

УДК 621.7.014

ИЗНОС И ДЕФОРМАЦИЯ ВАЛКОВ И ЛЕНТЫ В ПРОЦЕССЕ РАЗЛИВКИ-ПРОКАТКИ МЕТАЛЛА ПРИ ДВУХВАЛКОВОЙ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКЕ РАСПЛАВА

М. Н. ВЕРЕЩАГИН, Н. М. ЗАПУСКАЛОВ, И. В. АГУНОВИЧ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Преимущества, которые дает процесс двухвалковой быстрой закалки расплава, сами по себе не гарантируют конкурентоспособное превосходство в производстве ленты, если она не имеет соизмеримого соотношения цены и качества. Эффективность данного процесса и качество литой ленты в значительной степени зависят от топографии поверхности валка и ее стабильности. Поверхностная топография валка является важнейшим фактором в формировании качества ленты, так как она влияет на теплопередачу в объеме бандажа [1], влияет на металлографическую структуру литой ленты [2], определяет поверхностную шероховатость, вызывает неоднородность охлаждения, которое приводит к возникновению поверхностных трещин [3]. Чтобы гарантировать необходимое качество быстрозакаленной ленты, необходимо определить механизм износа и деформации поверхности валков и ленты в процессе разливки-прокатки металла при двухвалковой быстрой закалке расплава.

Целью данной работы является исследование изнашивания и деформации поверхности валков и ленты в процессе разливки-прокатки металла при двухвалковой быстрой закалке расплава.

Постановка задачи

Контактная поверхность валка и ленты в процессе двухвалковой быстрой закалки расплава представляет сложную систему, геометрия и структура которых зависят от целого ряда факторов. В процессе взаимодействия намерзшего 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 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, который представляет собой отношение шероховатости ленты к шероховатости валка. При этом поверхность валка подвержена явлению износа вследствие наличия эффекта опережения, а также фазовыми превращениями в металле ленты, которые могут протекать при охлаждении [4].

Поверхностная топография валька-кристаллизатора, шероховатость литой ленты, их механические свойства и адгезионная совместимость определяют характер фрикционных связей взаимодействующих тел, при этом фактическая площадь касания может быть оценена с помощью кривой опорной поверхности. Для того, чтобы учесть нарастание поверхности в процессе прокатки намороженной корки металла, относительная фактическая поверхность контакта может быть представлена в виде [5]:

$$F_i = 1 - \sin^n \left[\frac{\pi}{2} (1 - \delta_i) \right], \text{ м}^2, \quad (1)$$

где δ_i – относительное сближение поверхностей, м; n – параметр опорной поверхности.

По мере сближения за счет смещенных объемов опорная поверхность F_i получает приращение ΔF_i и новое геометрическое место точек опорной поверхности с учетом смятия гребешков [5]. Реальный контакт твердых тел от начала соприкосновения по вершинам шероховатости до насыщения контактной поверхности при $F_i \rightarrow 1$ составляет некоторую часть h_{\max} в соответствии с выражением (1). При этом процессы изнашивания и деформации, протекающие при трении, проявляются в наростообразовании, разрушении и пластическом смятии вершин гребешков, пластическом царапании поверхности валька и др.

В случае сопряжения двух различных металлов площадь фактического контакта определяется свойствами более мягкого тела и геометрией поверхности более твердого тела. Процесс трения оказывает влияние на топографию поверхности взаимодействующих тел, при этом пластическая деформация намороженного металла развивается по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям, причем образующаяся текстура деформации приводит к трансформации шероховатости за счет формоизменения и разрушения вещества, а также поворота кристаллографических плоскостей.

Результаты исследований и их обсуждение

Расплав подается в межвальковое пространство двух вращающихся водоохлаждаемых валков. Принимаем, что скорость подачи расплава и скорость вращения валков-кристаллизаторов в процессе прокатки постоянны, при этом верхний уровень расплава занимает некоторое установившееся положение, соответствующее координате y_0 (рис.1). Данная координата y_0 существенно влияет на расположение границ областей y_1 , y_2 и y_3 , и тем самым определяет режим процесса затвердевания металла в валках и его последующей прокатки [6]. Конец зоны отвода тепла перегрева соответствует температуре кристаллизации $T_{\text{кр}}$ расплава и находится из выражения [8]:

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

где R – радиус валька, м; C_p , ρ – удельная теплоемкость и плотность расплава соответственно, кг/м³; α – коэффициент теплопередачи между расплавом и вальком; δ – толщина слоя расплава, м; q – объем металла, поступающего в межвальковое пространство за единицу времени, м³; T_0 , T_1 – температура валька и металла в момент заливки соответственно, °С.

