

Автоматическое управление ускоренным охлаждением проката на толстолистовых станах

Рассмотрена задача автоматического управления ускоренным охлаждением проката с помощью установки, в которой поток охлаждающей жидкости – постоянный, а расход жидкости на единицу длины проката регулируется изменением скорости прохождения металла под установкой.

Ключевые слова: контролируемая прокатка, регламентация температурного диапазона прокатки, установка ускоренного охлаждения, автоматическое управление, расход охлаждающей жидкости, изменение скорости металла.

Актуальность проблемы. Одним из важнейших показателей качества проката являются его механические свойства. Технология прокатки некоторых металлов и сплавов предусматривает регламентацию температурного диапазона на отдельных этапах прокатки. Это характерно, например, для контролируемой прокатки (КП) толстых листов. Под КП понимается производство горячекатаных изделий с регламентацией основных параметров: температуры начала и конца деформации, ее степени и дробности. Основным принцип КП заключается в применении более низкой температуры и более высокой степени обжатий в последних пропусках, чем при рядовой горячей прокатке, с учетом того, что деформация, как способ повышения комплекса механических и эксплуатационных свойств стали, наиболее эффективна при низких температурах [1-3].

Изложение основного материала исследования. С целью достижения заданной температуры проката к началу регламентированного этапа можно использовать установки ускоренного охлаждения, расположенные в линии стана [4, 5]. Управление охлаждением осуществляется путем изменения расхода охлаждающей жидкости на единицу длины охлаждаемого проката. Схемой прокатки предусмотрена отправка проката после очередного пропуска через клеть к установке ускоренного охлаждения, операция охлаждения и возврат металла к стану для дальнейшей прокатки [6, 7].

Рассмотрим задачу автоматического управления ускоренным охлаждением проката с помощью установки, в которой поток охлаждающей жидкости – постоянный, а расход жидкости на единицу длины проката регулируется изменением скорости прохождения металла под установкой [8, 9].

где N – количество проходов проката под установкой в процессе охлаждения; $V(t)$ – скорость рольганга в течение одного прохода проката под установкой; γ_i – момент включения (выключения) подачи жидкости; a, a^* – соответственно ускорение разгона или замедления проката и допустимое значение ускорения; V_{\max} – максимальная допустимая линейная скорость рольганга; t_{ji} – время пребывания под установкой j -го поперечного сечения проката в i -м пропуске; $t_{jн}^0, t_{jс}^0$ – соответственно начальная и заданная конечная температура j -го поперечного сечения проката; $T_{ц}$ – полное время цикла охлаждения проката (охлаждением металла на воздухе пренебрегаем).

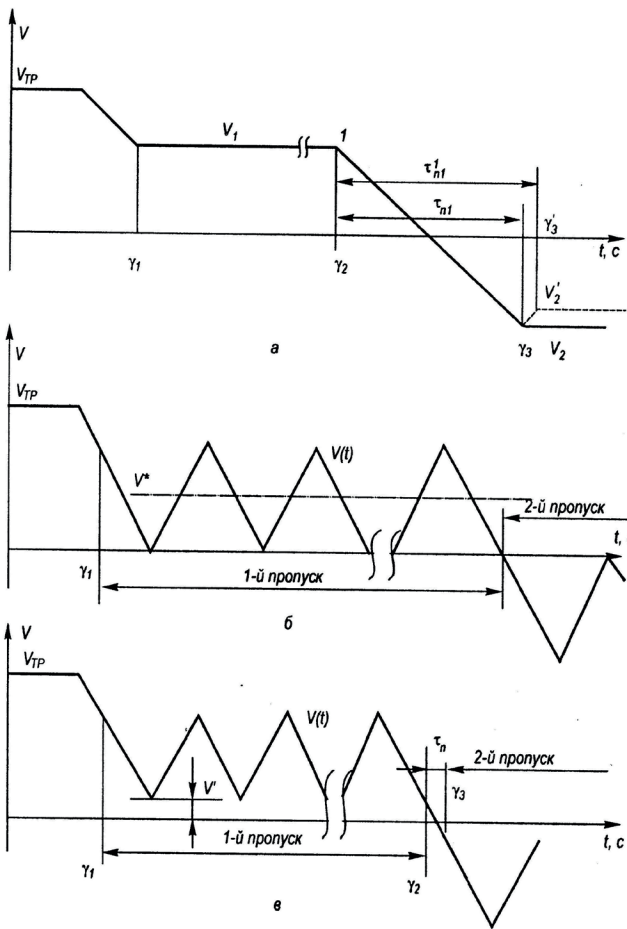
Отметим, что длина установки L в несколько раз меньше длины охлаждаемого проката ($L \ll l$).

