

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ДВУМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОвого РЕЖИМА ВАЛКОВ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Прокатка тонколистовой стали на современных многоклетевых станах холодной прокатки сопровождается значительным выделением тепла в очаге деформации, что может приводить к перегреву валков, появлению рисок и пригаров на полосе, изменениям тепловой выпуклости валков. Наряду с колебаниями поперечного профиля подката, изменения тепловой выпуклости валков способны вызвать появление целого ряда дефектов холоднокатаных листов, нарушающих их плоскостность и качество поверхности. Данные дефекты проката объясняются неравномерными по длине бочки тепловыми деформациями рабочих валков, а разложение слоя смазки в очаге деформации вследствие высоких температур на контакте полосы и вала приводит к появлению рисок на полосе. Поэтому возникает задача не только управления тепловым профилем валков, но и обеспечения эффективного отвода тепла от полосы и валков. С целью формирования необходимого теплового профиля на современных станах применяют многозонное охлаждение рабочих валков. Но использование подобных систем охлаждения валков, где каждая из зон представляет собой самостоятельный канал управления, ведет к значительному усложнению алгоритмов управления плоскостностью полосы. Это усложнение отчасти связано и с неполнотой информации о температурном режиме валков.

Одним из способов получения достаточно достоверной информации о температурном режиме валков и полосы в процессе холодной прокатки является использование математических моделей. В результате проведенной работы в инженерно-конструкторской лаборатории прокатного оборудования фирмы “Уралмаш–Прокатное оборудование” создана усовершенствованная математическая модель, позволяющая осуществлять расчет температуры и теплового профиля для произвольного числа зон охлаждения вала. Эта работа явилась продолжением научных исследований, проведенных НИИтяжмаш ОАО “Уралмаш” совместно с Череповецким филиалом Вологодского

политехнического института. В итоге для стационарного режима процесса холодной прокатки была реализована рабочая программа по определению теплового режима и теплового профиля валков на ЭВМ, выполненная на алгоритмическом языке С++.

Суть модели заключается в том, что валок условно разбивают на произвольное число зон охлаждения Kz . Для каждой из зон составляются три уравнения теплового баланса (для полосы, рабочего и опорного валков), которые образуют единую систему, включающую не более $3Kz$ уравнений.

В качестве входных параметров модели приняты конструктивные параметры стана и системы охлаждения, а также технологические параметры. Энергосиловые данные рассчитываются по отдельной подпрограмме и дополняют входные параметры. В качестве выходных параметров модели приняты температуры полосы, рабочего и опорного валков и их тепловой профиль. В модели учитываются потоки тепла по длине бочки валков, а также тепло, выделяемое в результате трения в подшипниках и на контактах: “полоса–рабочие валки” и “рабочие валки–опорные валки”.

Уравнения теплового баланса для полосы, рабочего и опорного валков составляются для каждой из зон охлаждения.

Уравнения теплового баланса полосы:

$$Q_{np,k} - 2Q_{p,k} = \Delta Q_{n,k}, \quad K = K_n, K_{n+1}, \dots, K_{np},$$

где $Q_{np,k}$ – количество тепла, выделившегося в очаге деформации в зоне K ;
 $Q_{p,k}$ – количество теплоты, поступившей в рабочий валок в той же зоне;
 $\Delta Q_{n,k}$ – изменение теплосодержания полосы,
 K_n, K_{np} – номера зон охлаждения валка, соответствующие левой и правой кромкам полосы.

Уравнения теплового баланса рабочего валка:

а) для левой шейки валка:

$$Q_{l,ш1} + Q_{тр,p,ш1} - Q'_{окр,p} + Q'_{зм,p,ш1} = Q_{p,ш1}$$

где $Q_{l,ш1}$ – количество теплоты, поступившей из первой зоны бочки валка в шейку через площадь $F_{ш,p}$;

$Q_{тр,p,ш1}$ – количество теплоты, выделившееся в результате трения в подшипнике;

$Q'_{окр,p}$ – количество теплоты, перешедшее в окружающую среду;

$Q'_{зм,p,ш1}$ – количество теплоты, отведенное циркулирующей смазкой в подшипнике;

$Q_{p,ш1}$ – количество теплоты, аккумулированное в шейке валка;

б) для первой зоны ($K=1$) рабочего вала, если первая зона не занята полосой:

$$Q_{тр,р,1} + Q_{2,1} + Q_{ш1,1} - Q_{оп,1} - Q_{окр,1} - Q_{эм,р,1} = Q_{р,1},$$

где $Q_{тр,р,1}$ – количество теплоты, выделяемой за счет трения на контакте рабочего и опорного валков в зоне 1;

$Q_{2,1}$ – количество теплоты, перешедшее из второй зоны в первую;

$Q_{ш1,1}$ – количество теплоты, перешедшее из шейки в первую зону;

$Q_{оп,1}$ – количество теплоты, перешедшее в опорный валок на контакте с рабочим;

$Q_{окр,1}$ – количество теплоты, отводимое в окружающую среду;

$Q_{эм,р,1}$ – количество теплоты, отводимое от рабочего вала эмульсией, подаваемой на первую зону;

$Q_{р,1}$ – количество теплоты, аккумулированное в первой зоне рабочего вала.

