

УДК: 621.35.035:621.763

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

М.Ю.Сербиновский

Южно-Российский государственный технический университет, Новочеркасск, Россия

Поступила в редакцию 14.12.2000 г.

Рассмотрено формирование лент из гранул активной массы, пропитанных жидкостью, и последующая накатка их на ленточный токоотвод. Предложена математическая модель расчета линейных и угловых скоростей валков, учитывающая опережение, отставание и усадку лент.

The roll moulding of fillets from granules of an active mass impregnated with a liquid, and their consequent roll forming on tape current collector is considered. The mathematical model of accounts of linear and angular velocities of rollers, taking into account a forward creep, backward creep and shrinkage of fillets is offered.

Потребность в химических источниках тока рулонной конструкции растет год от года, поэтому совершенствование технологии непрерывного формирования ленточных электродов является актуальной задачей. Технологический процесс изготовления ленточных электродов включает формирование лент активной массы из порошков или гранул и накатку этих лент на токоотвод. Данная работа посвящена разработке математической модели процесса формирования лент из гранул активной массы, пропитанных жидкостью, с последующей накаткой этих лент на токоотвод. Схемы рассматриваемых устройств для формирования и накатки электродных лент приведены на рис. 1 и 2.

Обеспечение стабильности процесса формирования ленточных электродов предполагает поддержание определенного отношения скорости формирования лент из гранул и скорости накатки их на токоотвод,

а также определение линейных и угловых скоростей формирующих валков и валков накатки.

Формование лент активной массы сопровождается опережением, а их накатка на токоотвод – отставанием. Кроме этого, в межвалковом пространстве происходит испарение из лент пропитывающей жидкости, вызывающее усадку лент. Таким образом, деформация лент Δl в межвалковом пространстве складывается из трех составляющих:

$$\Delta l = \Delta l_{on} + \Delta l_{om} - \Delta l_{yc}, \quad (1)$$

где Δl_{on} , Δl_{om} и Δl_{yc} – соответственно опережение, отставание и усадка лент активной массы.

Опережение лент активной массы проявляется только при формировании в валках с гладкой поверхностью. Применение рифленых валков и валков, обтянутых тканью, позволяет полностью исключить опережение, т.е. в этом случае $\Delta l_{on} = 0$. Отставание лент ликвидировать не удастся. Усадка лент зависит

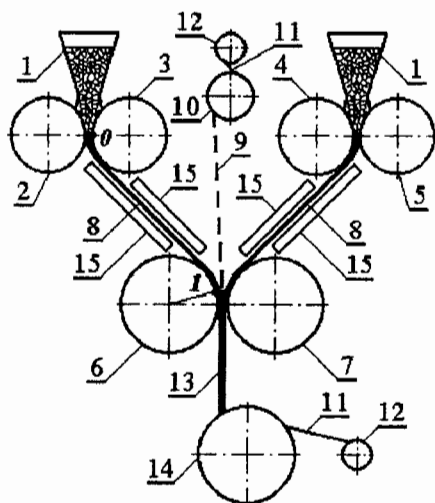


Рис. 1. Схема установки формирования электродной ленты (схема 1): 1 – бункер с активной массой, 2-5 – валки формирования лент активной массы, 6 и 7 – валки накатки лент, 8 – лента активной массы, 9 – лента токоотвода, 10 – бобина с лентой токоотвода, 11 – прокладочная лента, 12 – бобина для прокладочной ленты, 13 – электродная лента, 14 – бобина намотки электродной ленты, 15 – нагреватели

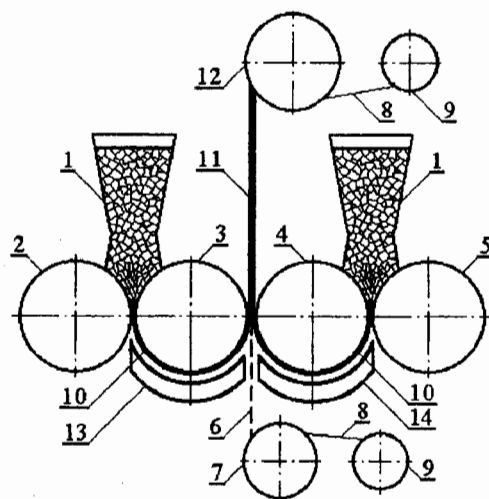


Рис. 2. Схема установки формирования электродной ленты (схема 2): 1 – бункер с активной массой, 2-5 – формирующие валки, 6 – лента токоотвода, 7 – бобина с лентой токоотвода, 8 – прокладочная лента, 9 – бобина для прокладочной ленты, 10 – лента активной массы, 11 – электродная лента, 12 – бобина для намотки электродной ленты, 13, 14 – нагреватели

от температуры в межвалковом пространстве. При комнатной температуре усадка обычно мала и ее величиной можно пренебречь ($\Delta l_{yc} = 0$).

