

УДК 621.7.014

**ФОРМИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
НАМОРОЖЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДВУХВАЛКОВОМ
МЕТОДЕ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ РАСПЛАВА****М. Н. ВЕРЕЩАГИН, Н. М. ЗАПУСКАЛОВ, И. В. АГУНОВИЧ***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь***Введение**

В настоящее время в ряде стран большое внимание уделяется методу двухвалковой быстрой закалки из расплава для производства лент с неравновесной структурой, что связано с упрощенной схемой ее производства, а также сокращением энергетических и экономических затрат.

Процесс быстрой закалки расплава значительно улучшает структуру, качество и физико-механические свойства металлов и сплавов. Разработка метода двухвалковой закалки расплавленного металла была вызвана стремлением повысить скорость охлаждения при изготовлении ленты в диапазоне толщин 0,065–1,4 мм. Такой диапазон толщины ленты связан, с одной стороны, с ограничением возможности достижения высокой, порядка 10^4 – 10^5 °C/с, скорости охлаждения остывающего в створе валков металла за счет интенсивного теплоотвода, что ограничивает верхний предел. С другой стороны, при малой толщине и значительном отношении площади поверхности контакта ленты с валком к его объему более резко ухудшается качество изделий. Сюда же присоединяются возрастающие требования к качеству получаемых лент, что включает в себя точность их геометрических размеров и формы, показатели качества отделки поверхности, а также физико-механические и служебные свойства металлов и сплавов.

Целью данной работы является исследование формирования контактной поверхности ленты при двухвалковом методе быстрой закалки расплава.

Постановка задачи

Контактная поверхность валка и ленты в процессе двухвалковой быстрой закалки расплава представляет весьма сложную систему, геометрия и структура которых зависят от целого ряда факторов. В процессе взаимодействия наможенного металла с поверхностью валка-кристаллизатора и последующей его прокатки происходит изменение их геометрических и структурных параметров. Молекулярно-гладкая поверхность расплава под действием поверхностного натяжения, вследствие зарождения центров кристаллизации, фазовых превращений при кристаллизации, роста кристаллов и их взаимного взаимодействия, а также их взаимодействия с расплавом, который не успел закристаллизоваться, претерпевает кардинальное изменение и становится рельефной, шероховатой. Изменение топографии поверхности ленты во времени в дальнейшем обуславливается ее взаимодействием с шероховатой поверхностью валка-кристаллизатора при последующей прокатке. В этом случае шероховатость ленты определяется шероховатостью поверхности валков и коэффициентом отпечатываемости, при этом поверхность валка подвержена явлению износа вследствие наличия эффекта опережения при прокатке, а также фазовыми превращениями в металле ленты, которые могут протекать при охлаждении. При увеличении шероховатости валка, соизмеримой с шероховатостью поверхности рельефа дендритов, шероховатость валка начинает отпечатываться на поверхности ленты. При взаимодействии реальных поверхностей последние характеризуются погрешностью формы и шероховатостью. Последняя

образуется на валке при обработке его поверхности с периодическим взаимодействием абразивного круга различной зернистости. Причем к источникам шероховатости первого порядка относится инструмент, характер относительного движения и пр. Разнородность свойств кристаллитов, наличие или образование различных фаз и включений создают шероховатость различных порядков.

Как отмечается в работе [1], атомно-молекулярное строение вещества предопределяет возникновение определенного вида шероховатости – кристаллографической шероховатости. Несовпадение кристаллографических плоскостей с номинальной поверхностью тела дает сильно- и малоразориентированные поверхности, которые требуют больших давлений при сближении тел.

На площадках фактического контакта при взаимодействии шероховатых поверхностей развиваются высокие удельные давления, которые приводят к их взаимному внедрению и сдвигу неровностей в зависимости от прочностных характеристик материалов.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости влияния шероховатости валка на шероховатость ленты и коэффициент отпечатываемости валка на ленте.