Если первая зона ($K=1$) занята полосой, то уравнение теплового баланса рабочего вала будет следующим:

$$Q_{тр,р,1} + Q_{р,1} + Q_{2,1} + Q_{ш1,1} - Q_{оп,1} - Q_{окр,1} - Q_{эм,р,1} = Q_{р,1},$$

где $Q_{р,1}$ – количество теплоты, перешедшее из полосы в рабочий валок в зоне 1;

в) для произвольной зоны рабочего вала, не занятой полосой, т.е. при $K < K_n$ или $K > K_{пр}$:

$$Q_{тр,р,к} + Q_{к+1,к} + Q_{к-1,к} - Q_{оп,к} - Q_{эм,р,к} = Q_{р,к},$$

где $Q_{тр,р,к}$ – количество теплоты, выделяемое в результате трения на контакте рабочего и опорного валков;

$Q_{к+1,к}$ и $Q_{к-1,к}$ – количество теплоты, перешедшее из зоны номер $K+1$ и $K-1$ в зону K ;

$Q_{оп,к}$ – количество теплоты, перешедшее в опорный валок;

$Q_{эм,р,к}$ – количество теплоты, отведенное охлаждающей жидкостью;

$Q_{р,к}$ – количество теплоты, аккумулированное в зоне K рабочего вала.

Для произвольной зоны рабочего вала, занятой полосой (при $K_n \leq K \leq K_{пр}$):

$$Q_{тр,р,к} + Q_{р,к} + Q_{к+1,к} + Q_{к-1,к} - Q_{оп,к} - Q_{эм,р,к} - Q_{окр,к} = Q_{р,к},$$

где $Q_{р,к}$ – количество теплоты, перешедшее из полосы в рабочий валок через площадку контакта в зоне K ;

г) для последней зоны рабочего вала, если она не занята полосой:

$$Q_{тр,р,к} + Q_{ш2,к} + Q_{к-1,к} - Q_{оп,к} - Q_{окр,р,к} - Q_{эм,р,к} = Q_{р,к},$$

где $Q_{ш2,кз}$ – количество теплоты, поступившей из второй шейки валка в последнюю зону;

д) для правой шейки валка:

$$Q_{кз,ш2} + Q_{тр,р,ш2} + Q'_{окр,р} - Q_{зм,р,ш2} = Q_{р,ш2}$$

Составляющие этого уравнения аналогичны составляющим уравнения теплового баланса для левой шейки валка.

Уравнения теплового баланса опорного валка:

а) левой шейки опорного валка:

$$Q_{1,ш2,оп} + Q_{тр,оп,ш1} - Q'_{окр,оп} - Q_{зм,оп,ш1} = Q_{оп,ш1}$$

Составляющие теплового баланса имеют тот же смысл, что и в аналогичном уравнении для рабочего валка;

б) произвольной зоны:

$$Q_{тр,к,оп} + Q_{оп,к+1,к} + Q_{оп,к-1,к} + Q_{оп,к} - Q_{зм,оп,к} - Q_{окр,к} = Q_{оп,к};$$

в) правой крайней зоны опорного валка:

$$Q_{ш2,кз,оп} + Q_{кз-1,кз,оп} + Q_{оп,кз} - Q_{окр,оп} - Q_{оп,зм,к} = Q_{оп,кз};$$

г) шейки опорного валка:

$$Q_{кз,ш2} + Q_{тр,оп,ш2} - Q'_{окр,оп} - Q_{зм,оп,ш2} = Q_{оп,ш2}$$

Описанные выше уравнения теплового баланса полосы, рабочего и опорного валков составляют основу математической модели телового режима валков стана холодной прокатки.

После подстановки в уравнения теплового баланса соответствующих составляющих и приведения подобных членов получится система линейных уравнений относительно величин: $t_{к,к}; t_{р,к}; t_{оп,к}; t_{р,ш1}; t_{р,ш2}; t_{оп,ш1}; t_{оп,ш2}$.

Первая группа уравнений соответствует уравнениям теплового баланса полосы в очаге деформации:

$$A_{1,к} \cdot t_{к,к} \cdot B_{1,к} \cdot t_{р,к} = D_{1,к};$$

$$K = K_1, \dots, K_{тр}.$$

Вторая группа уравнений соответствует уравнениям теплового баланса рабочего валка.