Устройство, выполненное по схеме 1 (рис. 1), может иметь отдельные управляемые приводы вращения валков формирования активной массы и валков накатки, либо валки могут быть кинематически связаны.

В первом случае деформация лент активной массы компенсируется регулированием угловых скоростей первой и второй пар валков, т.е. формирующих валков и валков накатки. Если за некоторый интервал времени прокатки деформация ленты равна Δl , то из условия $\frac{l}{v_1} = \frac{l+\Delta l}{v_2}$ нетрудно определить требуемую скорость накатки:

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{l+\Delta l}{l}, \quad (2)$$

где v_1 – скорость формирования лент активной массы, т.е. скорость первой пары валков; v_2 – скорость накатки, т.е. скорость второй пары валков; l – длина лент активной массы в межвалковом пространстве.

Если в устройстве, выполненном по схеме 1, валки кинематически связаны, то требуемое отношение между скоростями v_1 и v_2 можно поддерживать за счет задания определенного передаточного отношения u для передачи, соединяющей формирующие валки и валки накатки:

$$u = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{l \cdot R_2}{(l + \Delta l) \cdot R_1}, \quad (3)$$

где ω_1 и R_1 – соответственно угловая скорость и радиус формирующих валков; ω_2 и R_2 – угловая скорость и радиус валков накатки. В реальных условиях невозможно абсолютно точно установить величину Δl и задать u , поэтому передаточное отношение задается в интервале

$$u_{min} \leq u \leq u_{max}, \quad (4)$$

где

$$u_{max} = \frac{l \cdot R_2}{(l + \Delta l) \cdot R_1}, \quad (5)$$

$$u_{min} = \frac{l \cdot R_2}{(l + \Delta l + \Delta l_N) \cdot R_1}. \quad (6)$$

В формуле (6) Δl_N – предельная абсолютная деформация растяжения лент активной массы в межвалковом пространстве.

В устройстве, выполненном по схеме 2 (рис.2), использовать отдельные приводы для каждого валка нельзя, поскольку средние валки 2 и 3 одновременно входят в две прокатные пары. Все валки кинематически связаны, поэтому нужно искать другие пути компенсации деформации лент в межвалковом пространстве.

Использование натяжителей, петленакопителей, компенсирующих валков и других подобных устройств нецелесообразно. Во-первых, это усложняет конструкцию устройства. Во-вторых,

процесс формирования электродных лент остается периодическим, так как при достижении максимальной величины компенсирующей петли необходимо останавливать прокатку и после ликвидации петли отставшей части лент активной массы возобновлять процесс.

Испарение пропитывающей жидкости из лент активной массы сопровождается усадкой [1], поэтому было предложено компенсировать опережение и отставание лент активной массы за счет их усадки.

Для устройства, выполненного по схеме 2, наиболее перспективным представляется способ формирования электродных лент, при котором на участке между первым и вторым проходами (см. рис.3, участок “а”–”б”) осуществляется нагрев лент активной массы. За счет нагрева лент интенсифицируется испарение находящейся в массе жидкости и увеличивается усадка лент. Происходит компенсация удлинения лент активной массы в результате опережения и отставания лент за счет их укорочения в результате усадки.

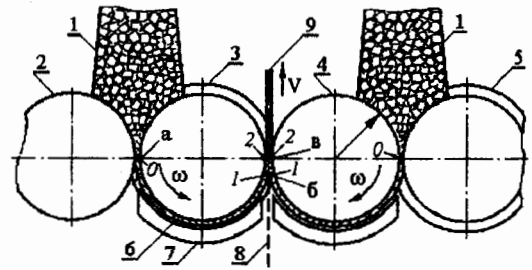


Рис. 3. Схема установки формирования электродной ленты в четырехвалковой установке (схема 2): 1 – бункер с активной массой, 2 – 5 – валки, 6 – лента активной массы, 7 – нагреватель, 8 – сетка токоотвода, 9 – электродная лента

Нагрев лент активной массы на участке “а”–”б” можно осуществлять с помощью валков 3 и 4 с размещенными в них нагревателями или с помощью специальных нагревателей в виде кольцевых сегментов, расположенных вблизи поверхности валков 3 и 4.