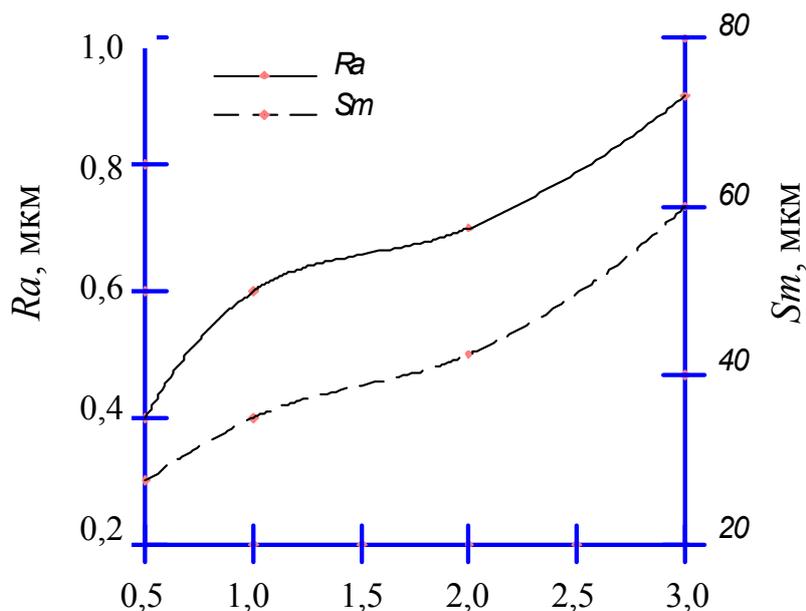


Рис. 2. Сила сжатия валков, кН/мм

Оплавление микропиков начальной шероховатости поверхности валка уменьшает тепловую нагрузку на микропики за счет увеличения их объема и, как результат, уменьшает вероятность дальнейшего их сплавления. Вероятно, что перераспределение поверхностной топографии в более гладкий профиль, получаемый в начале процесса быстрой закалки, приводит к замедлению изменения шероховатости поверхности валка в течение дальнейшей прокатки [9].

Основной задачей в области затвердевания (кристаллизации) является нахождение координаты y_2 , определяющей конец процесса кристаллизации и начало зоны деформации. Решение уравнения теплового баланса для некоторого объема намораживаемой корки позволяет определить значение абсциссы конца зоны затвердевания y_2 [6]:

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

где w – угловая скорость валков; B_2 – коэффициент, зависящий от теплофизических свойств расплава и условий теплообмена.

В процессе увеличения толщины намораживаемой корочки δ (см. рис. 1) возникают термические напряжения, вызывающие отрыв последней от поверхности валка и появлению термических трещин (рис. 3) [10], [11]. Причиной напряжения являются охлаждение и температурное сжатие корочки по мере ее роста при одновременном нагреве и тепловом расширении поверхности валка. Глубина трещин на поверхности ленты в среднем составляет 10 мкм [11], и они имеют преимущественно продольную ориентировку, так как ширина образующейся корочки на несколько порядков больше ее длины. Микронеровности на поверхности валка приводят к неодинаковым зазорам между поверхностью валка и корочкой. Имеющее место различие в теплоотводе создает разницу скоростей роста кристаллов.

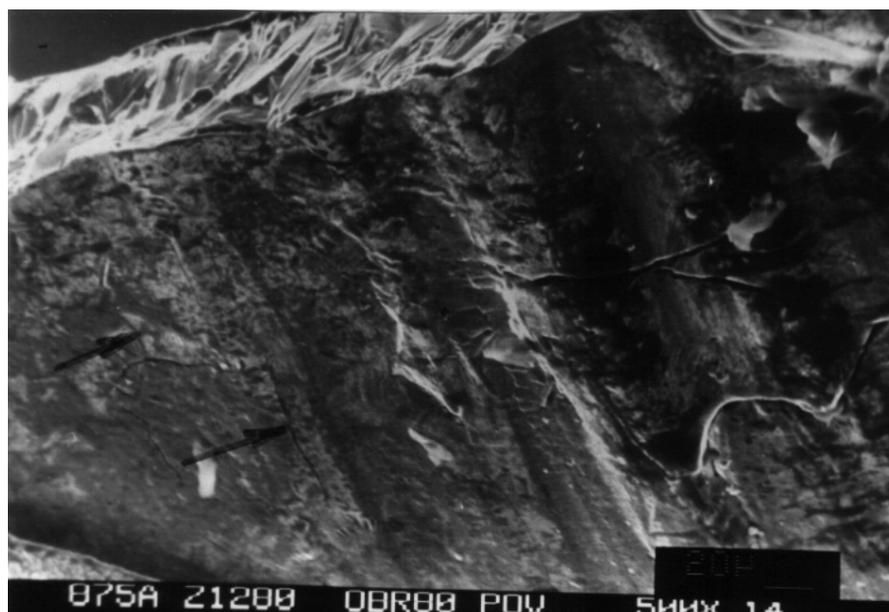


Рис. 3. Продольная трещина на поверхности ленты (поперечный излом)

Излом поперечного сечения ленты по толщине в зоне контакта корочки с поверхностью валков представлен на рис. 4, а.

