

Влияние температуры и перемешивания жидкого чугуна на состав сопутствующей газовой среды

Промежуточная среда между пирометром и визируемой поверхностью жидкого чугуна в реальных условиях бесконтактной пирометрии насыщена дымом, пылью, парами и газами, которые, рассеивая и поглощая излучение расплава, случайно изменяют ее эффективный коэффициент пропускания ($\tau_{эф}$). Под $\tau_{эф}$ здесь и далее следует понимать отношение потока излучения, падающего на первичный преобразователь, к потоку излучения поверхности расплава в телесном угле визирования пирометра. Используя термодинамические законы теплового излучения Вина и Стефана-Больцмана можно получить следующие выражения, определяющие методические погрешности оптической пирометрии при случайных изменениях $\tau_{эф}$ и $\varepsilon = 1$ для яркостной, радиационной и цветовой пирометрии:

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S_{\tau_{эф}}} = \frac{\lambda_{эф}}{C_2} \ln \tau_{эф}; \quad (1)$$

$$T_R - T_{R_{\tau_{эф}}} = T_R \left(1 - \sqrt[4]{\frac{1}{\tau_{эф}}} \right) \quad (2)$$

$$\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{c_{\frac{\tau_{эф1}}{\tau_{эф2}}}}} = \frac{\Lambda}{C_2} \ln \frac{\tau_{эф1}}{\tau_{эф2}}, \quad (3)$$

где S , T_R , T_c – значения яркостной, радиационной и цветовой температур, при $\tau_{эф} = \tau_{эф1} = \tau_{эф2} = 1$, К;

$S_{\tau_{эф}}$, $T_{R_{\tau_{эф}}}$, $T_{c_{\frac{\tau_{эф1}}{\tau_{эф2}}}}$ – значения условных температур

при загрязнении промежуточной среды ($\tau_{эф} \neq \tau_{эф1} \neq \tau_{эф2} \neq 1$), К; $\lambda_{эф}$ – эффективная длина волны яркостного

пирометра, мкм; $\Lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ – эквивалентная длина волны цветовой пирометра, мкм; C_2 – вторая постоянная Планка (0,014388 К·м); ε – излучательная способность расплава.

Анализ выражений показывает, что влияние $\tau_{эф}$ на погрешности бесконтактной пирометрии излучения качественно и количественно совпадает с воздействием ε . Поэтому, по актуальности для

Экспериментально установлено сильное комплексное влияние температуры и перемешивания жидкого чугуна на состав сопутствующей газовой среды в индукционных печах. При нагреве и последующем перегреве расплава в кварцевом тигле выше температуры термодинамического равновесия основной металлургической реакции содержания CO_2 и O_2 изменяется соответственно от 0,04 до 4,50 % (в 114 раз) и от 20,7 до 17,0 %. После прекращения вынужденной конвекции состав скачком возвращается к исходному при любой температуре. Полученные результаты рекомендуется использовать как при разработке технологических процессов обработки жидкого чугуна, например, термовременной обработки, так и их контроля, в том числе бесконтактного оптического термоконтроля

оптической термометрии, изучение влияния $\tau_{эф}$ и ε являются задачами одного порядка. $\tau_{эф}$ при бесконтактной пирометрии излучения в значительной степени определяется составом сопутствующей промежуточной газовой среды. Обычно атмосфера на уровне моря имеет следующий состав (%):

$N_2 - 78,98$; $O_2 - 20,20$; $Ar - 0,80$; $CO_2 - 0,02$.

В спектральном диапазоне пирометрии чугуна излучение наиболее сильно поглощается содержащимися в атмосфере CO_2 и H_2O [1, 2]. CO_2 имеет избирательное резонансное поглощение в спектральных диапазонах 0,75-0,80; 1,30-1,50; 1,75-1,85; 2,30-3,40; 4,20-4,60 мкм. В первом диапазоне поглощение в атмосфере на высоте 0,3 км, то есть даже при значительном уменьшении содержания CO_2 , достигает 20 %, а в указанных инфракрасных участках спектра повышается до 100 %.

Приведенные данные отражают сильное влияние CO_2 на пропускание излучения и указывают на необходимость изучения состава сопутствующих промежуточных сред в промышленных условиях.

