

С.М. Жучков, Л.В.Кулаков, А.П.Лохматов

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Сформулированы основные подходы при выборе конструктивно–структурного состава непрерывного стана и разработке деформационного и температурно–скоростного режимов прокатки. Показано, что технологические параметры стана могут быть оптимизированы по удельному энергопотреблению путем соответствующей взаимной корректировки.

### Постановка задачи.

Одним из основных потребителей энергии в промышленно развитых странах является металлургия. Здесь расходуется около 30% всей энергии, потребляемой промышленностью. В зависимости от структуры народного хозяйства доля металлургии в части энергопотребления составляет 9–14%. Из этого следует актуальность возможно, более экономного расходование энергии и рационального ее применения в металлургии, особенно с учетом изменившегося, положения с запасами энергоносителей в мире в целом и в Украине в особенности [1–3]. За последние годы удельный расход энергии на процессы металлургической плавки сократился, а удельный расход электроэнергии на процессы горячей и холодной обработки давлением возрос. Это связано с повышением степени механизации и автоматизации процессов, в том числе вспомогательных. Причем потребление энергии на единичных агрегатах возросло в большей степени, чем увеличилось производство продукции. Из общего объема энергии, потребляемой на производство проката на непрерывных сортовых станах, 75–80 % расходуется непосредственно на деформацию металла. По этой причине оптимизация технологии и конструктивно–структурного состава непрерывного сортового стана по уровню расхода энергии на формообразование раската является актуальной задачей и имеет большую народнохозяйственную значимость.

Разработка конструкций новых прокатных станов, совершенствование технологических режимов обработки на действующих агрегатах возможны только при условии полного учета факторов, определяющих энергосиловые параметры процесса прокатки, таких как физико–механические свойства обрабатываемого материала, температурно–скоростные условия формоизменения, развитие деформации во времени и прочее. Последние, в совокупности определяют энергосиловые параметры процесса деформации через величину сопротивления металла пластической деформации, из чего следует, что эта величина является важнейшей характеристикой процесса пластического течения при обработке металлов давлением [1, 4].

### **Современное состояние вопроса.**

В настоящее время для определения сопротивления металла деформации накоплен значительный статистический материал, на основании которого предложен ряд формул, аппроксимирующих зависимость сопротивления металла пластической деформации от химического состава, степени, скорости и температуры деформации. К сожалению, практически во всех случаях отсутствует оценка комплексного влияния технологических и конструктивно–структурных характеристик станов на сопротивление пластической деформации прокатываемого металла с учетом динамического упрочнения и разупрочнения металла в очагах деформации рабочих клетей и статического разупрочнения в паузах многоступенчатого нагружения – в межклетевых промежутках прокатного стана. Наиболее подходящими для решения такой задачи, на наш взгляд, являются подходы, изложенные в работах А.А. Поздеева и В.Д. Колмогорова. Ими предлагается модель сопротивления металла пластической деформации, представляющая собой функционал от истории нагружения, описывающий сопротивление металла пластической деформации в широком диапазоне температурно–скоростных параметров процесса обработки давлением. При конструировании этого функционала в качестве основной гипотезы принято, что величина сопротивления металла пластической деформации в любой момент времени определяется соотношением скоростей упрочнения и разупрочнения металла. Принято, что физические механизмы упрочнения и разупрочнения не зависят от термомеханических параметров процесса пластического течения и, следовательно, описываются одними и теми же функциональными зависимостями во всем диапазоне температурно–скоростных условий обработки металлов давлением.

В настоящее время достигнут ряд успехов в конструировании таких функционалов, однако эта проблема до сих пор не нашла своего окончательного решения: сегодня еще нет надежных систем уравнений, пригодных для практических расчетов изменения реологических свойств деформируемого металла в конкретных условиях деформации [5,6]. Вместе с тем, в наших работах по использованию неприводных рабочих клетей [7] и управлению температурным режимом непрерывной сортовой прокатки показано, что совместное влияние параметров технологии и конструктивно–структурного состава основного технологического оборудования стана на изменение интенсивности процессов упрочнения и разупрочнения металла, может быть существенным. Это, в свою очередь, может существенно влиять на изменение величины сопротивления металла пластической деформации в процессе сортовой прокатки, и поэтому требует более глубокого и детального исследования.

### **Цель работы.**

Учитывая изложенное, нами предпринята попытка исследовать закономерности влияния технологических параметров прокатки и конструктивно–структурных параметров непрерывного сортового прокатного ста-

на на изменение сопротивления металла пластической деформации в процессе прокатки. На базе выявленных закономерностей разработать подходы для совершенствования технологии и конструктивно–структурного состава непрерывных сортовых станов с целью снижения расхода энергии на формоизменение металла.