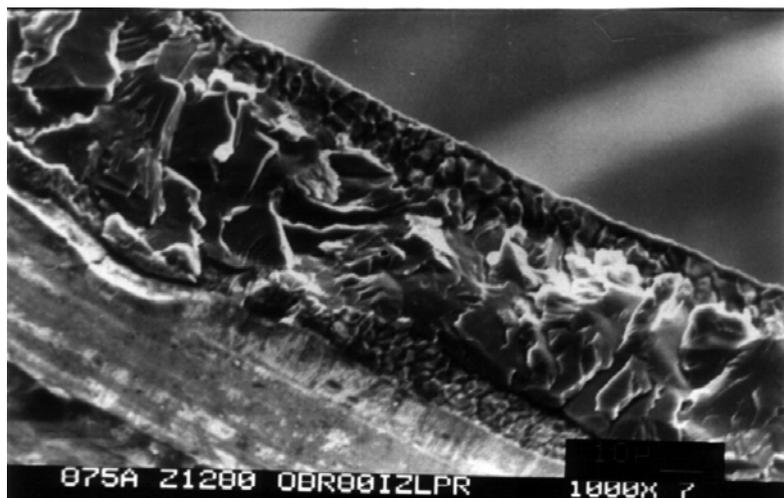
Поверхностная зона, которая непосредственно прилегает к поверхности валка, состоит из столбчатых кристаллов тонкого строения и расположенных перпендикулярно поверхности ленты. Средняя зона поперечного сечения ленты состоит из неориентированных кристаллов, которая при изменении режимов быстрой закалки сужается, а в отдельных местах может совсем исчезать (рис. 4, б). В местах отрыва корочки от поверхности валка кристаллы растут от поверхности ленты к ее середине в виде «пучков», причем угол наклона продольных осей последних относительно нормали к поверхности ленты может изменяться в пределах 0–90° (рис. 5). Кристаллы, растущие с большими отклонениями от нормали, значительно толще и короче по сравнению с кристаллами, главная ось которых имеет меньшее отклонение от главного направления роста.

Приложенное к валкам усилие устраняет зазор, образовавшийся из-за отслоения намораживаемой корочки металла, восстанавливая хорошие условия теплоотвода и иницируя процесс структурообразования и дальнейшего охлаждения сформированной ленты.

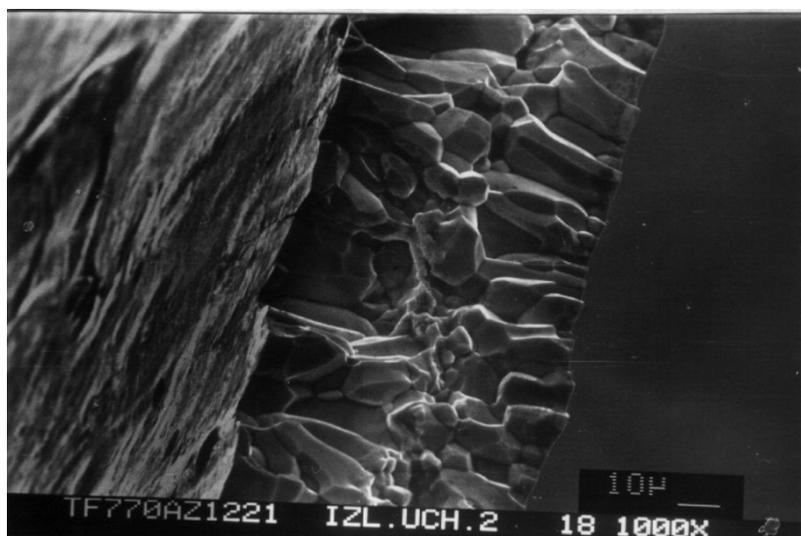
В зоне горячей прокатки сформировавшаяся после кристаллизации лента подвергается горячей деформации. С учетом соотношения (2) и зная, что $y_2 = \sqrt{R\Delta h}$, для данной зоны можно найти абсолютную деформацию замороженной корки металла:

$$\Delta h = \frac{y_2^2}{R} = \frac{\left[\frac{1}{2B(w+1)} \arcsin\left(\frac{y_1}{R}\right) + R \right]^2 - R^2}{R}, \text{ м.} \quad (4)$$

Металл начинает пластически деформироваться, когда давление достигает предельного напряжения текучести. Вследствие наличия двух зон в очаге деформации при прокатке – опережения и отставания – деформируемый металл с одной стороны будет перемещаться в противоположную сторону основного движения ленты в зоне отставания, а в зоне опережения – в направлении прокатки, причем в зоне отставания скорость движения металла ленты меньше линейной скорости поверхности валка, а в зоне опережения, наоборот, больше линейной скорости поверхности валка [12].