Поскольку суммарное время пребывания каждого участка под потоком охлаждающей жидкости определяется начальной и заданной конечной температурой этого участка, суммарное время пребывания полосы под установкой жестко определено и задача оптимизации сводится к минимизации дополнительного времени, расходуемого на транспортировку (реверс) проката вне зоны установки.

Рассмотрим вначале случай охлаждения проката, начальная средняя температура которого одинакова во всех поперечных сечениях. При управлении процессом выделим два множества возможных стратегий: стратегии, при которых величина скорости рольгангов в период одного прохода проката под установкой – постоянна, и стратегии с переменной скоростью движения охлаждаемого металла в зоне охлаждения (рисунок).

На рисунке показано: a – для стратегий с постоянной скоростью движения проката под установкой охлаждения; b – для стратегий оптимального управления с периодическим изменением скорости (прокат равномерно охлаждается) при $V' = 0$; $в$ – для стратегий оптимального управления с периодическим изменением скорости при $V' \neq 0$; $V_{\text{тр}}$ – скорость транспортировки проката от клетки к установке ускоренного охлаждения; V_1, V_2, V'_2 – скорость движения проката под установкой в первом и втором пропуске ($V_2 = V_1, V'_2 < V_1$); $V(t), V^*$ – соответственно текущая скорость и средняя скорость j -го поперечного сечения проката под

$$\left. \begin{aligned} &\text{Определить } N, V_i(t), \gamma_i \text{ такие, чтобы } T_{ц} \rightarrow T_{ц\min} \\ &\text{при } \frac{dV}{dt} = a \leq a^*; V_i(t) \leq V_{\max}; \\ &\sum_{i=1}^N t_{ji} = C = f^*(t_{jн}^0, t_{jс}^0); \\ &N - \text{четное, } N \geq 2, \end{aligned} \right\} (1)$$



Графики скорости рольгангов при ускоренном охлаждении

установкой; τ_{n1} – время паузы при $V_1 = V_2$; τ_{n1}^1 – время паузы при $V_1 > V_2$; γ_1, γ_3 – моменты включения подачи охлаждающей жидкости; γ_2 – момент выключения подачи жидкости.

Для стратегий первого множества время пауз суммарное (см. рисунок):

$$\tau_{\Sigma} = \frac{1}{a} \left[\sum_{i=1}^{N-1} (|V_i - V_{i+1}|) + \sqrt{2} \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{V_i^2 + V_{i+1}^2} \right]. \quad (2)$$

Причем, поскольку время охлаждения каждого поперечного сечения проката $t_{\text{охл}\Sigma}$ определено его начальной и заданной конечной температурой, то:

$$t_{\text{охл}\Sigma} = t_{\text{охл}\Sigma}^* = \sum_{i=1}^N \frac{L}{V_i}. \quad (3)$$

Используя выражения (2) и (3) для построения функции Лагранжа и произведя анализ задачи, найдем, что минимум времени пауз обеспечивается выбором одинаковых скоростей во всех пропусках проката под установкой охлаждения. Однако, паузы при этом сохраняются и общее время операций охлаждения может существенно превышать время, требуемое для собственно охлаждения. В связи с этим представляет интерес решение задачи выбора стратегии управления из второго множества стратегий.

Не прибегая к строгому математическому решению поставленной задачи, определим характеристики искомой стратегии на основании следующих рассуждений. Отсутствие пауз (времени пребывания проката вне зоны действия установки) между пропусками достигается при выходе проката из установки и последующем входе в нее на нулевой скорости. Следовательно, траектория скорости движения проката в пропуске должна иметь фиксированные начальную и конечную точки ($V = 0$).

С другой стороны, поскольку время охлаждения каждого j -го поперечного сечения по длине полосы ($j = 1, 2, \dots, n$) должно быть одинаковым, необходимо соблюдать условия:

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_{\text{ВХ}j}}^{t_{\text{ВЫХ}j}} V(t) dt &= \int_{t_{\text{ВХ}j+1}}^{t_{\text{ВЫХ}j+1}} V(t) dt = L \\ V(t_{\text{ВХ}j}) &= 0 \quad V(t_{\text{ВЫХ}j}) = 0 \\ j &= 1 \quad \quad \quad j = n \\ t_{\text{ВХ}j} - t_{\text{ВЫХ}j} &= t_{\text{ВХ}j+1} - t_{\text{ВЫХ}j+1} = \Delta t, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $t_{\text{ВХ}j}, t_{\text{ВЫХ}j}$ – соответственно момент входа j -го поперечного сечения проката в зону действия установки и момент выхода этого участка из нее.