Для левой шейки уравнение имеет вид

$$B_{2,0,1} \cdot t_{р,ш1} + B_{2,0,2} \cdot t_{р,1} = D_{2,0}, K=0.$$

Если первая зона валка занята полосой, то уравнение телового баланса примет вид

$$A_{2,1} \cdot t_{к,к} + B_{2,1,1} \cdot t_{р,ш1} + B_{2,1,2} \cdot t_{р,1} + B_{2,1,3} \cdot t_{р,2} + E_{2,1} \cdot t_{оп,1} = D_{2,1}$$

Если первая зона не занята полосой, то при $K=1$ уравнение примет вид

$$B_{2,1,1} \cdot t_{р,ш1} + B_{2,1,1} \cdot t_{р,1} + B_{2,1,3} \cdot t_{р,2} + E_{2,1} \cdot t_{оп,1} = D_{2,1}$$

Для остальных зон, которые не заняты полосой, т.е. при $K < K_n$ и $K > K_{np}$, уравнение будет иметь вид -

$$B_{2,k,1} \cdot t_{p,k-1} + B_{2,k,2} \cdot t_{p,k} + B_{2,k,3} \cdot t_{p,k+1} + E_{2,k} \cdot t_{он,k} = D_{2,k}$$

Для зон, занятых полосой, т.е. при $K \neq 1$; $K \neq K_n$; $K_n \leq K \leq K_{np}$, имеет следующий вид:

$$A_{2,k} \cdot t_{к,к} + B_{2,k,1} \cdot t_{p,k-1} + B_{2,k,2} \cdot t_{p,k} + B_{2,k,3} \cdot t_{p,k+1} + E_{2,k} \cdot t_{он,k} = D_{2,k}$$

Если последняя зона ($K=K_n$) занята полосой, то уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$A_{2,K} \cdot t_{к,к} + B_{2,K,1} \cdot t_{p,K-1} + B_{2,K,2} \cdot t_{p,K} + B_{2,K,3} \cdot t_{p,K+1} + E_{2,K} \cdot t_{он,K} = D_{2,K}$$

Если последняя зона не занята полосой, то уравнение теплового баланса примет вид

$$B_{2,K,1} \cdot t_{p,K-1} + B_{2,K,2} \cdot t_{p,K} + B_{2,K,3} \cdot t_{p,K+1} + E_{2,K} \cdot t_{он,K} = D_{2,K}$$

Для правой шейки рабочего валка уравнение имеет следующий вид:

$$B_{2,K+1,1} \cdot t_{p,K} + B_{2,K+1,3} \cdot t_{p,K+1} = D_{2,K+1}$$

Аналогичные уравнения получаются для опорного валка:

$$E_{3,0,1} \cdot t_{он,ш1} + E_{3,0,2} \cdot t_{он,1} = D_{3,0}, K=0;$$

$$B_{3,1} \cdot t_{p,1} + E_{3,1,1} \cdot t_{он,ш1} + E_{3,1,2} \cdot t_{он,1} + E_{3,1,3} \cdot t_{он,2} = D_{3,1}, K=1;$$

$$B_{3,K} \cdot t_{p,K} + E_{3,K,1} \cdot t_{он,K-1} + E_{3,K,2} \cdot t_{он,K} + E_{3,K,3} \cdot t_{он,K+1} = D_{3,K}, K=2, \dots, K_3-1;$$

$$B_{3,K} \cdot t_{p,K} + E_{3,K,1} \cdot t_{он,K-1} + E_{3,K,2} \cdot t_{он,K} + E_{3,K,3} \cdot t_{он,ш2} = D_{3,K}, K=K_3;$$

$$E_{3,K,2} \cdot t_{он,K} + E_{3,K+1,3} \cdot t_{он,ш2} = D_{3,K+1}, K=K_3+1.$$

Описанную выше систему уравнений приводят к стандартной форме.

Далее из системы для рабочих валков выражают величины $t_{он,k}$, $K = 1, \dots, K_3$, и подставляют в систему для опорных валков. Таким образом получается система из K_3 линейных уравнений. Матрица этой системы имеет пять отличных от нуля диагоналей:

$$A_{1,1} \cdot t_{p,1} + A_{1,2} \cdot t_{p,2} + A_{1,3} \cdot t_{p,3} = B_{m,1}, K=1;$$

$$A_{2,1} \cdot t_{p,1} + A_{2,2} \cdot t_{p,2} + A_{2,3} \cdot t_{p,3} + A_{2,4} \cdot t_{p,4} = B_{m,2}, K=2;$$

$$A_{k,k-2} \cdot t_{p,k-2} + A_{k,k-1} \cdot t_{p,k-1} + A_{k,k} \cdot t_{p,k} + A_{k,k+1} \cdot t_{p,k+1} + A_{k,k+2} \cdot t_{p,k+2} = B_{m,k}, K=3, 4, \dots, K_3-2;$$

$$A_{k,k-2} \cdot t_{p,k-2} + A_{k,k-1} \cdot t_{p,k-1} + A_{k,k} \cdot t_{p,k} + A_{k,k+1} \cdot t_{p,k+1} = B_{m,k}, K=K-1;$$

$$A_{k,K-2} \cdot t_{p,K-2} + A_{k,K-1} \cdot t_{p,K-1} + A_{k,K} \cdot t_{p,K} = B_{m,K}, K=K_3.$$

Решая эту систему, находят температуры рабочих валков в каждой зоне, а затем, используя обратные преобразования, определяют температуры полосы и опорных валков.

Описанные выше преобразования уравнений и систем линейных уравнений составляют основу двумерной модели теплового режима процесса прокатки.