а)



б)

Рис. 4. Излом поперечного сечения ленты по толщине после двухвалковой закалки расплава

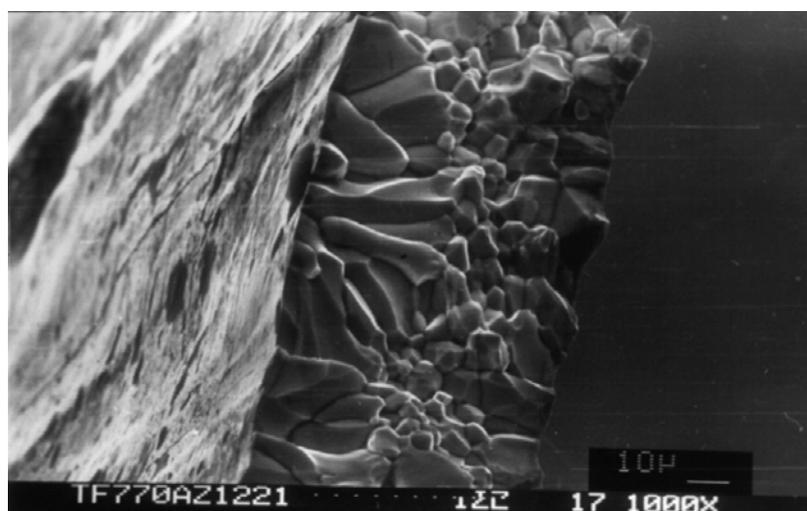


Рис. 5. Особенности роста кристаллитов при двухвалковой быстрой закалке расплава

В соответствии с выражением (1) по мере нарастания деформации за счет смещенных объемов опорная поверхность F_i в начале зоны деформации получает приращение ΔF_i и новое геометрическое место точек опорной поверхности, причем реальная область контакта между литой лентой и поверхностью вала определяется их шероховатой поверхностью, механическими свойствами металлов и силой сжатия валков [13]. Для локального очага контакта характерна не бесконечная протяженность, а некоторое соотношение размеров $a : b$, ориентированных вдоль и поперек направления действия силы трения. При этом нормальное сжимающее напряжение для каждой локальной малой области может быть представлено в виде:

$$\sigma_n = \sigma_{\text{пр}} \frac{a}{a+b} + \sigma_{\text{поп}} \frac{b}{a+b}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$, $\sigma_{\text{поп}}$ – нормальное напряжение по соответствующим направлениям.

В соответствии с теорией пластичности [14] при $\tau_k = \mu_\tau k$ выражение (5) запишется следующим образом [5]:

$$\sigma_n = \frac{k}{a+b} \left\{ (2 + \pi - 2\mu_\tau)a + \left[2 + \pi - \left(1 + \frac{\pi}{2}\right)\mu_\tau \right] b \right\}, \quad (6)$$

где μ_τ – коэффициент пластического трения; k – сопротивление сдвигу.

Уравнение (6) показывает, что несущая способность локального очага контакта зависит от коэффициента пластического трения.

Для истечения металла в сужающиеся щели между гребешками шероховатостей вала необходимо создать напряжение [4]:

$$\sigma_n = \beta \sigma_s \ln \frac{Sm_0}{Sm_0 - Sm_{2н}}, \quad (7)$$

где β – коэффициент влияния объемности схемы напряженного состояния (коэффициент Лодэ); σ_s – предел текучести наплавленного металла; Sm_0 , $Sm_{2н}$ – номинальная и фактическая площадь контакта на конечной стадии затекания металла соответственно.

В случае плоской задачи принимается $\beta \sigma_s = 1,15 \sigma_s = 2k$. Здесь k – сопротивление сдвигу наплавленного металла.

Из выражения (7) получим:

$$\frac{Sm_{2н}}{Sm_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_n}{2k}\right). \quad (8)$$

Среднее сдвигающее напряжение на контакте для максимальной силы трения записывается следующим образом:

$$\tau_k = k \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_n}{2k}\right) \right]. \quad (9)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой коэффициент пластического трения $\mu_\tau = \frac{\tau_k}{k}$.

Из уравнения (7) следует, что нормальное сжимающее напряжение зависит от силы трения и не может достигнуть максимума из-за невозможности полного механического контакта сопрягаемых поверхностей, т. е. $Sm_{2н} / Sm_0 < 1$.