Анализ физико-химических процессов в расплавленном чугуне позволяет утверждать, что состав газовой среды над металлом может значительно отличаться от атмосферного и должен быть связан с технологическими параметрами, в том числе температурой и перемешиванием расплава. Для изучения газового состава сопутствующей промежуточной среды разработана экспериментальная установка (рис. 1), содержащая вытяжной зонт 1, который с помощью металлической трубы 2, через стеклянную кювету 3, соединен с вакуум-насосом 4. Кювета имеет два запорных вентиля 5. Зонт размещался на расстоянии 1-2 см

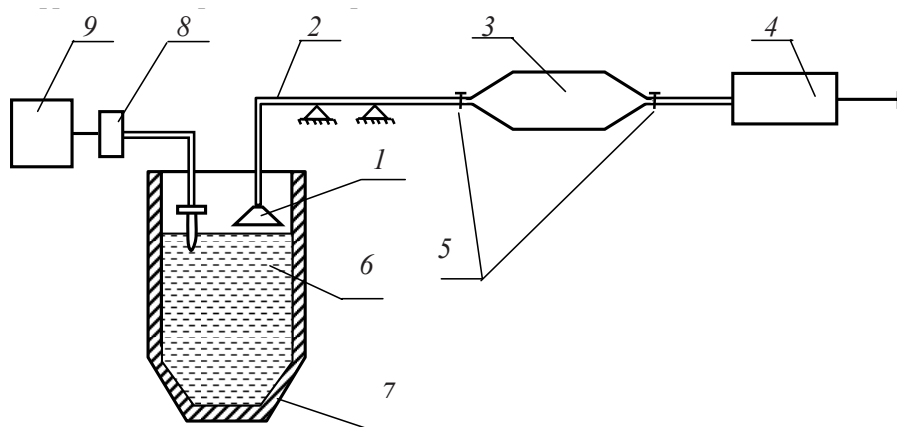


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки

от поверхности чугуна 6, выплавляемого в тигле индукционной печи 7 (ИЧТ–2,5). Для измерений температуры расплава использовался термоэлектрический термометр 8 типа ТПР (гр. Пр 30/6) в комплекте с цифровым измерителем напряжения и тока 9 типа Ц 68009.

Первая серия экспериментов проводилась дважды по следующей методике. После наплавления тигля металлом на 2/3 его емкости расплав перегревался до 1480 °С. Пробы для газоанализа отбирались в процессе нагрева (вынужденной конвекции) и охлаждения (свободной конвекции) чугуна в интервале от 1200 до 1480 °С. Для охлаждения расплава при температуре 1480 °С печь отключалась. Первая проба газа отбиралась при температуре 1200 °С, вторая – при первом появлении чистой «неокисленной» поверхности расплава, третья – в момент исчезновения последней видимой оксидной пленки и четвертая – при температуре 1480 °С. Затем печь отключалась и отбиралась пятая проба (1465 °С), шестая проба отбиралась при появлении первой видимой пленки, седьмая – в момент полного окисления поверхности расплава и восьмая – при минимальной температуре (1200 °С). Вторая и третья серии экспериментов выполнены только в режиме нагрева (вынужденной конвекции) металла в более узких температурных диапазонах. При температуре около 1400 °С отбирались металлические пробы для определения химического состава расплава. Результаты анализа химического состава чугуна приведены в табл. 1.

Таблица 1
Анализ химического состава чугуна

| Содержание элементов, % | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|
| C | Si | Mn | S | P |
| 3,16 | 2,87 | 0,41 | 0,04 | 0,08 |
| 3,58 | 1,89 | 0,27 | 0,06 | 0,05 |
| 3,54 | 2,22 | 0,32 | 0,07 | 0,06 |

Анализ отобранных газовых проб выполнялся в лабораторных условиях на хроматографе типа LXM-8МД методом определения компонентного и

количественного состава сухого газа по стандартной методике. Результаты газоанализа приведены в табл. 2 и представлены на рис. 2 в виде зависимостей содержания компонентов N₂, O₂+Ar, CO₂ от температуры расплава при его нагреве (вынужденной конвекции) и охлаждении (свободной конвекции).