#### **Методика исследования.**

Аналитические исследования влияния технологических параметров непрерывной сортовой прокатки и конструктивно–структурного состава стана на сопротивление металла пластической деформации выполнялись с использованием реологического подхода, основанного на представлениях об изменении реологических характеристик за счет взаимно конкурирующих процессов упрочнения и разупрочнения в единичном акте нагружения при высоких соответственных температурах ( $T > 0,5T_{пл}$ ) [4]. Такой подход обеспечивает учет всевозможных вариаций переменных, как в одноступенчатых, так и в многоступенчатых процессах деформирования, по параметрам кривых упрочнения, полученных при постоянных скоростях и температурах деформации в одноразовых нагружениях.

Возможность использования экспериментальных данных по кривым одноразового нагружения широкого спектра материалов для расчета напряжения текучести металла при любых условиях горячей прокатки, имеющихся в литературе в достаточном количестве, делает эту методику наиболее приемлемой для решения задач исследования влияния технологических параметров непрерывной сортовой прокатки на станах различного конструктивно–структурного состава на реологические характеристики прокатываемого металла.

Моделирующий алгоритм расчета реологических характеристик металла и теплового баланса раската в линии непрерывного сортового стана имеет ряд особенностей [11]:

- для повышения точности расчета реологических характеристик металла и его температуры в каждой рабочей клетки соответствующие им теплофизические характеристики теплообмена рассчитываются методом последовательного приближения;
- коэффициент выхода тепла деформации по данным литературных источников принят на уровне 0,86, а распределение тепла от работы против сил контактного трения между валком и прокатываемым металлом – равными долями (1:1);
- расчет реологических характеристик прокатываемого металла, параметров прокатки и всех элементов теплового баланса раската выполняется для приведенной полосы.

Расчет ведется по ходу прокатки, начиная с первой рабочей клетки. При этом:

- размеры сечения и скорость поступательного движения раската на входе, в каждую рабочую клетку принимаются равными размерам сечения и скорости на выходе из предшествующей рабочей клетки, а температура и

напряжение текучести металла – равными значениям этих характеристик в конце предшествующего межклетьевого промежутка;

– температура металла на каждом участке линии прокатного стана определяется на основе теплового баланса раската, учитывающего деформационное тепловыделение, работу против сил трения на контактной поверхности «металл–валок», контактный теплообмен раската с валками и его теплообмен с окружающей средой.

В основу алгоритма расчета удельного расхода энергии на деформацию металла положен принцип определения работы деформации по моменту прокатки, определяемому через контактные силы трения. При этом среднее напряжение текучести металла, определяющее значение среднего касательного напряжения на контактных поверхностях в каждом очаге деформации вдоль линии прокатного стана, рассчитывается последовательно, начиная с первой рабочей клетки, с учетом изменения температурного режима прокатки, который определяется как технологическими параметрами прокатки (материал проката, температура исходных заготовок, скорость прокатки, степень деформации в каждой рабочей клетке), так и конструктивно–структурным составом прокатного стана (количество рабочих клеток, длина промежутков между рабочими клетками и их группами, диаметры валков по клеткам, условия теплообмена раската с окружающей средой в промежутках между клетками и т.п.).

#### Изложение основных материалов исследования.

В результате выполненных исследований показано, что в диапазоне температур исходных заготовок от 1000 до 1200<sup>0</sup>С [12]:

– изменение среднего по очагу деформации значения напряжения текучести металла в рабочих клетях по ходу прокатки монотонно возрастает с постепенным уменьшением интенсивности роста в чистовых группах рабочих клеток (рис.1);

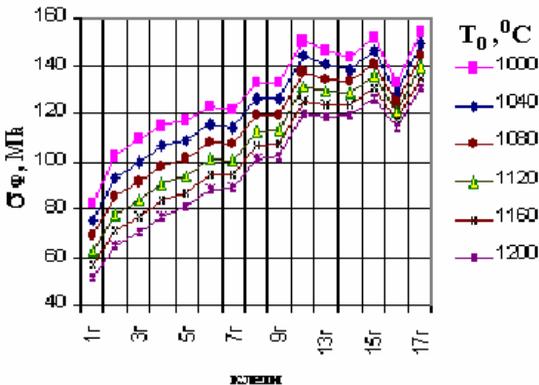


Рис.1. Изменение значения среднего напряжения текучести в очагах деформации рабочих клеток при разных температурах исходных заготовок (стан 250–5 ОАО «Криворожсталь», №14,  $v_{пр} = 16$ м/с)

– любое понижение температуры исходных заготовок приводит к росту среднего напряжения текучести металла в очагах деформации всех рабочих клеток непрерывного сортового стана

(рис.1);