Использование метода линий скольжения [5], [15], [16] позволяет записать выражение для приведенного (пластического) коэффициента трения двух шероховатых поверхностей для случая предельного трения на площадках фактического контакта:

$$\mu_\tau = \frac{\tau_k}{k} = \frac{\mu_c \sigma_n}{k} \leq n \text{ при } 0 \leq \frac{Sm_{2н}}{Sm_0} \leq n;$$

$$\mu_\tau = n + (1 - n) \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{\mu_c}{1 - n} \left(\frac{\sigma_n}{k} - \frac{n}{\mu_c} \right) \right] \right\} \text{ при } n < \frac{Sm_{2н}}{Sm_0} \leq 1, \quad (10)$$

где μ_c – коэффициент сухого трения контактирующих тел, $\mu_c = k / HB$, HB – твердость менее прочного материала пары; $n = 1 - Sm_c / Sm_0$; Sm_c – свободная площадь контакта.

Так как формирование поля поперечных деформаций в процессе трения связано с преимущественным сдвигом в направлении трения, когда $Sm_c / Sm_0 = 0,333$, то показатель $n = 0,666$.

Для продольных пятен касания $\mu_c = 1/\pi$, для поперечных – $\mu_c = 1/(1 + \pi/2)$. С учетом данных значений коэффициента сухого трения для локального очага контакта, имеющего размеры с отношением осей $a : b$, ориентированных вдоль направления действия силы трения по размеру a из соотношения (6) для предельной силы трения $\tau_k = k$, коэффициент трения μ_c в выражениях (10) записывается в виде [5]:

$$\mu_c = \frac{a + b}{\pi a + (1 + \pi/2)b}. \quad (11)$$

Вышесказанное обусловлено особенностями процесса деформации замороженного металла при двухвалковом методе быстрой закалки. Температурный градиент по толщине литой ленты приводит к неоднородности распределения напряжений течения металла между центральными и поверхностными слоями. Пластическая деформация по толщине ленты локализуется в центре вследствие более высокой температуры и более низкого сопротивления пластической деформации. Это приводит к выжиманию центральных слоев в направлении ванны расплава (рис. 6). Кроме того, при двухвалковом методе быстрой закалки имеет место большее уширение металла по сравнению с традиционным методом горячей прокатки, где лента деформируется по сечению более однородно и в большей степени в направлении прокатки [17]. Большое уширение от деформации ведет к уменьшению обратного потока течения металла на поверхности вала и позволяет уменьшить трение на ранних стадиях пластической деформации.

С ростом силы сжатия валков имеет место увеличение параметров ΔRa и ΔSm на поверхности вала (см. рис. 2). Это означает, что на конечную топографию шероховатости вала оказывают влияние как его начальная шероховатость, так и шероховатость получаемой ленты. Предполагается, что с увеличением давления вдоль зоны

деформации увеличивается теплопередача на контакте лента-полоса и, значит, увеличивается температура поверхности вала. На некоторой стадии процесса в зоне деформации это приводит к тому, что поверхность вала за счет разогрева становится более мягкой, чем лента.

Это приводит к тому, что лента начинает царапать поверхность вала. И наоборот, на ранних стадиях деформации в зоне опережения, когда различие в температуре валок-полоса таковы, что валок более твердый, чем лента, и имеет место царапание поверхности ленты.