Анализ экспериментальных данных позволяет утверждать, что в указанных интервалах варьирования параметров явное влияние химического состава чугуна на сопутствующую газовую среду не установлено. По содержанию CO₂ результаты трех серий практически совпадают. Установлено очень сильное комплексное влияние температуры и перемешивания расплава на содержание CO₂ и O₂. Например, при нагреве расплава от 1200 до 1480 °С содержание CO₂ увеличивается, а O₂ уменьшается соответственно от 0,04 до 4,54 и от 20,66 до 16,94 %. На этапе нагрева до средних температур происходят медленные указанные изменения состава среды. Затем темп изменений содержания CO₂ и O₂ резко возрастает с ростом температуры. После отключения печи и затухания вынужденной конвекции состав газовой среды изменяется практически скачком и возвращается в исходное состояние. Сильное влияние вынужденной конвекции расплава на состав промежуточной среды определяет гистерезисный характер приведенных зависимостей.

Полученные закономерности можно обосновать следующим образом. Процесс нагрева расплава

Таблица 2
Газоанализ газовых проб

| № серии | № пробы | Содержание компонентов, % | | | Примечания |
|---------|---------|---------------------------|--------------------|-----------------|-------------------------------|
| | | N ₂ | O ₂ +Ar | CO ₂ | |
| 1 | 1 | 79,30 | 20,66 | 0,04 | Нагрев от 1200 до 1480 °С |
| | 2 | 79,78 | 20,18 | 0,04 | |
| | 3 | 80,30 | 18,82 | 0,88 | |
| | 4 | 78,52 | 16,94 | 4,54 | |
| | 5 | 79,53 | 20,42 | 0,05 | Охлаждение от 1465 до 1205 °С |
| | 6 | 79,43 | 20,52 | 0,05 | |
| | 7 | 79,28 | 20,67 | 0,05 | |
| | 8 | 79,50 | 20,46 | 0,04 | |
| 2 | 1 | 79,79 | 20,12 | 0,09 | Нагрев от 1290 до 1390 °С |
| | 2 | 79,87 | 19,78 | 0,85 | |
| | 3 | 80,24 | 19,08 | 0,98 | |
| | 4 | 80,35 | 18,71 | 0,94 | |
| 3 | 1 | 79,81 | 20,08 | 0,11 | Нагрев от 1290 до 1340 °С |
| | 2 | 79,91 | 19,85 | 0,24 | |
| | 3 | 79,99 | 19,53 | 0,48 | |
| | 4 | 80,10 | 19,35 | 0,55 | |

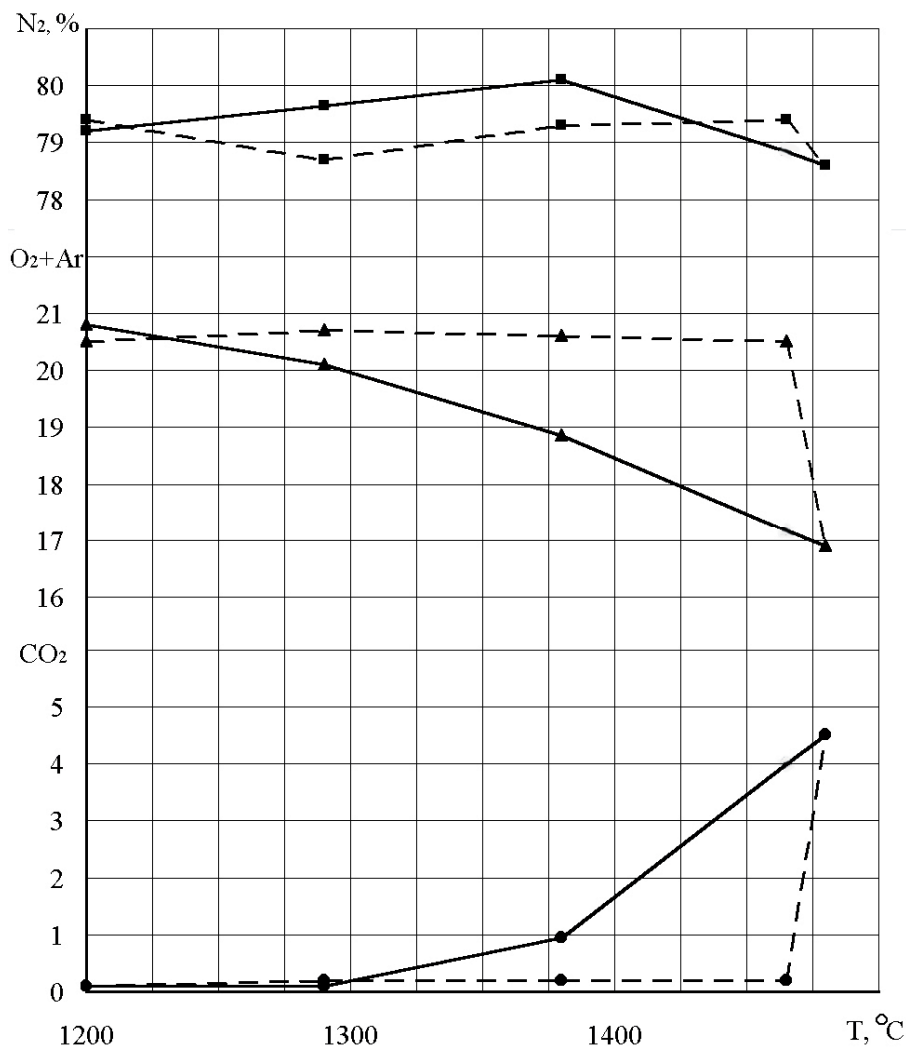
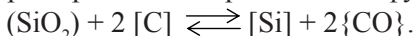