Условию (4) удовлетворяет функция $V(t) = V^* + V^*(t)$, где $V^*(t)$ – периодическая составляющая ($-V^* \leq V^*(t) \leq V^*$) с периодом T таким, что значение $\int_0^T V(t) dt$ – целое число раз укладывается в L и l .

Учитывая, что разгон и торможение рольганга существующими системами приводов осуществляется с постоянным ускорением на упомянутых участках, периодическая функция описывается:

$$\begin{aligned} (V^* + V^*(t)) &= \\ &= \begin{cases} a(t-vt) & \text{при } vT < t \leq \left(v + \frac{1}{2}\right)T; \\ \frac{aT}{2} - a \left[t - \left(v + \frac{1}{2}\right)T \right] & \text{при } \left(v + \frac{1}{2}\right)T < t \leq (v+1)T; \end{cases} \quad (5) \\ V^* &= \frac{aT}{4}; \quad v = 0, 1, \dots, \quad (6) \end{aligned}$$

то есть представляет пилообразный график изменения скорости с равнобедренной пилой и изменением амплитуды от 0 до $V_{\text{max}} = \frac{aT}{2}$ (рис., б).

Поскольку применение описанной стратегии исключает паузы между пропусками процесса охлаждения, эта стратегия обеспечивает оптимальное управление в соответствии с поставленной целью. Моменты включения (отключения) подачи охлаждающей жидкости γ_i соответствуют входу и выходу проката из установки в первом и N -м пропусках.

Отметим, что с целью минимизации времени транспортировки проката от прокатной клетки до установки охлаждения и в обратном направлении, необходимо минимизировать участки торможения от скорости транспортировки перед входом металла в установку и разгона при выходе металла из установки для возврата к клетке (рис., б).

Следовательно, необходимо обеспечить вход в зону установки в первом пропуске охлаждения и выход из этой зоны в последнем пропуске на скорости, максимально близкой к скорости транспортировки. Тогда траектория скорости в названных выше точках первого и последнего пропуска должна обеспечивать $V = V_{\max} = \frac{aT}{2}$; условия выбора T отличаются от описанного и должны обеспечивать равенство длины L целому числу значений $\int_0^T V(t)dt$, а длина l нечетному целому числу значений $\frac{1}{2} \int_0^T V(t)dt$.

С учетом изложенного расчеты, связанные с реализацией рассмотренной стратегии, включают выбор количества пропусков и выбор значений T и a решением следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{t_{\text{охл}\Sigma}^* V^*}{L}; V^* = \frac{aT}{4}; \\ \frac{1}{K} l \text{ для } i = 2, 3, \dots, N-1 \\ \frac{1}{K_1 + \frac{1}{2}} l \text{ для } i = 1, N \\ V &= V^* + V^*(t) \\ a &\leq a^*; V \leq V_{\max}, \end{aligned} \right\} = \int_0^T V(t)dt = \frac{1}{K} L; \quad (7)$$

где K, K_1 – целые числа, $K < K_1$, V – определяется выражением (5).

Может оказаться, что система (7) не имеет решения в пределах заданных ограничений, тогда реализация выбранной стратегии невозможна и целесообразен переход к ближайшей по эффекту стратегии управления, где функция управления скорости содержит дополнительную составляющую V' (рис., в), то есть:

$$V' \leq V(t) < V^* + V^*(t) + V'.$$

В последнем случае скорость входа-выхода проката из установки $V' > 0$ и обуславливает наличие минимальной паузы.

Теперь рассмотрим случай охлаждения проката с неравномерным значением температуры по его длине. График изменения температуры по длине проката обычно отличен от прямой с постоянной ординатой. Типичными являются следующие графики: выпуклая парабола (охлажденные концы раската), «температурный клин», двойная волна, вызванная «глиссажными метками», и варианты наложения этих графиков. Требуется охладить прокат до заданной постоянной по его длине температуры.

Определим возможность применения рассмотренной выше стратегии управления с периодическим изменением скорости для неравномерного охлаждения проката, сохраняя условия равенства нулю (или максимального приближения к нулю) скоростей выхода проката из зоны установки и входа в нее в промежутках между пропусками, и максимальных скоростей в начале и конце этапа охлаждения.