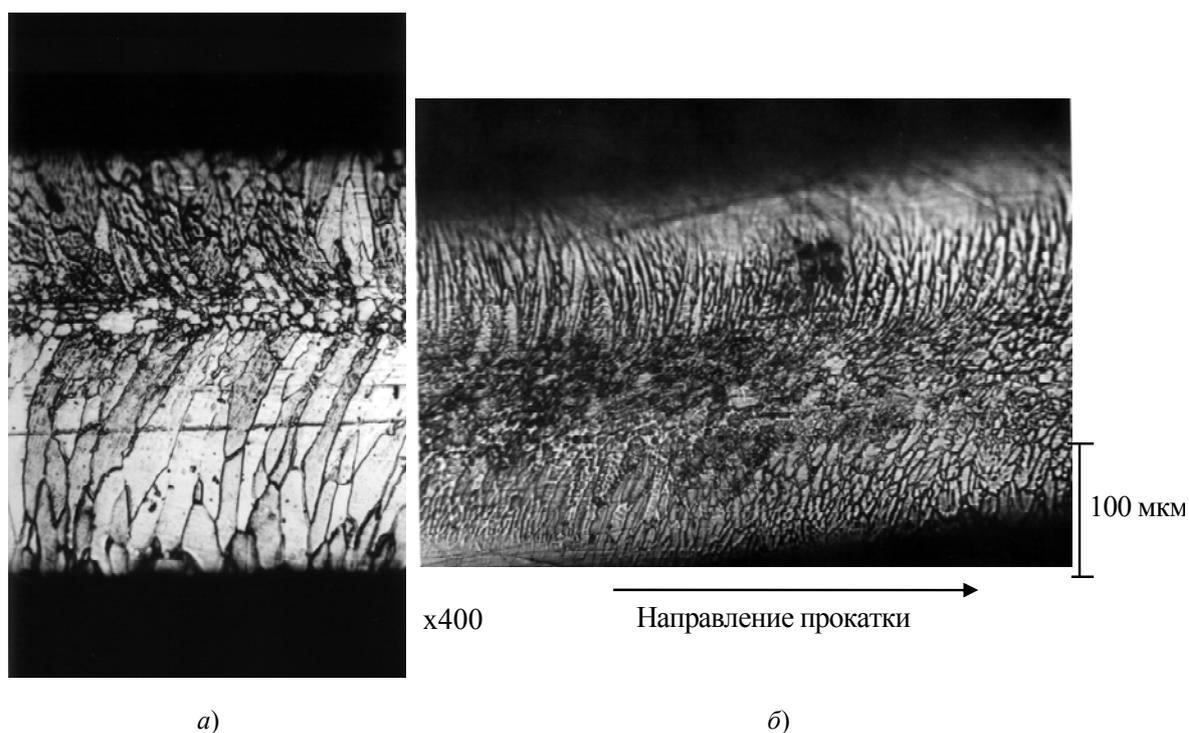


Рис. 6. Микроструктура литой ленты

Таким образом, при наличии зоны опережения в установившемся процессе прокатки механизм царапания поверхностью ленты относительно мягкой поверхности вала является более вероятным, что приводит к увеличению шероховатости вала. Это возникает вследствие различной их твердости. Микропик ленты вытесняет металл вала с образованием по его краям наплывов, при этом часть вытесняемого металла может превратиться в стружку, приводя к износу поверхности вала. Впервые физическая картина данного явления была описана в работе [18], [19].

На момент внедрения гребешка шероховатости ленты или металла вала под действием нормальной силы N на глубину H , а также приложения тангенциальной силы T , возникает скольжение вдоль образующей конуса вверх под действием силы \bar{t} (рис. 7). Для данного момента коэффициент трения $\mu = \bar{t}/\bar{n}$, где \bar{n} – нормальная составляющая равнодействующей R сил N и T . В некоторый момент времени выхода «гребешка» из кратера вдавленного металла вследствие действия силы T происходит разрушение слоя металла треугольного сечения глубиной h . С этого момента начинается процесс царапания. Сила T корреляционно связана с истинной прочностью металла на разрыв и не зависит от предварительного наклепа.

В процессе взаимодействия шероховатых поверхностей «гребешок» имеет острие с радиусом закругления r и при малых значениях H/r последний деформирует металл без отделения стружки за счет трения скольжения. Авторы работы [19] дока-

зали, что под действием возрастающей тангенциальной силы «гребешок» выходит из металла, причем вершина его движется не вдоль образующей гнезда внедрения, а по более пологой линии, и, достигнув меньшей глубины внедрения h , наносит царапину данной глубины без образования нароста.