– интенсивность роста среднего напряжения текучести металла в черновых клетях по сравнению с чистовыми выше за счет более интенсивного охлаждения раската в них и влияния повышенного деформационного разогрева металла в чистовых клетях, что, в свою очередь, приводит к сокращению диапазона изменения среднего напряжения текучести металла в чистовых клетях; последнее, в свою очередь, уменьшает в последней рабочей клетки чистовой группы по сравнению с первой черновой клетью диапазон изменения напряжения текучести, вызванного изменением температуры исходных заготовок (рис.1);

– с увеличением скорости прокатки в очаге деформации каждой рабочей клетки увеличивается скорость деформации, что приводит к росту напряжения текучести металла; одновременно за счет деформационного тепловыделения и сокращения потерь тепла в окружающую среду возрастает температура металла, что приводит к уменьшению напряжения текучести металла; итоговое значение среднего напряжения текучести металла в очаге деформации каждой рабочей клетки при изменении скорости прокатки определяется как результат взаимно конкурирующего влияния изменения скорости деформации и изменения температуры металла;

– влияние конструктивно–структурного состава непрерывного сортового прокатного стана на напряжение текучести металла в очагах деформации конкретных рабочих клеток в линии стана проявляется через изменение тепловых потерь в межклетевых промежутках, определяемых протяженностью межклетевых промежутков и эффективностью теплоизоляции передаточных устройств (рис.2).

Влияние факторов конструктивно–структурного состава стана на энергопотребление при непрерывной сортовой прокатке проявляется в соответствии с их влиянием на величину среднего по стану значения сопротивления металла деформации – увеличивает удельный расход энергии при увеличении тепловых потерь в линии стана и наоборот.

Показано, что в условиях типового мелкосортного стана 250 (прототип – мелкосортный стан 250–5 меткомбината «Криворожсталь») с ростом скорости прокатки и температуры нагрева исходных заготовок удельный расход энергии на прокатку уменьшается.

Указанный характер изменения удельного расхода энергии «на прокатку» в условиях, когда распределение деформации металла в рабочей линии стана не изменяется и не изменяется конструктивно–структурный состав стана, объясняется закономерностями изменения среднего напряжения текучести металла в очагах деформации рабочих клеток в зависимости от скорости прокатки и температуры металла, обусловленной температурой нагрева заготовок и деформационным разогревом, а также соответствующим изменением производительности стана.

Скорость прокатки, при которой обеспечивается минимальное энергопотребление на станах этого типа находится в интервале 25 – 30 м/с

(рис.3). Уменьшению удельного энергопотребления способствует также повышение вытяжной способности в очагах деформации рабочих клетях как за счет более эффективных схем деформации, так и за счет уменьшения диаметра рабочих валков.

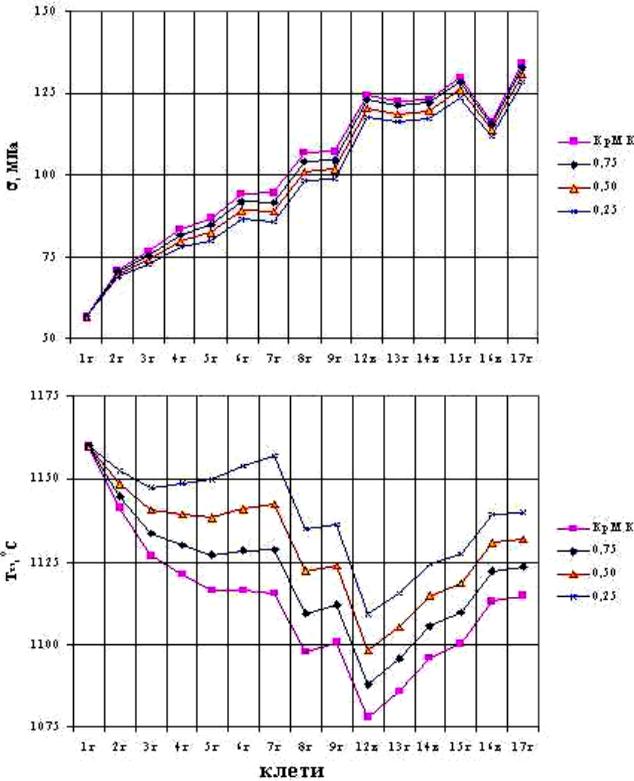
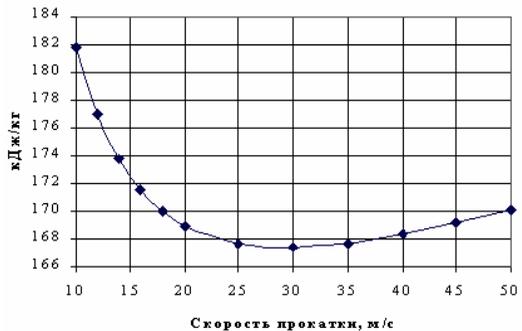