Пусть $l = mL$ (m – целое число), тогда разбив абсциссу l на m участков, найдем требуемое время охлаждения для каждого q -го из $(m+1)$ -х поперечных сечений раската. Требуемое время разделим на N равных частей, которые составят время пребывания соответствующего сечения в зоне установки ускоренного охлаждения по пропускам. Определим для каждой q -й точки число периодов изменения скорости и ускорения a таким образом, чтобы от момента входа до момента выхода этой точки из установки в i -м пропуске прошло заданное время. Для двух сечений проведенного разбиения, соседних по ходу движения проката, получим $a_q, a_{q+1}, T_q, T_{q+1}$. Установим, как меняется время охлаждения проката в промежуточных точках, находящихся между точками проведенного разбиения, если количество периодов $V(t)$ за время пропуска соответствует числу $m+1$. Для q^* -й точки, отстоящей от q -й по ходу движения на расстоянии $z (L > z > \frac{L}{2})$ время охлаждения составит:

$$t_{\text{охл}q}^* = (T_q - T_{q+1}) \sqrt{\frac{L-z}{2L}}; \quad (8)$$

$$\text{для } \frac{L}{2} \geq z > 0$$

$$t_{\text{охл}q}^* = (T_{q+1} - T_q) \sqrt{\frac{L-z}{2L}}, \quad (9)$$

а при линейном распределении времени охлаждения в промежутке $0 \leq z \leq L$:

$$t_{\text{охл}q}^{(n)} = \frac{T_1 - T_2}{L} (L - z) + T_2. \quad (10)$$

Очевидно, что применение управления с упомянутыми параметрами вызовет отклонения от линейной аппроксимации времени охлаждения на участках проведенного разбиения от требуемого времени охлаждения проката в различных сечениях.

Максимальное значение этого отклонения в точке $\frac{d(t_{\text{охл}q}^* - t_{\text{охл}q}^{(n)})}{dz} = 0$ с использованием выражений (8), (9) составит:

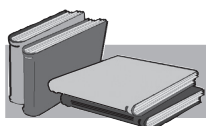
$$\max_{t_{\text{охл}q}^*} \left(\frac{t_{\text{охл}q}^* - t_{\text{охл}q}^{(n)}}{t_{\text{охл}q}^*} \right) = \frac{T_1 - T_2}{2(T_1 - T_2)}, \quad (11)$$

$$\text{при } Z = \frac{1}{8}L; \quad Z = \frac{7}{8}L,$$

что в реальных условиях изменения требуемого времени охлаждения по длине проката $0,9 \leq \frac{T_1}{T_2} \leq 1,1$ составит не более 1 %.

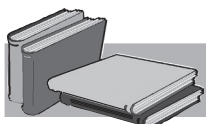
С увеличением количества периодов $V(t)$ за время охлаждения на пути L упомянутое отклонение от линейности уменьшается.

Таким образом, для случая неравномерного охлаждения проката, применение стратегии с периодическим изменением скорости также обеспечивает оптимальное управление (для линейной аппроксимированной кривой изменения требуемого времени охлаждения каждого участка проката в функции координаты этого участка на прокате).



ЛИТЕРАТУРА

1. Минаев А. А., Устименко С. В. Контролируемая прокатка сортовой стали. – Москва: Metallurgia, 1990. – 175 с.
2. Погоржельский В. И., Литвиненко Д. А., Матросов Ю. И. и др. Контролируемая прокатка. – Москва: Metallurgia, 1979. – 183 с.
3. Погоржельский В. И. Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла. – Москва: Metallurgia, 1986. – 150 с.
4. Матросов Ю. И., Цкитишвили Э. О., Попов Е. С., Коновалов Г. Н., Холодный А. А. Ускоренное охлаждение после контролируемой прокатки при производстве толстолистовых трубных сталей на стане 3600 «МК» АЗОВСТАЛЬ // Metallurgist. – 2013. – № 9. – С. 77–82.
5. Франценюк И. В., Захаров А. Е. Системы (установки) ускоренного охлаждения листового проката // Ускоренное охлаждение листа. – Москва: Metallurgia, 1992. – С. 64–109.
6. Евсеев С. Л., Гулов П. В., Попов А. С., Паршин А. А. Совершенствование технологии ускоренного охлаждения проката // Сталь. – 2009. – № 12. – С. 39–41.
7. Волковский О. С. Совершенствование методов моделирования и внедрение ускоренного охлаждения проката специальных марок стали с целью повышения качества продукции: дисс. канд. техн. наук / О. С. Волковский. – Днепропетровск, 1988. – 234 с.
8. Долженков Ф. Е., Коновалов Ю. В., Носов В. Г., Шмаков Г. Н., Подгайский М. С., Дубиня А. А. Повышение качества толстых листов. – Москва: Metallurgia, 1984. – 247 с.
9. Иевлев Н. Г., Грабовский Г. Г. Математические модели и алгоритмы управления в АСУ ТП толстолистовых прокатных станов. – К.: Техніка, 2001. – 248 с.