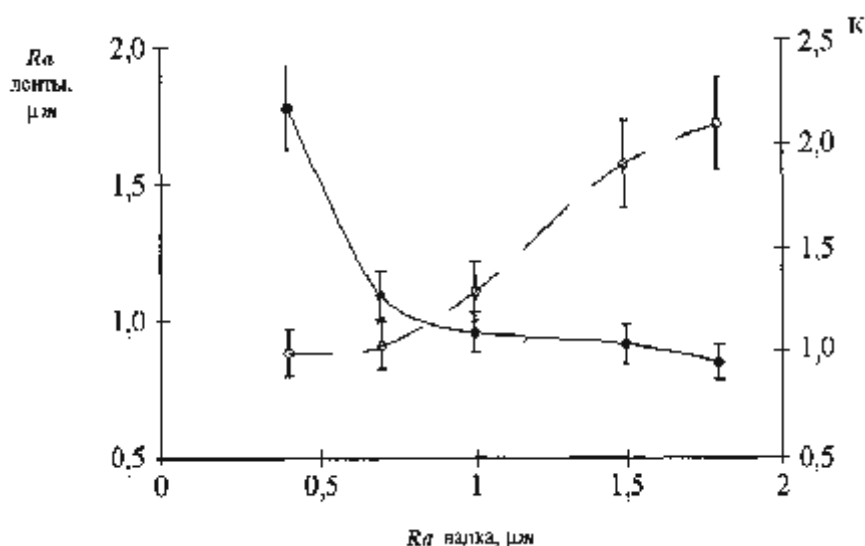


Рис. 1. Влияние шероховатости валка на шероховатость ленты и коэффициент отпечатываемости валка на ленте

Здесь $K = Ra_{\text{в}}/Ra_{\text{л}}$ – коэффициент отпечатываемости, где $Ra_{\text{в}}, Ra_{\text{л}}$ – шероховатость валка и ленты соответственно.

Можно видеть, что с ростом Ra валка ($Ra_{\text{в}}$) коэффициент K увеличивается. С увеличением удельного давления шероховатость ленты уменьшается и приближается к шероховатости валка (рис. 2).

Данный эффект связан с наличием шероховатости ленты, созданной дендритами. При шероховатости валка, соизмеримой с шероховатостью поверхности рельефа дендритов, шероховатость валка начинает отпечатываться на поверхности ленты.

В процессе взаимодействия шероховатых поверхностей твердых тел происходит истечение замороженного металла в сужающиеся щели между гребешками шероховатостей. На рис. 3 представлена схема вдавливания шероховатой поверхности валка в замороженную корку металла, причем два уровня нагрузки σ_{n1}, σ_{n2} показывают распределение напряжений на начальной и конечной стадии внедрения соответственно.

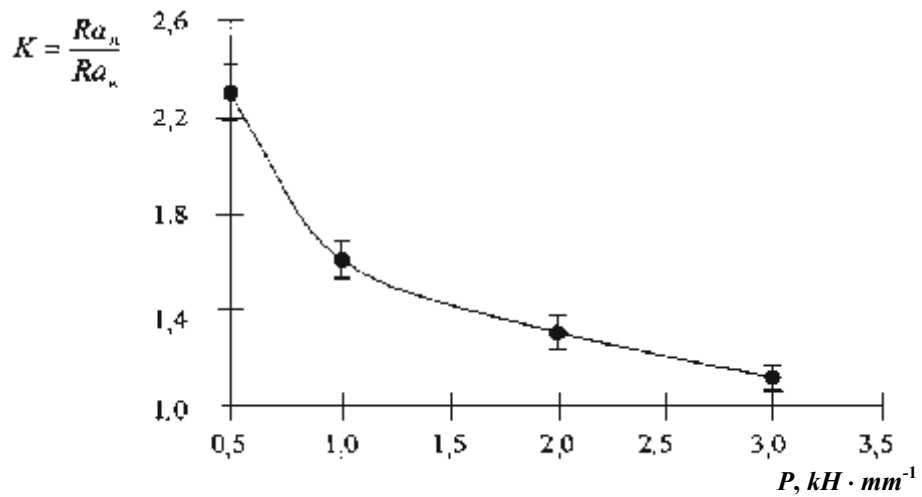


Рис. 2. Зависимость коэффициента отпечатываемости валка на ленте от давления при постоянной шероховатости

