до первой черновой клети, охлаждается до температуры 1065°C . После прокатки в клети поверхность полосы охлаждается до температур, находящихся в диапазоне $950 - 980^{\circ}\text{C}$.

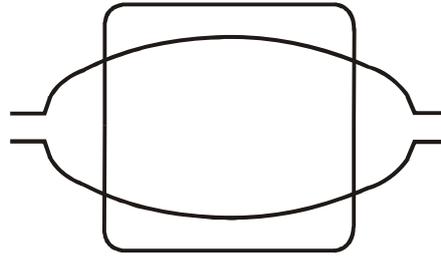


Рис. 1. Схема деформации при прокатке в черновом овальном калибре

Расчет показал (рис. 2), что после прокатки диапазон температур поверхности находится в пределах $938 - 985^{\circ}\text{C}$. Температура средней части раската, контактирующей с валком, за счет теплопередачи понижается до 969°C . В результате большей пластической деформации углов заготовки и большего деформационного разогрева видно меньшее падение температуры – до 985°C . Боковые стороны, контактирующие только с окружающей средой, охлаждаются до температуры 994°C .

Результаты экспериментов для листовой прокатки показали, что раскат, проходя технологическую линию до первой чистовой клети (промежуточный рольганг, окалиноломатель) охлаждается от 1106°C до 927°C . После прокатки в клети поверхность полосы охлаждается до температуры 926°C . При транспортировании со скоростью 2 м/с по межклетьевому промежутку длиной 6 м полоса после первого прохода охлаждается до температуры 911°C .

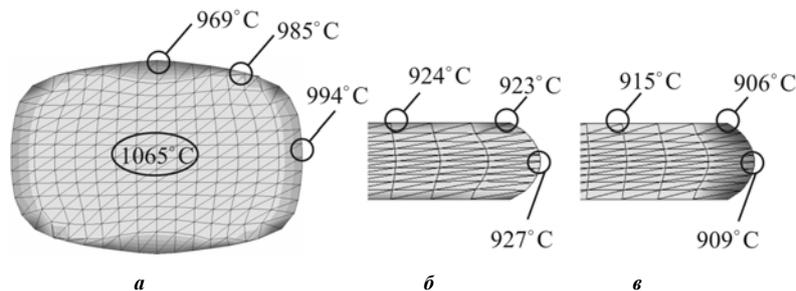


Рис. 2. Поперечное сечение сортового и листовых раскатов:

а) овал в плоскости выхода из валков; б) полоса в плоскости выхода из валков; в) полоса после охлаждения в первом межклетьевом промежутке

Расчет показал (см. рис. 2), что после прокатки диапазон температур поверхности находится в пределах $923 - 927^{\circ}\text{C}$. Температура средней части раската, контактирующей с валком, за счет теплопередачи понижается до 924°C . Углы раската охлаждаются значительно – до температуры 923°C . Боковые стороны, контактирующие только с окружающей средой, охлаждаются до температуры 926.6°C . Транспортировка раската в межклетьевом промежутке приводит к охлаждению до следующих температур: горизонтальная поверхность – 915°C , угол раската – 906°C , боковая поверхность – 909°C .

Таким образом, видно, что расчетные температурные поля достаточно хорошо отражают физику процесса деформации (деформационный разогрев, теплообмен с валками и окружающей средой) и не противоречит сложившимся представлениям о видоизменении температур при пластической деформации металлов.

Результаты расчета деформированного состояния в условиях сортовой прокатки с равномерным температурным полем и полем, полученным в результате решения тепловой задачи, показали, что принципиальных различий в течении металла во всех зонах очага деформации нет. Вид полей скоростей полностью идентичен. Незначительно отличаются лишь числовые значения скоростей (в пределах 1-3%). Это хорошо согласуется с практическими данными, приведенными в работе [5, стр. 59], где экспериментально показано, что изменение температуры прокатки стальных образцов малых сечений от 900 до 1150°C приводит к изменению уширения всего на 2%.

По-другому обстоит дело с напряженным состоянием. Хотя, как и для поля скоростей, принципиальных отличий в распределении напряжений нет, но существенно изменился уровень самих напряжений за счет повышения сопротивления

деформации σ_s при уменьшении температуры. Причем, в начале очага деформации разница не столь значительна, как на выходе из очага. Это связано с тем, что в начале очага деформации температура полосы при равномерном температурном поле и при учете охлаждения отличаются незначительно (до $10-15^\circ\text{C}$), а вот в конце очага деформации разница температур уже составляет 96°C . При этом деформационный разогрев металла в сильно обжимаемых зонах очага деформации не компенсирует падение температуры за счет теплообмена с валками и окружающей средой.