Задачей управления процессом является установление таких режимов формирования, при которых $\Delta l_{on} + \Delta l_{om} = \Delta l_{yc}$. Однако при прокатке электродных лент возможны отклонения тех или иных параметров управления и могут иметь место два варианта: $\Delta l_{on} + \Delta l_{om} > \Delta l_{yc}$ или $\Delta l_{on} + \Delta l_{om} < \Delta l_{yc}$.

В первом случае происходит провисание лент активной массы, образуются и накапливаются петли, что приводит к браку электродов (например, образованию складок и др.). Во втором случае петли не образуются, но ленты активной массы подвергаются деформации растяжения и возможен их разрыв.

Таким образом, для обеспечения качественной накатки лент на токоотвод нужно, чтобы $\Delta l_{on} + \Delta l_{om} \leq \Delta l_{yc}$. Однако разность $\Delta l_{yc} - (\Delta l_{on} + \Delta l_{om})$ не должна превышать величины предельной деформации ленты активной массы Δl_N . С учетом условия неразрывно-

сти лент активной массы задача сводится к определению таких параметров процесса, при которых

$$0 \leq \Delta l_{yc} - (\Delta l_{om} + \Delta l_{om}) \leq \Delta l_N. \quad (7)$$

Величина Δl_N — одна из механических характеристик лент активных масс, зависящая от свойств материала лент.

Абсолютная величина опережения Δl_{om} соответствующая длине ленты в межвалковом пространстве l ,

$$\Delta l_{om} = S_{on} \cdot l. \quad (8)$$

Опережение ленты S_{on}

$$S_{on} = \frac{v_2 - v_1}{v_1}, \quad (9)$$

где v_2 — скорость ленты активной массы на выходе из зазора валков формования. Так как опережение связано со скольжением ленты в направлении прокатки после прохождения нейтрального сечения зоны очага деформации, то величину S_{on} обычно связывают с параметрами ленты в нейтральном сечении [2]:

$$S_{on} = \frac{\gamma_n \cdot [h_{n1} + D \cdot (1 - \cos \gamma)] \cdot \cos \gamma}{h_{n1} \cdot \gamma_{n1}} - 1, \quad (10)$$

где γ_n — плотность ленты в нейтральном сечении; γ_{n1} и h_{n1} — соответственно плотность и толщина ленты активной массы; D — диаметр валков; γ — нейтральный угол. Использование формулы (10) затруднено тем, что определение величин γ_n и γ в производственных условиях проблематично.

Более удобна для оценки величины S_{on} усовершенствованная Е.Б.Ложечниковым [3] формула Головина-Дрездена:

$$S_{on} = g_{n1} \cdot \frac{R}{h_{n1}} \cdot \gamma^2, \quad (11)$$

где g_{n1} — относительная плотность ленты активной массы, $g_{n1} = \gamma_{n1} / \gamma_{ист}$; $\gamma_{ист}$ — истинная плотность активной массы; R — радиус валков. Но и в этой формуле используется величина нейтрального угла γ . Таким образом, нужно экспериментально определять S_{on} или величину нейтрального угла для различных условий формования.

Проведены исследования опережения в процессе формования лент из активной массы угольных, диоксидномарганцевых и оксидномедных электродов, получены уравнения зависимостей опережения от радиуса валков, толщины и плотности лент, составлены массивы значений опережения для широкого диапазона толщины и плотности лент при формовании лент в валках диаметром от 40 до 300 мм. Уравнения и массивы использовались для расчета и оптимизации параметров процесса формования и накатки электродных лент.