Рис.2. Напряжение текучести (вверху) и температура (внизу) металла в рабочих клетях МС250–5 комбината «Криворожсталь» при прокатке арматурного профиля №14 ( $T_0=1160^{\circ}\text{C}$ ;  $v_{\text{пр}}=16\text{м/с}$ ) с разными условиями теплообмена в межклетевых промежутках черновой группы клетей

Рис.3. Влияние скорости прокатки на удельный расход энергии на деформацию металла в линии скоростного непрерывного сортопрокатного стана (стан 250–5 комбината «Криворожсталь»,  $T_0=1160^{\circ}\text{C}$ , №14)



### Выводы. .

На основе выявленных закономерностей нами сформулированы основные подходы при выборе конструктивно–

структурного состава непрерывного стана и разработке деформационного и температурно–скоростного режимов прокатки, при этом показано, что они могут быть оптимизированы по удельному энергопотреблению путем соответствующей взаимной корректировки [3]. К основным направлениям оптимизации параметров конструктивно–структурного состава непрерывного сортового стана и технологии прокатки на нем по удельному энергопотреблению следует отнести:

- использование схем деформации с уменьшенным расходом энергии (прокатка–разделение, прокатка в четырехвалковых калибрах, прокатка в валах минимально допустимого по условиям захвата диаметра);
- снижение затрат энергии на нагрев заготовок перед прокаткой (прямая прокатка, горячий посад заготовок);
- снижение тепловых потерь в линии стана за счет компактного размещения рабочих клеток (особенно в черновых группах) и улучшения теплоизолирующей способности передающих устройств между рабочими клетями и группами рабочих клеток);
- согласование скорости прокатки и температуры нагрева заготовок (выбор варианта, при котором удельные энергозатраты на прокатку минимальны).

1. *Оптимизация расхода энергии в процессах деформации* /А.Хензель, Т.Шпиттель, М.Шпиттель и др. – М.: Металлургия, 1985. – 184 с.
2. *Глуховский Е.С.* Новые технологические решения в проектах сортопрокатных станов // *Сталь*. – 2001. – № 2. – С.28–30.
3. *Kowall R., Lenart W.* Prozess – Anlagen – und Produktentwickelungen Beim Walzen von stabstahl und Draht // *Metalurgijz (Zagreb)*. – 2002. – Bd.41. – № 3. – s. 171–182.
4. *Расчет усилий при непрерывной горячей прокатке* / В.Н.Жучин, Г.С. Никитин, Я.С. Шварцбарт, И.Г.Зуев. – М.: Металлургия, 1986. – 198 с.
5. *Применение теории ползучести при обработке металлов давлением* / А.А. Поздеев, В.И. Тарновский, В.И. Еремеев, В.С. Баакашвили. – М.: Металлургия. 1973. – 192 с.
6. *Колмогоров В.Л.* Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
7. *Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клеток* / А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков и др. – К.: Наукова думка, 1998. – 240 с.
8. *Жучков С.М., Кулаков Л.В., Лохматов А.П.* Исследование влияния технологических факторов на температурный режим прокатки на непрерывном мелко-сортом стане // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. научных трудов ИЧМ НАН Украины. – Вып.4. К.: Наукова думка, 2001. – С.121–127.
9. *Жучков С.М., Лохматов А.П., Кулаков Л.В.* Методы оперативного управления составляющими теплового баланса раската на непрерывном сортовом стане /

- Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов ИЧМ НАН Украины. – Вып.5. К.: Наукова думка, 2002. – С.166–169.
10. Жучков С.М., Лохматов А.П., Кулаков Л.В. Влияние конструктивно–структурного состава оборудования непрерывного сортового стана на температурный режим прокатки / Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов ИЧМ НАН Украины. – Вып.5. К.: Наукова думка, 2002. – С.169–173.
  11. Лохматов А.П., Жучков С.М., Кулаков Л.В. Особенности методики определения сопротивления металла пластической деформации при непрерывной сортовой прокатке / Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов ИЧМ НАН Украины. – Вып.6. – 2003. – С.181–190.
  12. Пути снижения энергозатрат при непрерывной сортовой прокатке /С.М.Жучков, Л.В.Кулаков, А.В.Сокурено, А.В.Кекух // Сталь. – 2004. – № 6. – С.64–66.
  13. Жучков С.М. Пути повышения эффективности производства сортового проката и катанки. Труды Пятого Международного Конгресса прокатчиков, Череповец, 21–24 октября 2003. М.: ОАО «Черметинформация». – 2004. – С.169–174.

*Статья рекомендована к печати  
д.т.н., проф. Г.В. Левченко*