Рис. 2. Зависимости содержания CO₂, O₂+Ar и N₂ от температуры расплава: — нагрев; - - - - - охлаждение

сопровождается окислительно-восстановительными процессами, конечные продукты которых включают CO (CO₂). Основная металлургическая реакция в кварцевом тигле определяет взаимодействие углерода расплава с кремнеземом футеровки



Температура термодинамического равновесия (t_p) этой реакции определяется составом чугуна. Для указанных в табл. 2 составов t_p находится в пределах от 1410 до 1450 °C [4]. В области низких температур направление реакции указано нижней стрелкой, а для $t > t_p$ – верхней. При $t < t_p$ образуется SiO₂, которая покрывает поверхность расплава и содержание CO₂ (0,04 %) практически соответствует атмосферному (0,02 %). С повышением температуры расплава термодинамически более вероятной будет реакция восстановления кремния из SiO₂, которая сопровождается выделением CO. Оксид углерода I устойчив при температурах выше 1000 °C, поэтому при охлаждении взаимодействует с кислородом и переходит в оксид углерода II. В соответствии с описанными процессами при нагреве расплава изменяется содержание CO₂ и O₂. После отключения

печи вынужденная конвекция расплава в тигле прекращается, соответственно резко уменьшается массообмен в расплаве и выделение CO. Это приводит к скачкообразному восстановлению практически исходного состава газовой среды.

При нагреве металла до равновесных температур наблюдается незначительное повышение содержания N₂, связанное с дегазацией умеренно перемешиваемого расплава. С повышением температуры расплава растворимость газов повышается, оксидная пленка утончается и разрывается циркулирующим металлом, что приводит к снижению концентрации N₂ в сопутствующей среде. После отключения печи и прекращения вынужденной конвекции содержание N₂ быстро возвращается к исходному (~79 %).

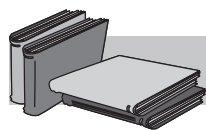
Для пирометрии излучения наибольший интерес представляет содержание CO₂ в промежуточной среде, которое в условиях индукционной плавки сильно изменяется. Безусловно, выявленные колебания содержания CO₂ оказывают сильное влияние на погрешности оптической термометрии.

Полученные результаты также показывают, что определяющие качество металлопродукции окислительно-восстановительные процессы в системе «металл-футеровка-шлак-атмосфера», в том числе основная металлургическая реакция взаимодействия углерода расплава с кремнеземом, качественно и количественно зависят не только от комплекса температурно-временных параметров, но и от интенсивности перемешивания чугуна в кварцевом тигле. Причем влияние перемешивания на интенсивность основной реакции в сторону восстановления кремния из кремнезема резко усиливается в области высоких температур. Температура здесь является условием необходимым, но недостаточным. После устранения вынужденной конвекции оставшейся свободной конвекции явно не хватает для поддержания реакции на прежнем высоком уровне и ее интенсивность скачкообразно падает даже при высоких температурах. Следовательно, основанные на таких окислительно-восстановительных процессах технологические приемы обработки жидкого металла, в том числе термовременная обработка, должны

регламентроваться как температурно-временными режимами, так и режимами перемешивания расплава (швс, швс, жмв, жлф, жлф). Состав сопутствующей газовой среды, и особенно по содержанию CO_2 и O_2 , имеет высокую степень тесноты корреляции с окислительно-восстановительными процессами и в системе «металл-футеровка-шлак-атмосфера». Поэтому эти процессы и основанные на них технологические приемы обработки расплавов можно контролировать косвенно, по составу среды [5-9].