REFERENCES

1. Minaev A. A., Ustimenko S. V. (1990). Kontroliruemaya prokatka sortovoi stali [Controlled rolling of high-grade steel]. Moscow: Metallurgiya, 175 p. [in Russian].
2. Pogorzhe'skiy V. I., Litvinenko D. A., Matrosov Yu. I. et al. (1979). Kontroliruemaya prokatka [Controlled rolling]. Moscow: Metallurgiya, 183 p. [in Russian].
3. Pogorzhe'skiy V. I. (1986). Kontroliruemaya prokatka nepreryvnolitogo metalla [Controlled rolling of continuous cast metal]. Moscow: Metallurgiya, 150 p. [in Russian].
4. Matrosov Yu. I., Tskitishvili E. O., Popov E. S., Konovalov G. N., Kholodnyy A. A. (2013). Uskorennoe okhlazhdenie posle kontroliruemoi prokatki pri proizvodstve tolstolistovykh trubnykh staley na stane 3600 «MK» AZOVSTAL' // Metallurgist, no. 9, pp. 77-82 [in Russian].
5. Frantseniuk I. V., Zakharov A. E. (1992). Sistemy (ustanovki) uskorennoogo okhlazhdeniia listovogo prokata [Systems (installations) for accelerated cooling of sheet metal] Uskorennoe okhlazhdenie lista, Moscow: Metallurgiya, pp. 64–109 [in Russian].
6. Evseev S. L., Gulov P. V., Popov A. S., Parshin A. A. (2009). Sovershenstvovanie tekhnologii uskorennoogo okhlazhdeniia prokata [Perfection of technology for accelerated cooling of rolled products]. Stal', no. 12, pp. 39–41 [in Russian].
7. Volkovskiy O. S. (1988). Sovershenstvovanie metodov modelirovaniia i vnedrenie uskorennoogo okhlazhdeniia prokata spetsial'nykh marok stali s tsel'iu povysheniia kachestva produktsii [Improvement of modeling methods and introduction of accelerated cooling of rolled special steel grades in order to improve product quality]. Candidate's thesis. Dnepropetrovsk, 234 p. [in Russian].
8. Dolzhenkov F. E., Konovalov Yu. V., Nosov V. G., Shmakov G. N., Podgaiskiy M. S., Dubinia A. A. (1984). Povyshenie kachestva tolstykh listov [Improving the quality of thick sheets]. Moscow: Metallurgiya, 247 p. [in Russian].
9. Ievlev N. G., Grabovskiy G. G. (2001). Matematicheskie modeli i algoritmy upravleniia v ASU TP tolstolistovykh prokatnykh stanov [Mathematical models and control algorithms in the automated process control system of thick-plate rolling mills]. Kyiv: Tekhnika, 248 p. [in Russian].

На основании аналогичных приведенным, для случая охлаждения равномерно нагретого проката рассуждений определяются основные параметры управлений, а также вводится смещение V' в случае нарушения одного из ограничений условия задачи.

Выводы

Изложенное выше подтверждает эффективность автоматического управления ускоренным охлаждением проката с помощью установки, в которой поток охлаждающей жидкости – постоянный, а расход жидкости на единицу длины проката регулируется изменением скорости прохождения металла под установкой.

Анотація

Ієвлев М. Г.

Автоматичне управління прискореним охолодженням прокату на товстолистових станах

Розглянуто задачу автоматичного управління прискореним охолодженням прокату за допомогою установки, в якій потік охолоджуючої рідини – постійний, а витрата рідини на одиницю довжини прокату регулюється зміною швидкості проходження металу під установкою.

Ключові слова

Контрольована прокатка, регламентація температурного діапазону прокатки, установка прискореного охолодження, автоматичне керування, витрата охолоджуючої рідини, зміна швидкості металу.

Summary

Ievlev N.

Automatic control of accelerated cooling of rolled metal on thick plates mills

It is regarded the problem of automatic control of accelerated cooling of rolled metal with the help of an installation in which the flow of cooling liquid is constant, and the liquid consumption per unit length of rolled metal is controlled by changing the speed of the metal passing under the unit.

Keywords

Controlled rolling, regulation of the temperature range of rolling, installation of accelerated cooling, automatic control, flow rate of cooling liquid, changing the speed of the metal.

Поступила 06.04.17