Для лент угольной массы опережение изменяется в пределах 1,2÷26,6%. Для диоксидномарганцевых и оксидномедных лент опережение меньше опережения для угольных лент (соответственно 0,8÷17,6% и 0,8÷19,4%), несмотря на то, что относи-

тельная плотность диоксидномарганцевых и оксидномедных лент выше относительной плотности угольных лент. Для диоксидномарганцевых и оксидномедных лент она равна соответственно 0,24÷0,46 и 0,24÷0,47, в то время как для угольных лент не превышает 0,2. Большая величина S_{on} для угольных лент, видимо, связана с меньшим коэффициентом трения и, соответственно, большей величиной нейтрального угла. Влияние относительной плотности на опережение отличается от зависимостей, полученных при прокатке металлических порошков. Объясняется это тем, что ленты активной массы формируются из гранул, пропитанных жидкостью, которая проникает в поры массы. Таким образом, реальная относительная плотность выше рассчитанной по сухому материалу (см. формулу (11)). Кроме того, жидкость выдавливается из зоны уплотнения значительно труднее, чем газ при прокатке порошков. Плотность прокатываемой массы растет за счет уменьшения объема макропор. Этим объясняется и большая величина опережения для угольных электродов, которые имеют относительно большой объем мезо- и микропор, жидкость из которых в процессе формования практически не выдавливается, и гранулы угольной массы ведут себя как несжимаемые.

Определим коэффициенты усадки и отставания, а также абсолютные величины Δl_{om} и Δl_{yc} .

Рассмотрим сначала формование лент активной массы в валках с рифленой поверхностью или валках, обтянутых тканью. В этом случае $\Delta l_{om} = 0$.

Если формование в устройстве с индивидуальными приводами валков, выполненном по схеме 1, проводится при комнатной температуре ($\Delta l_{yc} = 0$), то отношение скоростей формования и накатки имеет вид

$$v_2 = \frac{v_1}{k_{om}}, \quad (12)$$

где k_{om} — коэффициент отставания ленты активной массы.

В устройстве по схеме 1 с кинематически связанными валками имеем:

$$u_{max} = \frac{l \cdot R_2}{(l + \Delta l_{om}) \cdot R_1}, \quad (13)$$

$$u_{min} = \frac{l \cdot R_2}{(l + \Delta l_{om} + \Delta l_N) \cdot R_1}. \quad (14)$$

Рассмотрим работу устройства, выполненного по схеме 2 (см. рис.3), в случае формования лент активной массы в валках с рифленой поверхностью или валках, обтянутых тканью. Устройство имеет ось симметрии, поэтому можно ограничиться рассмотрением одной из частей, например левой.

В точке "а" (без учета упругого восстановления активной массы и упругого сжатия валков) заканчивается процесс формования ленты активной массы. В точке "б" начинается процесс накатки ленты активной массы на токоотвод. В точке "в" (без учета упругого восстановления слоя активной массы и упругого

сжатия валков) заканчивается процесс формирования электрода.

Усадка лент активной массы происходит на длине дуги валка "а"-"б". Отставание лент активной массы происходит в зоне уплотнения на длине дуги "б"-"в". Очевидно, что равенство Δl_{om} и Δl_{yc} необходимо в точке "б" (начале зоны сжатия лент активной массы с токоотводом).

Таким образом,

$$\Delta l_{om} = \frac{l_{12}}{k_{om}} - l_{12} = l_{12} \cdot \left(\frac{1}{k_{om}} - 1 \right), \quad (15)$$

$$\Delta l_{yc} = l_{01} - m_{01} \cdot l_{01} = l_{01} \cdot (1 - m_{01}), \quad (16)$$

где l_{12} – длина зоны деформации электрода; k_{om} – коэффициент отставания ленты активной массы; l_{01} – длина дуги валка на участке между первым и вторым зазорами (точки 0 и 1); m_{01} – коэффициент усадки ленты на дуге l_0 .

В работе [4] связь между коэффициентом отставания, плотностью и толщиной лент при прокатке определена зависимостью

$$\frac{\gamma_l}{\gamma_y} = \frac{h_n}{h_n} \cdot k_{om}, \quad (17)$$

где γ_l и γ_y – соответственно плотность сформованной ленты и плотность порошка в состоянии утряски; h_n и h_n – толщина порошка перед зоной деформации и толщина ленты в нейтральном сечении.

Величины h_n и h_n связаны зависимостью:

$$h_n = h_n + D \cdot (1 - \cos \alpha),$$

где h_n – толщина ленты; D – диаметр валков; α – угол прокатки. Поэтому с учетом размеров сечений очага деформации h_n и h_n авторы получают следующую формулу:

$$k_{om} = \frac{\gamma_l \cdot h_n}{\gamma_y \cdot [h_n + D \cdot (1 - \cos \alpha)]}. \quad (18)$$

Аналогичная зависимость приведена в работе [2]:

$$k_{om} = \frac{\gamma_l \cdot h_n \cdot \cos \varphi}{\gamma_y \cdot [h_n + D \cdot (1 - \cos \alpha)]}.$$

Учитывая, что нейтральный угол φ близок к 0, расхождение конечных результатов между зависимостями мало.

