

Математическая модель процесса обработки композиционных электродных лент

Е.В. Состина

ГУАП, г. Санкт-Петербург

Аннотация: В статье рассмотрен вопрос производства электродных лент. Охарактеризована математическая модель параметров процесса формирования электродных лент. Приведены математические расчеты пористости, толщины и массы активного слоя. Сделан вывод о составе пропитывающих валков и точности дозирования фракций. Приведен пример расчета параметров формирования с активным слоем CuO.

Ключевые слова: электродные ленты, технологии, композиционные материалы, толщина и пористость активного слоя.

В последнее время отмечается достаточно интенсивное развитие рынка композиционных материалов, это связано, прежде всего, с использованием их в приборостроении и химической промышленности. Современный композиционный материал – это материал, состоящий из двух и более компонентов, различных по своим физико-механическим свойствам [1, 2]. Также композитами принято называть многокомпонентные системы, которые состоят из полимерной, металлической, углеродной, керамической или другой основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и т.д. [3,4].

Изготовление композиционных материалов требует точный и соответствующий подбор компонентов, которые смогут обеспечить физико-химические свойства материала, необходимые в конкретном производстве, а также обеспечить эффективность их использования.

Для расчета характеристик композитов разработано много различных программных средств, но совершенствование математических расчетов для нанесения толщины слоя, построение математической модели распределения нагрузок на матрицу остается актуальным вопросом. Поэтому, рассмотрим задачу разработки модели процесса нанесения действующего вещества на электродные ленты, что позволит увеличить скорость изготовления

композиционных электродных лент, и обеспечит различия в требуемой плотности их активного слоя.

Рассмотрим математическую модель производства электродных лент в установке непрерывного их формования.

Эффективность пористости слоя рассчитаем по формуле [5]:

$$P = \frac{m_L - m_S}{\rho_L \cdot V} \cdot 100\% ,$$

где m_L – масса влажного материала; m_S – масса сухого; ρ_L – плотность пропитывающей жидкости; V – объем материала.

Тогда максимальная влажность материалов W_{\max}^c , % составит:

$$W_{\max}^c = \frac{m_{L\max} - m_S}{m_S} \cdot 100\% ,$$

где $m_{L\max}$ – максимальная масса влажного вещества при пропитке в жидкости; m_S – масса сухого материала.

Соответственно влажность материалов при прокатке в установке W^c , % составит:

$$W^c = \frac{m_L - m_S}{m_S} \cdot 100\% ,$$

где m_L – масса влажного вещества после пропитки в жидкости; m_S – масса сухого материала.

При этом толщина электродной ленты на входе будет равна [5]:

$$h_{эл0} = 2h_{л0} + h_{э,с}$$

где $h_{э,с}$ — эффективная толщина сетки-токоотвода.

Плотность активной массы ленте мала, поэтому необходимы дополнительные уплотнительные обжатия ленты.

Уплотнительные валки обернуты тканевыми лентами [6,7], следовательно, часть влаги переходит из электродной ленты в тканевые

оболочки. При этом число тканевых слоев на первой паре валков k_1 , их толщина $h_{об}$ и пористость $P_{об}$, толщина электродной ленты $h_{эл1}$ после первого шага равна:

$$h_{эл1} = 2h_{л0} + h_{э.с} - k_1 \cdot h_{об} \cdot P_{об} .$$

Учитывая, что обжатие во время уплотнения равно [5]:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_{л0}} = \frac{h_{л0} - h_{л1}}{h_{л0}} ,$$

то получаем, что толщина $h_{э.с}$ остается постоянной и будет соответственно равна:

$$h_{л1} = 0,5k_1 \cdot h_{об} \cdot P_{об} \cdot (1 - \varepsilon_1) / \varepsilon_1 ,$$

$$h_{эл1} = k_1 \cdot h_{об} \cdot P_{об} \cdot (1 - \varepsilon_1) / \varepsilon_1 + h_c (1 - K) ,$$

или

$$h_{л1} = \frac{1 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1} \sum_{j=1}^2 h_{об j} \cdot P_{об j} ,$$

и

$$h_{эл1} = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \sum_{j=1}^2 h_{об j} \cdot P_{об j} + h_c \cdot (1 - K) .$$

Последние уравнения позволяют определить толщину электродной ленты, полученной за один проход при заданном значении обжатия. После n таких проходов получим значения:

– при одинаковой толщине и пористости тканевых слоев:

$$h_{л n} = h_{л0} - 0,5 \sum_{i=1}^n k_i \cdot h_{об} \cdot P_{об} ,$$

$$h_{эл n} = 2h_{л0} - \sum_{i=1}^n k_i \cdot h_{об} \cdot P_{об} + h_c \cdot (1 - K) ,$$

где n – число пар валков, k_i – число слоев ткани на i -той паре валков;

– при разных типах оболочек:

$$h_{л n} = h_{л 0} - 0,5 \sum_{j=1}^m h_{об j} \cdot P_{об j},$$

$$h_{эл n} = 2h_{л 0} - \sum_{j=1}^m h_{об j} \cdot P_{об j} + h_c \cdot (1 - K),$$

где m – число уплотнительных валков в установке, $h_{об j}$ и $P_{об j}$ – соответственно, толщина и пористость оболочек на j -том валке.