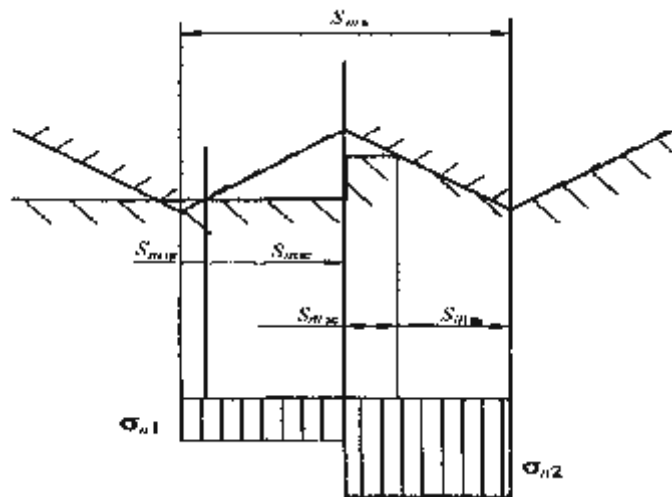


Рис. 3. Вдавливание шероховатой поверхности валка в замороженную корку металла

Ширина щели определяется средним расстоянием между микровыступами Sm_0 . Величина Sm_c – ширина свободной поверхности металла, которая изменяется от начального значения $Sm_{1н}$ до конечного $Sm_{2к}$. Здесь $Sm_{1н}$ и $Sm_{2к}$ – поверхность контакта на начальной и конечной стадии нагружения. В соответствии с работой [2] нормальное для истечения металла напряжение равно

$$\sigma_n = \beta \sigma_s \ln \frac{Sm_0}{Sm_0 - Sm_{2н}}, \quad (1)$$

где σ_s – предел текучести металла; β – коэффициент Лодэ.

В случае плоской задачи $\beta \sigma_s = 1,15 \sigma_s = 2K$. Здесь K – сопротивление сдвигу замороженного металла.

Величину нормального напряжения при истечении замороженного металла в плоскую щель найдем следующим образом. Пусть усилие сжатия валков при прокатке равно P . Тогда усилие, приходящееся на одну щель, составляет $P_m = \frac{P}{L_b}$, где L_b – длина бочки валка-кристаллизатора. Номинальная площадь контакта при сжатии металла валками при истечении его в щель, определяется как $F_{н_m} = Sm_0 R \phi_2$, где R – радиус валка; ϕ_2 – угол,

соответствующий концу процесса кристаллизации расплава и началу его прокатки. Угол φ_2 определяется из соотношения [3]:

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{y_2}{(R + \mathcal{K})}, \quad (2)$$

где y_2 – абсцисса конца зоны затвердевания; \mathcal{K} – половина толщины корки замороженного металла.

Абсцисса конца зоны затвердевания находится из выражения [3]:

$$y_2 = \sqrt{\left[\frac{1}{2B_2(\varpi + 1)} \arcsin\left(\frac{y_1}{R}\right) + R \right]^2 - R^2}, \quad (3)$$

где ϖ – угловая скорость валков; y_1 – абсцисса конца зоны отвода тепла перегрева; B_2 – коэффициент, зависящий от теплофизических свойств расплава и условий теплообмена.

Координата y_1 конца зоны отвода тепла перегрева найдена ранее [3] и равна

$$y_1 = R \sin \left[\frac{C_p \rho + (R, y_0) \varpi}{2\alpha} \ln \frac{T_{кр} - T_0}{T_1 - T_0} + \arcsin \frac{y_0}{R} \right], \quad (4)$$

где $f(R, y_0) = 2R \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{y_0}{R}\right)^2} \right] + 1$; y_0 – координата зеркала расплава; α – коэффициент теплопередачи между расплавом и валком; C_p, ρ – удельная теплоемкость и плотность расплава; $T_{кр}, T_1, T_0$ – температура кристаллизации металла, температура металла в момент заливки и температура вала кристаллизатора соответственно.