В нашем случае для накатки лент активной массы на сетчатый токоотвод

$$h_n = h_{n1}, \quad (19)$$

где h_{n1} – толщина ленты активной массы перед накаткой на токоотвод, $h_n \approx h_{n2}$, где h_{n2} – толщина половины слоя активной массы электрода.

Толщина электрода вычисляется по формуле

$$h_{эл} = 2h_{n2} + h_{эс}, \quad (20)$$

где $h_{эс}$ – эффективная толщина сетки-токоотвода,

$$h_{эс} = h_c \cdot (1 - K). \quad (21)$$

Здесь h_c – толщина сетки-токоотвода; K – коэффици-

ент открытия сетки, $K = F_1/F_2$, где F_1 – площадь отверстий сетки; F_2 – общая площадь поверхности сетки. В производстве электродов обычно применяют сетки, изготовленные способом безотходной просечки-вытяжки. При этом способе, как показано в работе [5], $K = (n - p) / p$, где n – шаг вытяжки, p – шаг подачи заготовки. Для фольговых токоотводов эффективная толщина равна толщине фольги.

В этой же работе приведены характеристики наиболее распространенных сеток, используемых в производстве литиевых электродов. Величины h_c и K находятся в следующих пределах: $h_c = 0,02 \pm 0,2$ мм, $K = 0,38 \pm 0,92$.

Таким образом,

$$h_{л2} = \frac{h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)}{2}. \quad (22)$$

Подставляя зависимости (7) и (10) в (5), окончательно получим:

$$k_{om} = \frac{\gamma_{л2} \cdot [h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)]}{2\gamma_{л1} \cdot h_{л1}}. \quad (23)$$

Отсюда, с учетом (15),

$$\Delta l_{om} = l_{12} \cdot \left(\frac{2\gamma_{л1} \cdot h_{л1} - \gamma_{л2} \cdot [h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)]}{\gamma_{л2} \cdot [h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)]} \right). \quad (24)$$

При замене дуги хордой

$$l_{12} \approx \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (25)$$

где R – радиус валков; Δh – обжатие, в данном случае $\Delta h = h_{эл} - 2h_{л1}$. Учитывая, что $h_{эл}$ в процессе накатки практически не изменяется, и подставляя (25) в (24), получим:

$$\Delta l_{om} = \frac{2\gamma_{л1} \cdot h_{л1} - \gamma_{л2} \cdot [h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)]}{\gamma_{л2} \cdot [h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)]} \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}. \quad (26)$$

Подставляя значения k_{om} (см. формулу (23)) в (12), получим величину v_2 для устройства, выполненного по схеме 1:

$$v_2 = \frac{2v_1 \cdot \gamma_{л1} \cdot h_{л1}}{\gamma_{л2} \cdot [h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)]}. \quad (27)$$

Для устройства 2 (см. рис. 3) с кинематически связанными валками пределы передаточных отношений будут следующими:

$$u_{max} = \frac{\gamma_{л2} \cdot [h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)]}{2\gamma_{л1} \cdot h_{л1}} \cdot \frac{R_2}{R_1}, \quad (28)$$

$$u_{min} = \frac{\gamma_{л2} \cdot [h_{эл} - h_c \cdot (1 - K)]}{2\gamma_{л1} \cdot h_{л1}} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot k_N, \quad (29)$$

где k_N – коэффициент влияния на передаточное отношение предельной деформации растяжения лент, в данном случае

$$k_N = \frac{l_{01} + \Delta l_{om}}{l_{01} + \Delta l_{om} + \Delta l_N}. \quad (30)$$

Следует отметить, что зависимости (23) и (26) – (29) получены без учета уширения ленты активной массы. Такое явление (отсутствие уширения) наблю-

дается, например, при прокатке лент в калибре, когда рост ширины ленты сдерживается ребордами валков.

В случае прокатки лент на валках без реборд их уширение следует учитывать. В соответствии с законом сохранения массы имеем:

$$\gamma_{n1} \cdot h_{n1} \cdot l_1 \cdot b_1 = \gamma_{n2} \cdot h_{n2} \cdot l_2 \cdot b_2,$$

где γ_{n1} и γ_{n2} , h_{n1} и h_{n2} , l_1 и l_2 , b_1 и b_2 – соответственно плотность лент, толщина, длина и ширина лент до и после прокатки.