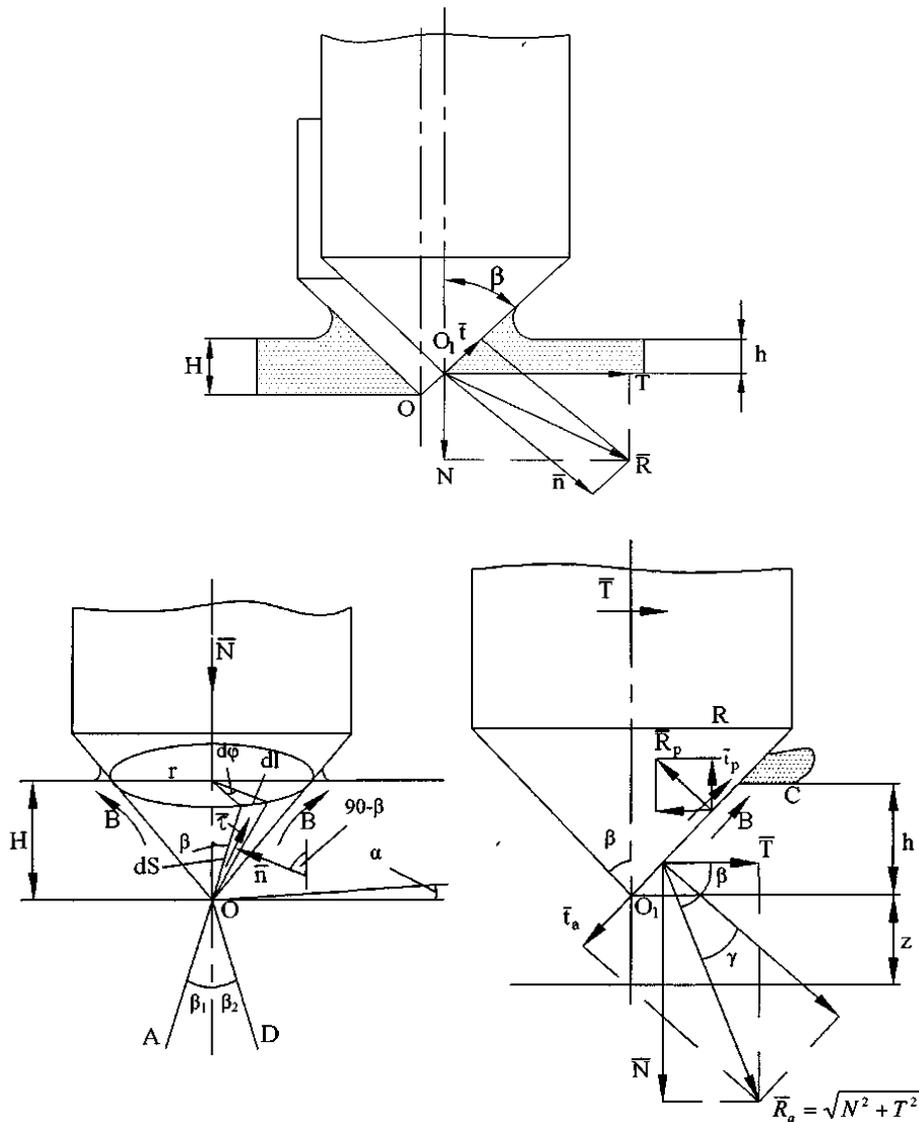


Рис. 7. Схема к анализу взаимодействия микропиков шероховатости ленты с поверхностью вала

Под действием нормальной силы N «гребешок» шероховатости с углом 2β внедряется в пластический металл. В результате внедрения на поверхности образуются наплывы. При глубине внедрения H радиус отпечатка равен r , а на элементарный элемент конической поверхности dS действует нормальное n и касательное τ напряжения. Условие равновесия данной совокупности сил может быть записано в виде:

$$N = \int \bar{n} \sin \beta dS + \int \bar{\tau} \cos \beta dS, \quad (12)$$

где

$$dS = rd\varphi / 2 \sin \beta; \quad dl = r d\varphi; \quad dS = r^2 d\varphi / 2 \sin \beta.$$

Учитывая, что $\tau = \mu l$, выражение (12) может быть записано в виде:

$$N = \frac{\pi r^2 n}{\sin \beta} (\sin \beta + \mu \cos \beta). \quad (13)$$

Здесь множитель перед скобками определяет совокупность нормальных сил, действующих на контактирующую поверхность «гребешка» шероховатости.

Глубина внедрения «гребешка» зависит от степени гладкости поверхности и определяется величиной трения их поверхности о вытесняемый металл [21]. По мере возрастания силы T по отношению к усилию N происходит смещение острия неровности из точки O в точку O_1 , когда начинается процесс царапания при глубине внедрения $h = H - z$, где z – величина подъема «гребешка» шероховатости из пластичного металла, причем острие движется при переднем угле $(\alpha + \beta)$. В процессе перемещения «гребешка» происходит вытеснение металла по стрелке B (см. рис. 6), которое создает реактивную силу трения $\overline{t_p}$ уменьшает силу $\overline{t_a}$, т. е. статическое трение переходит в кинетическое. Из рис. 6 следует, что $t_p = \mu Ra \cos \gamma$. За счет увеличения силы Ra и уменьшения угла γ имеет место увеличение силы R_p , что соответствует уменьшению коэффициента трения μ [20]. Отношение

$$T / N = \operatorname{ctg}(\beta + \gamma) = \frac{1 - \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \gamma}, \quad (14)$$

а $t_a = t_p$.

Из последнего равенства следует, что $\mu = \operatorname{tg} \gamma$. Таким образом, имеем:

$$T / N = \frac{1 - \mu \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + \mu} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{1 - \mu \frac{T}{N}}{\frac{T}{N} + \mu}. \quad (15)$$

Из последнего соотношения находим коэффициент трения μ :

$$\mu = \frac{1 - \operatorname{tg} \beta \left(\frac{T}{N} \right)}{\frac{T}{N} + \operatorname{tg} \beta}. \quad (16)$$

Здесь принимается, что $T/N < 1$. Это соответствует условию $\operatorname{tg} \alpha > \frac{1 - \mu}{1 + \mu}$, когда углы β достаточно большие.