В производственных условиях [8,9] задается не только влажность пасты активной массы W_0 , конечная толщина электродной ленты $h_{эл}$, но и пористость P или плотность сухого активного слоя ρ_{ac} . При этом:

$$W_0 = m_{ж} / m_{ам} = (V_{ж} \cdot \rho_{ж}) / (V_{ам} \cdot \rho_{ам}),$$

$$P = (V - V_{ам}) / V = V_{пор} / (V_{пор} + V_{ам}) = V_{пор} / (V_{пор} + m_{ам} / \rho_{ам})$$

где W_0 и P выражены в долях единицы, $m_{ж}$ – масса жидкости, $m_{ам}$ – масса активной массы, $V_{ж}$ и $V_{ам}$ – объем жидкости и активной массы, $\rho_{ж}$ и $\rho_{ам}$ – плотность жидкости и активной массы, V – объем активного слоя ленты, $V_{пор}$ – объем пор в активном слое ленты после ее уплотнения.

При этом абсолютное обжатие ленты Δh_0 составляет:

$$\Delta h_0 = h_0 - h_{ac},$$

где h_{ac} – толщина активного слоя электрода после уплотнения.

Обжатие ленты осуществляется за счет пропитки избытка жидкости из пасты в поры тканых оболочек валков [4,8]. Обозначим через $\Delta V_{ж}$ – объем жидкости, удаленной из пасты за время уплотнения, $V_{пор}$ – объем пор в активном слое ленты после ее уплотнения, который заполняет оставшаяся в ленте жидкость, тогда

$$\Delta V_{ж} = V_{ам} [W_0 \cdot \rho_{ам} / \rho_{ж} - P / (1 - P)]$$

$$\Delta h = h_{ам} [W_0 \cdot \rho_{ам} / \rho_{ж} - P / (1 - P)].$$

Определим число необходимых уплотнительных проходов n .

Из условия постоянства массы [7,10]:

$$\rho_{ac0} \cdot h_{ac0} \cdot b_0 \cdot l_0 = \rho_{acn} \cdot h_{acn} \cdot b_n \cdot l_n,$$

где ρ_{ac0} и ρ_{acn} – плотность активного слоя до уплотнения и после n проходов, h_{ac0} и h_{acn} – толщина активного слоя до уплотнения и после n проходов, b_0 , l_0 и b_n , l_n – соответственно, ширина и длина электродной ленты до уплотнения и после n проходов. При уплотнении лент в валках с тканевыми оболочками ширина и длина лент не изменяется, тогда для суммарного обжата получаем:

$$\varepsilon_{\Sigma} = 1 - \rho_{ac0} / \rho_{acn}.$$

Учитывая, что

$$h_{acn} \cdot \rho_{acn} = h_{ac0} \cdot \rho_{ac0}, h_{acn} = 2h_{лn} \text{ и } h_{эл} = h_{элn} = 2h_{лn} + h_c(1-K),$$

получаем требуемое число проходов n :

$$n = \frac{h_{лn} \cdot (\rho_{acn} / \rho_{ac0} - 1)}{0,5k_m \cdot h_{об} \cdot P_{об}},$$

или

$$n = \frac{(\gamma_{лn} / \gamma_{л0} - 1) \cdot [h_{элn} - h_c \cdot (1 - K)]}{k_m \cdot h_{об} \cdot P_{об}},$$

где k_m – среднее число слоев ткани на каждой паре валков или требуемое число оболочек m :

$$m = \frac{(\rho_{acn} / \rho_{ac0} - 1) \cdot [h_{элn} - h_c \cdot (1 - K)]}{h_{обm} \cdot P_{обm}},$$

где $h_{обm}$ и $P_{обm}$ – средние значения $h_{обj}$ и $P_{обj}$ для данной установки. При составлении модели средние значения параметров задают, а параметры n и m округляют до целых чисел.