Следовательно, с учетом уширения зависимости (23) и (26) – (29) могут быть записаны в следующем виде:

$$k_{om} = \frac{\gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)] \cdot b_2}{2\gamma_{n1} \cdot h_{n1} \cdot b_1}, \quad (31)$$

$$\Delta l_{om} = \frac{2\gamma_{n1} \cdot h_{n1} - \gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)]}{\gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)]} \times \frac{b_1}{b_2} \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (32)$$

$$v_2 = \frac{2v_1 \cdot \gamma_{n1} \cdot h_{n1}}{\gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)]} \cdot \frac{b_1}{b_2}, \quad (33)$$

$$u_{max} = \frac{\gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)] \cdot b_2 \cdot R_2}{2\gamma_{n1} \cdot h_{n1} \cdot b_1 \cdot R_1}, \quad (34)$$

$$u_{min} = \frac{\gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)] \cdot b_2 \cdot R_2}{2\gamma_{n1} \cdot h_{n1} \cdot b_1 \cdot R_1} \cdot k_N. \quad (35)$$

Зная величину уширения лент, соответствующую заданным технологическим режимам, толщине и ширине электродных лент, можно задавать такие длины бочек формирующих валков и валков накатки, при которых величина Δl_{om} и соответственно разница между скоростями v_1 и v_2 будут минимальны.

Определим величину усадки Δl_{yc} . Разобьем участок ленты, соответствующий длине l_{01} , на малые участки dl .

В результате усадки ленты активной массы длина каждого из участков становится следующей: $\Delta(dl) = dl - m_x \cdot dl = (1 - m_x) \cdot dl$, где m_x – коэффициент усадки участка $[l_x, l_x + dl]$. Запишем граничные условия для m_x : при $l_x = 0$ $m_x = 1$, при $l_x = l_{01}$ $m_x = m$. Длительность пребывания ленты в межвалковом пространстве мала, поэтому можно принять, что усадка ленты линейно зависит от времени сушки, тогда:

$$m_x = \frac{m}{l_{01}} l_x \quad (36)$$

и

$$\Delta(dl) = \left(1 - \frac{m}{l_{01}} l_x\right) \cdot dl. \quad (37)$$

Интегрируя полученное уравнение по длине l_{01} , получим:

$$\Delta l_{yc} = \int_0^{l_{01}} \Delta(dl) = \int_0^{l_{01}} \left(1 - \frac{m}{l_{01}} l_x\right) \cdot dl,$$

$$\Delta l_{yc} = l_{01} \cdot \left(\frac{2-m}{2}\right). \quad (38)$$

Нетрудно убедиться, что $m/2$ в (38) есть не что иное, как m_{01} в (16), то есть

$$m_{01} = m/2. \quad (39)$$

Величина дуги l_{01} (см. рис. 2) вычисляется по формуле

$$l_{01} = \pi \cdot R - l_{12}. \quad (40)$$

С учетом (25)

$$l_{01} = \pi \cdot R - \sqrt{R \cdot \Delta h}. \quad (41)$$

Тогда, подставляя (41) в (38), получим:

$$\Delta l_{yc} = \left(\pi \cdot R - \sqrt{R \cdot \Delta h}\right) \cdot \frac{2-m}{2}. \quad (42)$$

Подставляя значения Δl_{om} и Δl_{yc} в граничное условие процесса $\Delta l_{om} = \Delta l_{yc}$, получим уравнение, соответствующее минимальному коэффициенту усадки m_{min} :

$$\frac{2\gamma_{n1} \cdot h_{n1} - \gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)] \cdot b_1}{\gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)]} \cdot \frac{b_1}{b_2} \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} = \left(\pi \cdot R - \sqrt{R \cdot \Delta h}\right) \cdot \frac{2-m_{min}}{2}.$$

Тогда

$$m_{min} = 2 - \frac{2\sqrt{R \cdot \Delta h}}{\pi \cdot R - \sqrt{R \cdot \Delta h}} \times \frac{2\gamma_{n1} \cdot h_{n1} - \gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)] \cdot b_1}{\gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)] \cdot b_2}. \quad (43)$$

Реальный коэффициент усадки ленты активной массы должен быть больше m_{min} .

Таким образом, необходимо определять как минимальный коэффициент усадки m_{min} с помощью зависимости (43), так и действительный m и назначать такие значения параметров процесса формирования электродных лент, при которых $1 \geq m \geq m_{min}$.