В начале очага деформации при учете распределения температур по сечению раската величина продольных растягивающих напряжений в отдельных его зонах увеличивается с 80 до 100 Н/мм², т.е. на 20%. В области выхода из очага деформации величина растягивающих напряжений в отдельных зонах раската увеличивается с 20 до 90 Н/мм², т.е. на 78%.

Результаты расчета деформированного состояния в условиях листовой прокатки с равномерным температурным полем и полем, полученным в результате решения тепловой задачи, показали, что принципиальных различий в течении металла во всех зонах очага деформации нет. Вид полей скоростей полностью идентичен.

Вид напряженного состояния так же практически не изменяется, но изменились величины напряжений. В плоскости выхода из валков на горизонтальной поверхности полосы продольное напряжение σ_x уменьшается с 12 МПа (равномерное температурном поле) до 6 МПа (неравномерное температурном поле). Т.е. напряжение изменилось на 50%. В угловом участке σ_x уменьшилось с -206 МПа (равномерное температурном поле) до -184 МПа (неравномерное температурном поле). Т.е. напряжение изменилось на 11%. На боковой поверхности σ_x увеличилось с -69 МПа (равномерное температурном поле) до -76 МПа (неравномерное температурном поле). Т.е. напряжение изменилось на 10%.

Сравнивая результаты расчетов напряженно-деформированного состояния металла при сортовой и листовой прокатке в черновых проходах можно сделать вывод, что учет охлаждения металла при прокатке практически не сказывается на точности расчета деформированного состояния.

Напряженное состояние более чутко реагирует на учет температуры при расчетах. Если сравнить тенденцию изменения напряжений при сортовой и листовой прокатке, то видно, что на каждый градус изменения неравномерности температуры при сортовой прокатке напряжения изменяются на 0.81%. При листовой прокатке изменение неравномерности температуры на 1 градус приводит к изменению напряжений в отдельных участках на 50%. Однако, следует отметить, что на участках, характеризующихся максимальными абсолютными величинами напряжений влияние неравномерности температуры существенно меньше. Значит, в рассмотренном случае, малое изменение напряжений при листовой прокатке в абсолютных величинах с учетом охлаждения объясняется не видом процесса, а только тем, что в первых чистовых проходах при прокатке листов температура изменяется незначительно. По мере приближения к последним клетям охлаждение металла в очаге деформации усиливается и по заводским данным падение температуры за проход может достигать $15-20^\circ\text{C}$. Это, в свою очередь, может привести к изменению величины напряжений в несколько раз.

Таким образом, определение напряженного состояния без решения температурной задачи может привести к значительным погрешностям и ошибкам при проектировании калибровки прокатных валков, а также при расчете режимов деформации листовой прокатки. Это затруднит анализ условий прокатки на качественные характеристики продукции - структуру металла после деформации и вероятность образования трещин.

Выводы. Проверка точности расчета температурных полей проката с использованием приведенной методики показала ее хорошую работоспособность и возможность использования при сортовой и листовой прокатке.

На каждый градус изменения неравномерности температуры при сортовой прокатке напряжения изменяются на 0.81%. При листовой прокатке изменение неравномерности температуры на 1 градус приводит к изменению напряжений в некоторых объемах металла на 50%.

Отсутствие учета температурных полей прокатываемого металла может привести к значительным погрешностям при оценке дефектообразования в прокате или ресурса пластичности.

Список литературы.

1. Коновалов Ю.В. Температурный режим широкополосных станов горячей прокатки / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко. – М.: Металлургия, 1974. – 176 с.
2. Теория и технология процессов пластической деформации / Под редакцией проф. А.В. Зиновьева // Труды научно-технической конференции. – Москва, 1997. – 584 с.
3. Жучков С.М. Управление температурным режимом непрерывной сортовой прокатки (Теоретические и технологические основы) / С.М. Жучков, Л.В. Кулаков, А.П. Лохматов. – М.: Теплотехника, 2008. – 144 с.
4. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гринкевич. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 445 с.
5. Минкин А.В. Расчет систем вытяжных калибров / А.В. Минкин. – М.: Металлургия, 1989. – 208 с.
6. Полухин П. И. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением. Применение метода муар и координатных сеток / П. И. Полухин, В. К. Воронцов, А. Б. Кудрин, Н. А. Чиченев. – М.: Металлургия, 1974. – 336 с.
7. Ершов С.В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системах сортовых калибров: диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.03.05 / С.В. Ершов. – Днепропетровск, 2008. – 339 с.
8. Ершов С.В. Оценка достоверности использования метода конечных элементов при анализе процесса прокатки низких и высоких полос / С. В. Ершов, К. Ю. Ключников, А. П. Лохматов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2008. – С. 65 - 70.