Величина коэффициента B_2 находится из выражения [3]:

$$B_2 = \frac{C_{p1} \rho_1}{2\lambda_1 n} \left(L + \frac{1}{n+1} \right), \quad (5)$$

где $C_{p1}, \rho_1, \lambda_1$ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности замороженного металла соответственно; n – безразмерный параметр, зависящий от свойств расплава и имеющий смысл показателя степени для кривой распределения температуры в затвердевшей корке; $L = \frac{q}{C_{p1}(T_{кр} - T_0)}$; q – удельная теплота кристаллизации металла.

Таким образом, номинальная площадь контакта при прокатке замороженного металла при его истечении в щель с учетом вышесказанного определяется следующим образом:

$$F_{H_m} = S m_0 R \arcsin \left\{ \frac{1}{R + \mathcal{K}} \sqrt{\left[\frac{1}{2B_2(\varpi + 1)} \arcsin \frac{y_1}{R} + R \right]^2 - R^2} \right\}, \quad (6)$$

где $\mathcal{K} = \frac{h_k + \Delta h}{2}$ – половина толщины корки замороженного металла; h_k – конечная толщина получаемой ленты; Δh – величина абсолютного обжатия замороженной корки металла [3].

$$\Delta h = \frac{\left[\frac{1}{2B(\varpi + 1)} \arcsin\left(\frac{y_1}{R}\right) + R \right]^2 - R^2}{R}. \quad (7)$$

Окончательно, для одной щели при истечении в нее намороженного металла при прокатке величина нормального напряжения равна

$$\sigma_n = \frac{P}{F_{H_m} L_b}. \quad (8)$$

Величина F_{H_m} находится из выражения (6).
Из уравнения (1) следует, что

$$\frac{Sm_{2н}}{Sm_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_n}{2K}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{P}{2KF_{H_m} L_b}\right). \quad (9)$$

Отсюда поверхность контакта на конечной стадии нагружения металла при его истечении в плоскую щель, образованную гребешками шероховатости, равна

$$Sm_{2н} = Sm_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{P}{F_{H_m} 2KL_b}\right)\right). \quad (10)$$

Анализ выражений (6)–(10) показывает, что в изотермических условиях деформирования на начальных ее стадиях, сила трения не может достичь максимального значения из-за отсутствия сплошного контакта на поверхности соприкосновения.

При $\frac{P}{F_{H_m} 2KL_b} \rightarrow \infty$ контактная поверхность стремится к насыщению, т. е. $Sm_{2н}/Sm_0 \rightarrow 1$.

На рис. 4, 5 показаны расчетные зависимости контакта намороженного металла $Sm_{2н}$ на конечной стадии его нагружения при истечении металла в плоскую щель, образованную гребешками шероховатости от усилия сжатия валков-кристаллизаторов при заданных технологических параметрах.

Можно видеть, что усилие сжатия ведет при прочих равных условиях к росту величины $Sm_{2н}$. Кроме того, следует отметить, что на величину $Sm_{2н}$ и F_{H_m} сильное влияние оказывает шероховатость валка Sm_0 (выражения (6) и (10)). С уменьшением Sm_0 данные величины стремятся к номинальной, что говорит о необходимости тщательной подготовки поверхности валков для осуществления процесса двухвалковой быстрой заковки расплава при получении качественной тонкой полосы.