Если формирование лент ведется в гладких валках, нужно учитывать опережение, поэтому граничное условие процесса имеет вид: $\Delta l_{on} + \Delta l_{om} = \Delta l_{yc}$.

Тогда

$$S_{on} \cdot \left[\pi \cdot R - \sqrt{R \cdot \Delta h}\right] + \frac{2\gamma_{n1} \cdot h_{n1} - \gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)] \cdot b_1}{\gamma_{n2} \cdot [h_{эп} - h_c \cdot (1-K)]} \cdot \frac{b_1}{b_2} \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} = \left(\pi \cdot R - \sqrt{R \cdot \Delta h}\right) \cdot \frac{2-m}{2}.$$

Отсюда минимальный коэффициент усадки m_{min} имеет вид:

$$m_{\min} = 2 - 2S_{on} + \left\{ -\frac{2\gamma_{л1}h_{л1} - \gamma_{л2}[h_{эл} - h_c(1-K)]}{\gamma_{л2}[h_{эл} - h_c(1-K)]} \cdot \frac{b_1}{b_2} \sqrt{R \cdot \Delta h} \right\}. \quad (44)$$

При формовании электродных лент с помощью установки, выполненной по схеме 1, имеющей гладкие валки и нагреватели лент в межвалковом пространстве (см. рис. 1), усадка лент вычисляется по формуле $\Delta l_{yc} = l \cdot \left(\frac{2-m}{2} \right)$, где l — длина ленты в

межвалковом пространстве, соответствующая длине ленты между точками 0 и 1 на рис. 1. Тогда величина Δl в зависимостях (2) — (5) будет вычисляться следующим образом:

$$\Delta l = l \cdot \left(\frac{2-m}{2} - S_{on} \right) + \left\{ -\frac{2\gamma_{л1}h_{л1} - \gamma_{л2}[h_{эл} - h_c(1-K)]}{\gamma_{л2}[h_{эл} - h_c(1-K)]} \cdot \frac{b_1}{b_2} \sqrt{R \cdot \Delta h} \right\}. \quad (45)$$

В приведенных выше зависимостях используется величина абсолютной предельной деформации растяжения лент активной массы в межвалковом пространстве Δl_N . Для установок, выполненных по схеме 1,

$$\Delta l_N = \varepsilon_{im} \cdot l_{01}, \quad (46)$$

где ε_{im} — минимальная допустимая относительная деформация растяжения лент в долях единицы, l_{01} — длина ленты в межвалковом пространстве. Для установок, выполненных по схеме 2,

$$\Delta l_N = \varepsilon_{im} \cdot (\pi \cdot R - \sqrt{R \cdot \Delta h}). \quad (47)$$

Для устройств, выполненных по схеме 1 с раздельными приводами валков формования и накатки, угловые скорости валков связаны соотношением

$$\omega_1 \cdot \frac{b_1}{b_2} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{l + \Delta l}{l} \leq \omega_2 \leq \omega_1 \cdot \frac{b_1}{b_2} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{l + \Delta l + \Delta l_N}{l}. \quad (48)$$

Представленные зависимости позволяют определить отношение скорости формования лент активной массы и скорости накатки их на токоотвод при использовании различных формирующих устройств и валкового инструмента. Кроме того, эти зависимости служат частью математической модели оптимизации параметров процесса прокатки ленточных электродов и параметров прокатных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сербиновский М.Ю., Думчус А.М. Влияние технологических факторов на усадку прокатываемых угольных электродов / Новочеркас. политехн. ин-т. Новочеркасск, 1987. 10 с. Деп. в ОНИИТЭХим (г. Черкассы 1987) № 735-хп-87.
2. Степаненко А.В., Исаевич Л.А. Непрерывное формование металлических порошков и гранул. Минск: Наука и техника, 1980. 256 с.
3. Ложечников Е.Б. // Порошковая металлургия. 1976. № 5. С.9.
4. Виноградов Г.А., Семенов Ю.М., Катрус О.А., Каташинский В.П. // Прокатка металлических порошков. М.: Металлургия, 1969. 382 с.
5. Чувпило А.В. Расчет удельных характеристик сеток, полученных способом безотходной просечки-вытяжки // Расчет, конструирование и исследование оборудования производства источников тока: Сб. науч. тр. М.: Энергия, 1968. С.52.