Толщина электродной ленты $h_{эл i-1}$ на входе в уплотнительные валки при заданных значениях $h_{эл i}$ и ε_i равна:

$$h_{эл i-1} = [h_{эл i} - h_c \cdot (1 - K)] / (1 - \varepsilon_i) + h_c \cdot (1 - K).$$

Толщина слоя пасты h_n на формующих валках [4]:

$$h_n = h_{л0} = 0,5 \left[h_{лn} + \sum_{i=1}^n k_i \cdot h_{об} \cdot P_{об} - h_c \cdot (1-K) \right],$$

или

$$h_n = h_{л0} = 0,5 \left[h_{лn} + \sum_{j=1}^m h_{обj} \cdot P_{обj} - h_c \cdot (1-K) \right],$$

$$h_n = h_{л0} = 0,5 [h_{эл0} - h_c \cdot (1-K)].$$

Таким образом, число необходимых уплотнительных проходов растет с увеличением толщины электродных лент. Случай прокатки с тремя и более уплотнительными проходами подходит для технологий ручного труда, но не считается рациональным для производственных установок. Уменьшение же числа уплотнительных проходов возможно за счет увеличения толщины слоев и применения двухслойных или трехслойных оболочек. Но при увеличении толщины и числа слоев растет погрешность толщины электродных лент. Поэтому нерационально применять более двух слоев ткани для каждого валка.

Суммарное число слоев k_{Σ} на уплотнительных валках равно:

$$k_{\Sigma} = 2h_{лn} \cdot (\gamma_{лn} / \gamma_{л0} - 1) / (h_{об} \cdot P_{об}).$$

Приведенная модель позволила оптимизировать параметры процесса формования, состав и толщину оболочек прокатки. Исходя из экспериментальных данных, можно сделать вывод о целесообразности использования для формования электродов ткани толщиной не более 0,5 мм.

Литература

1. Логинов В.Т., Дерлугян П.Д. Химическое конструирование трибокомполитов и их производство в ОКТБ «Орион» // Инженерный вестник Дона, 2007, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2007/46
2. Wang G., Zhang L., Zhang J. A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors // Chemical Society Reviews. 2012. Т. 41. №. 2. pp. 797-828.



3. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы. Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476
4. Waddoups M.E., Eisenmann J.R., Kaminske V. E. Microscopic fracture mechanics of advances composite materials // Journal of composite materials. 1971.Т.5. № 4. pp. 446-454.
5. Состина Е.В, Сербиновский М.Ю., Галкин С.А., Иванова Ю.Б. Расчет параметров уплотнения активного слоя при формировании ленточных электродов химических источников тока // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2005. Спец. вып.: Композиционные материалы. С. 59-65.
6. Багоцкий, В.С., Скупдип А.М. Химические источники тока. М: Энергоиздат, 1981. 360с.
7. Zhang Y., Feng H., Wu X., Wang L., Zhang A., Xia T., Dong H., Li X., Zhang L. Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review // Int. J. Hydrogen Energy. 2009. Т.34. pp.4889-4899.
8. Сербиновский М.Ю., Федорчук В.Е., Иванова Ю.Б., Состина Е.В. Разработка математической модели экологически чистого процесса формирования непрерывных композиционных лент // Результаты исследований. 2009: материалы 58-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. работников, аспирантов и студентов ЮРГТУ (НПИ) / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. С. 183-190.
9. Varakin I.N. Application of ultracapacitors as traction energy sources // Proc. 7th Int. Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. Deerfield Beach, Florida, 1997, Т.7.
10. Cho S., Lee S. B. Fast electrochemistry of conductive polymer nanotubes: synthesis, mechanism, and application // Acc. Chem. Res. 2008. Т.41. pp.699-707.



References

1. Loginov V.T., Derlugyan P.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2007, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2007/46
2. Wang G, Zhang L, Zhang J. Chemical Society Reviews. 2012, V. 41. №2. Pp.797-828.
3. Kudryavcev P.G., Figovskij O.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476
4. Waddoups M.E., Eisenmann J.R., Kaminske V. E. Journal of composite materials. 1971. Vol.5, № 4.Pp. 446-454.
5. Sostina E.V, Serbinovskij M.Yu., Galkin S.A., Ivanova Yu.B. Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Techn. nauki. 2005. Specz. vyp.: Kompozicionny`e materialy`. Pp. 59-65.
6. Bagoczkiy B.C., Skupdip A.M. Ximicheskie istochniki toka [Chemical current sources]. M: Energoizdat, 1981. 360p.
7. Zhang Y., Feng II., Wu X., Wang L., Zhang A., Xia T., Dong H., Li X., Zhang L. Int. J. Hydrogen Energy. 2009. V.34. Pp.4889-4899.
8. Serbinovskij M.Yu., Fedorchuk V.E., Ivanova Yu.B., Sostina E.V. Rezul`taty` issledovanij. 2009: ma-terialy` 58-j nauch.-texn. konf. professorsko-prepodavatel`skogo sostava, nauch. rabotnikov, aspirantov i studentov YuRGTU (NPI) / Yuzh.-Ros. gos. texn. un-t (NPI). Novocherkassk: YuRGTU (NPI), 2009. Pp. 183-190.
9. Varakin I.N. Proc. 7th Int. Seminar on Doble Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices. Deerfield Beach, Florida, 1997, V.7.
10. Cho S., Lee S. B. Acc. Chem. Res. 2008. V.41. Pp.699-707.