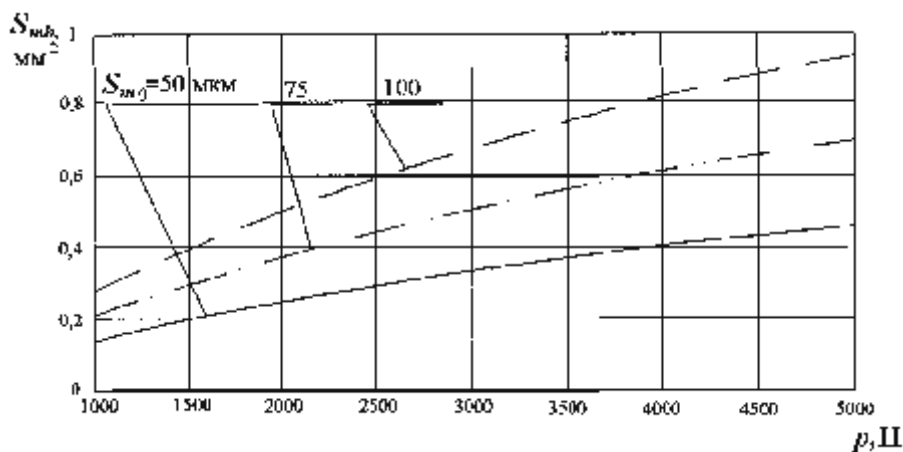


Рис. 4. Влияние усилия сжатия валков P на фактическую площадь контакта $Sm_{2н}$:
радиус валка $R = 200$ мм; скорость прокатки $V = 3$ м/с; температура перегрева $T_{пер} = 30$ °С;

сопротивление деформации металла $\sigma_s = 280$ МПа;

S_{m0} – начальная шероховатость поверхности валка

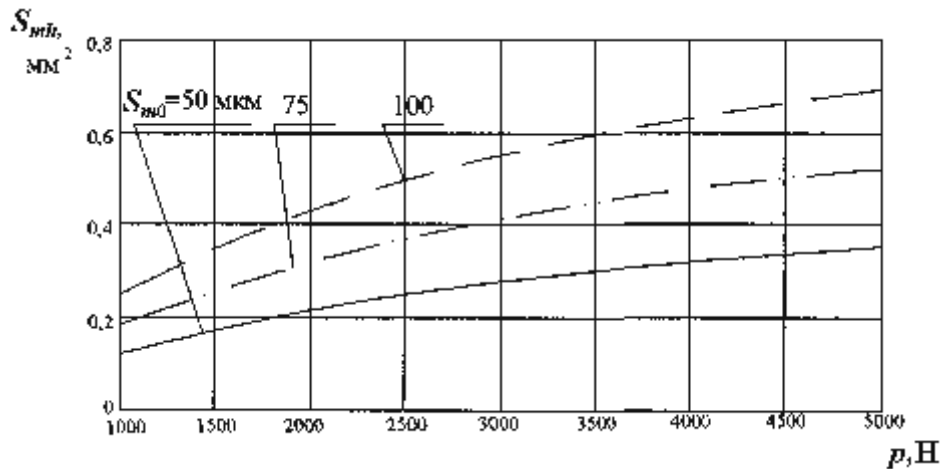


Рис. 5. Влияние усилия сжатия валков P на фактическую площадь контакта S_{mh} :
радиус валка $R = 200$ мм; скорость прокатки $V = 4$ м/с; температура перегрева $T_{пер} = 30$ °С;
сопротивление деформации металла $\sigma_s = 280$ МПа;
 S_{m0} – начальная шероховатость поверхности валка

Заключение

Молекулярно-гладкая поверхность при двухвалковой быстрой закалке расплава претерпевает кардинальное изменение и становится рельефной, шероховатой, причем шероховатость ленты определяется шероховатостью валков и коэффициентом отпечатываемости. В процессе взаимодействия шероховатых твердых тел (лента, валок) происходит истечение намороженного металла в сужающиеся щели между гребешками шероховатости валка, поэтому при изготовлении ленты методом двухвалковой закалки расплава необходимо тщательно вести подготовку поверхности валков путем уменьшения его шероховатости.

Литература

1. Макушок, Е. М. Массоперенос в процессах трения / Е. М. Макушок, Т. В. Калиновская, А. В. Белый. – Минск : Наука и техника, 1978. – 272 с.
2. Зибель, Э. Обработка металлов в пластическом состоянии / Э. Зибель. – Москва : ОНТИ, 1954.
3. Верещагин, Л. Н. Анализ процесса затвердевания металла при двухвалковой закалке расплава / Л. Н. Верещагин // Вес. Нац. акад. наук Рэсп. Беларусь. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1994. – № 2. – С. 47–52.

Получено 06.04.2007 г.