В процессе образования наплывов с учетом коэффициента упрочнения металла n можно записать равенство несущих напряжений:

$$\frac{nN}{\pi r_0^2} = 2 \frac{N - t_p \cos \beta}{\pi r^2}, \quad (17)$$

где $r_0 = H \operatorname{tg} \beta$; $r = (H - z) \operatorname{tg} \beta$.

С учетом вышесказанного, величина подъема «гребешка» z на момент начала процесса царапания:

$$z = H \left(1 - \sqrt{\frac{2 \operatorname{tg} \beta}{n(\mu + \operatorname{tg} \beta)}} \right). \quad (18)$$

Всегда $z < H$, т. е. выражение в квадратных скобках изменяется в пределах $[0; 1]$. Откуда $n > \frac{2 \operatorname{tg} \beta}{(\mu + \operatorname{tg} \beta)}$. Учет сил трения, которые действуют на «гребешок» вследствие течения металла снизу вверх, объясняет подъем острия «гребешка» к поверхности металла. При этом имеет место уменьшение несущей площади контакта вследствие упрочнения металла при пластической деформации и реактивной силы трения t_p .

Заключение

Установлено, что в процессе разливки-прокатки металла при двухвалковой быстрой закалке расплава имеет место изнашивание и деформация поверхности валка. Это проявляется, с одной стороны, в выносе некоторого объема металла поверхности валка получаемой лентой вследствие оплавления микровыступов валка на стадии его контакта с расплавом, а с другой – перераспределением топографии поверхности валка при горячей прокатке получаемой ленты в зоне опережения, когда вследствие скольжения контактных поверхностей происходит интенсивное изнашивание поверхности валка микровыступами выходящей ленты.

Литература

1. Buchner A. R. // *Steel Research.*, 68 (1997), 247.
2. Zapuskalov N. M. / *Iuter. Jurnal of Cast Met. Res.*, 9 (1996), 153.
3. Buchner A. R., Tacke K. H. // *Stahl und Eisen*, 117 (1997), 47.
4. Верещагин, М. Н. Формирование контактной поверхности замороженного металла при двухвалковом методе быстрой закалки расплава / М. Н. Верещагин, Н. М. Запускалов, И. В. Агунович // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого.* – 2007. – № 3. – С. 3–9.
5. Макушок, Е. М. Массоперенос в процессах трения / Е. М. Макушок, Т. В. Калиновская, А. В. Белый. – Минск : Наука и техника, 1978. – 272 с.
6. Верещагин, М. Н. Формирование геометрии ленты при двухвалковой закалке расплава / М. Н. Верещагин // *Вест. Нац. акад. наук Рэсп. Беларусь. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 1995. – № 3. – С. 36–41.
7. Huang S. C., Fiedler H. C. / *Metall. Trans.*, 12A (1981), 1107.
8. Fiedler H. C., Illgen L., Stephani G. / *Mater. Sci. Eng.*, A133 (1991), 657.
9. Zapuskalov N. M. / *Iuter. Jurnal of Cast Met. Res.*, 9 (1996), 45.
10. Верещагин, М. Н. Кристаллическое строение и структурные особенности сплава Fe–Si–Al при прокатке его расплава на упругих валках / М. Н. Верещагин, С. П. Пожарков // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого.* – 2000. – № 1. – С. 10–19.
11. Молотилов, Б. В. Изучение структурообразования при двухвалковом методе быстрой закалки / Б. В. Молотилов, Н. М. Запускалов // *Сталь.* – 1992. – № 3. – С. 75–78.

12. Павлов, И. М. Теория прокатки / И. М. Павлов. – Москва : Metallurgizdat, 1950. – 610 с.
13. Kragelsky I. V., Alisin V. V. Friction wear lubrication, tribology handbook. vol. 1, Mir, M. (1978), 608.
14. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – Москва : Высш. шк., 1969. – 608 с.
15. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – Москва : ГИТТЛ, 1956. – 610 с.
16. Макушок, Е. М. Теоретические основыковки и горячей объемной штамповки / Е. М. Макушок. – Минск : Наука и техника, 1968. – 306 с.
17. Целиков, А. Напряжения и деформации при прокатке металла / А. Целиков. – Москва : Мир, 1967. – 474 с.
18. Кузнецов, В. Д. Поверхностная энергия твердых тел / В. Д. Кузнецов. – Москва : ГИТТЛ, 1956. – 284 с.
19. Кашеев, В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов / В. Н. Кашеев. – Москва : Машиностроение, 1978. – 213 с.
20. Розенберг, А. М. Элементы теории резания металлов / А. М. Розенберг, А. Н. Еремин. – Москва : Машгиз, 1956. – 321 с.
21. Кузнецов, В. Д. Наросты при резании и трении / В. Д. Кузнецов. – Москва : ГИТТЛ, 1954. – 156 с.

Получено 18.02.2008 г.