Таким образом, состав сопутствующей газовой промежуточной среды определяется, в основном, температурой и перемешиванием жидкого чугуна. При вынужденной конвекции и нагреве расплава выше равновесных температур содержание CO_2 увеличивается от 0,04 до 4,50 %

(в 114 раз), а O_2 – уменьшается от 20,7 до 17,0 %. После прекращения вынужденной конвекции состав скачком возвращается к исходному при любой температуре. Такие изменения содержания CO_2 значительно повышают методические погрешности бесконтактной, в том числе инфракрасной, пирометрии излучения и должны учитываться при разработке методов оптической термометрии металлических расплавов. Эффективность технологических процессов обработки жидкого чугуна, основанных на восстановлении кремния из кремнезема углеродом расплава, необходимо связывать как с температурой перегрева, так и с интенсивностью перемешивания расплава. Высокая степень тесноты корреляции содержания CO_2 и O_2 с окислительно-восстановительными процессами обеспечивает косвенный по составу газовой среды контроль режимов обработки жидкого металла.



ЛИТЕРАТУРА

1. Nuffer Gene D. Radialion fhemomefru / Mech. Eng. – 1972. – Vol. 94, № 6. – P. 8-15.
2. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио, 1978. – 399 с.
3. Чугунный Е. Г., Жуков Л. Ф. Автоматический контроль температуры жидкого чугуна в литейном производстве. – Киев: Наук. думка, 1978. – 170 с.
4. Ollsen W., Reuch K., Orfhs K. Archw fur das Eisenhuffenwessn. – 1955. – 260. – II. – P. 1-13.
5. Шумихин В. С., Лузан П. П., Жельнис М. В. Синтетический чугун. – Киев: Наук. думка, 1971. – 156 с.
6. Шумихин В. С., Билецкий А. К. Физико-химические процессы электроплавки чугуна. – Киев: Наук. думка, 1989. – 168 с.
7. Плавка синтетического чугуна в индукционных печах и ее технология на Каунасском литейном заводе «Центролит» / М. В. Жельнис, Н. Г. Гиршович, А. Д. Качан и др. – Вильнюс: Минтис, 1974. – 296 с.
8. А.с. 543680 СССР, МКИ G 01 K 1/14. Способ выплавки синтетического чугуна / В. С. Шумихин, Е. Г. Чугунный, Л. Ф. Жуков – Опубл. 22.06.77, Бюл. № 3.
9. А.с. 552597 СССР, МКИЗ G 01j 5/02. Устройство для управления температурным режимом индукционной печи / Е. Г. Чугунный, В. А. Ефимов, Л. Ф. Жуков и др. – Опубл. 30.10.77, Бюл. № 12.

Summary

L. F. Zhukov

Influence of the liquid cast iron temperature and mixing on the accessory gas medium chemical composition

They have experimentally determine intense influence of the liquid cast iron temperature and mixing on the accessory gas medium chemical composition in the induction furnaces. During heating and following overheating liquid cast iron in the quartzit crucible above than thermodynamic equilibrium temperature of the main metallurgical reaction CO_2 and O_2 content is changing accordingly from 0,04 to 4,50 % (114 times) and from 20,7 to 17,0 %. The composition is coming back to starting state by sudden change after forced convection stopping in any temperature. These findings can be used for technological processes development of the liquid cast iron processing, for example thermal time processing and for technological processes monitoring and control, including for contactless optical temperature control

Анотація

Л. Ф. Жуков

Влиw температури та перемішування рідкого чавуну на склад супутнього газового середовища

Експериментально встановлено значний комплексний вплиw температури та перемішування рідкого чавуну на склад супутнього газового середовища в індукційних печах. При нагріванні та подальшому перегріві розплав у кварцитовому тиглі вище температури термодинамічної рівноваги основної металургійної реакції вміст CO_2 та O_2 , змінюється відповідно від 0,04 до 4,50 % (у 114 разів) та від 20,7 до 17,0 %. Після зупинення вимушеної конвекції склад скачком повертається до вихідного при будь-якій температурі. Одержані результати рекомендовані до використання як при розробці технологічних процесів обробки рідкого чавуну, наприклад термочасовій обробці, так і для їх контролю, в тому числі безконтактного оптичного термоконтролю

УДК 621.771.07

В. А. Николаев (Запорожская государственная инженерная академия)

Напряжение при волочении полос в неприводных валках

Для расчета напряжений (усилий) волочения в монолитных волоках используют известные выражения, приведенные в работах [1-3 и др.]. Закономерности воздействия на условия деформации и на напряженное состояние металла в неприводных валках (роликах) имеют существенные отличия [1, 4-6]. При волочении в неприводных валках (прокатка-волочение – ПВ) существенно снижается влияние контактных касательных напряжений и изменяется кинематика продольного течения металла в очаге деформации. За счет возникновения значительных продольных растягивающих напряжений в процессе ПВ опережение и угол критического сечения существенно больше, чем в классическом процессе прокатки в приводных валках. Уменьшаются продольные подпирющие напряжения σ_3 в очаге деформации в результате действия растягивающих напряжений от усилия волочения полосы. В работе [7] теоретически и практически показана целесообразность установки клетки с неприводными валками в линии непрерывного сортового стана. Наличие клетки с неприводными валками, в которой полоса протягивается валками предыдущей клетки, в зависимости от условий прокатки позволяет сократить потребляемую мощность прокатки на 6,5-43,7 %. В работе [4] на основании энергетического метода получены теоретические зависимости напряжения волочения (протягивания) в неприводных роликах, учитывающие влияние основных технологических параметров. В упрощенном виде для практического использования рекомендуются следующие выражения для расчета напряжений:

$$\frac{\sigma_b}{2\tau_s} = (\ln \lambda + \alpha / 2) \left[1 + \frac{f}{\alpha} (2m - 1) \right]; \quad (1)$$

$$\frac{p_{cp}}{2\tau_s} = (\ln \lambda + \alpha / 2) / (\lambda - 1); \quad (2)$$

$$m = 0,5 \left(1 + \frac{f_{ш}}{f} \cdot \frac{r}{R} \right), \quad (3)$$

где σ_b – напряжение волочения; p_{cp} – среднее нормальное контактное напряжение; τ_s – напряжение

Теоретическими исследованиями установлено, что в процессе прокатка-волочение (ПВ) снижение влияния внешнего трения в очаге деформации обеспечивает уменьшение усилия прокатки. Процесс ПВ может быть использован при $\sigma_b / \sigma_r < 0,5$

сдвига металла; λ – коэффициент высотной деформации; α – угол контакта; f – коэффициент трения в очаге деформации; $f_{ш}$ – коэффициент трения в шейках валков; r – радиус шейки; R – радиус валка.

Выражения (1) и (2) мало отличаются от приведенных более точных выражений. Авторы [4] отмечают, что при $f = 0,1$ и увеличении коэффициента λ от 1,1 до 2,2 параметр $\sigma_b / 2\tau_s$ возрастает от 0,75 до 1,0, а параметр $p_{cp} / 2\tau_s$ уменьшается от 1,5 до 0,8, которые адекватны экспериментальным данным. Из выражения (1) также следует, что коэффициент трения не влияет на напряжения σ_b при $m = 0,5$ и мало влияет при $m > 0,5$ ($m = 0,6-0,7$).

Принимая во внимание незначительное влияние коэффициента трения определим напряжение волочения в неприводных валках из условия равновесия горизонтальных составляющих сил, действующих на очаг деформации:

$$P_x - T_{x1} + T_{x2} - \frac{T_b}{2} = 0, \quad (4)$$

где T_{x1} , T_{x2} – горизонтальные составляющие сил трения соответственно в зонах отставания и опережения; P_x – горизонтальная составляющая равнодействующей усилия деформации; T_b – усилие волочения в неприводных валках.

Равнодействующие указанных сил при равномерном распределении соответствующих напряжений расположены в средней точке длины каждой зоны. Решаем выражение (4) в напряжениях, принимая закон трения Амонтона $T = fP$ (где P и T – нормальное усилие и сила трения), и получаем для одного валка (ширина полосы $B = l$)

$$p_{cp} l_d \frac{\alpha}{2} - p_{cp} f (l_d - l_\gamma) + p_{cp} f l_\gamma = T_b / 2, \quad (5)$$

где p_{cp} – среднее нормальное контактное напряжение; l_d – длина дуги контакта; l_γ – длина зоны опережения; f – коэффициент трения.