

## ЛЕНТОЧНОЕ ЛИТЬЕ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОЛИСТОВЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Ильющенко А.Ф., Марукович А.И., Прохоров О.А., Кривуленко Н.В.**  
 Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа,  
 Минск, РБ, a\_marukovich@mail.ru

Повышенный интерес к тонколистовым керамическим и металлическим материалам обусловлен их широким применением в различных областях техники. Например, в химической промышленности такие материалы используются в составе электролизеров водяного пара [1] и диоксида углерода в электро-каталитических реакторах различных типов [2], электрохимических датчиков кислорода в оксидных расплавах и газах [3 - 5]. В энергетической – в качестве твердых электролитов и несущих проницаемых подложек твердо-оксидных топливных элементов [6 - 8]. В радиоэлектронной – данные материалы используются для производства пьезоэлементов, многослойных конденсаторов, монтажных подложек, интегральных микросхем или корпусов БИС [9 - 11]. Также тонколистовые материалы находят широкое применение в качестве различных фильтрующих элементов для агрессивных сред, используются в теплообменных устройствах в качестве элементов испарителей и сублиматов [12 - 14]. Эксплуатационные характеристики указанных выше изделий прямо зависят от толщины и однородности используемых тонколистовых материалов.

На практике для формования тонколистовых керамических и металлических материалов определенной толщины нашли применение следующие способы: метод ленточного литья с помощью ракельного ножа, экструдирование, прокатка (вальцевание) и прессование.

Широкое распространение для получения тонколистовых материалов получил метод ленточного литья с помощью ракельного ножа. Главным преимуществом данного метода является возможность получения крупногабаритных тонких плоских изделий с толщиной 0.05 - 2 мм, которые практически невозможно получить другими методами (такими как прессование, экструдирование, прокатка), а также высокая производительность. Из листовых заготовок, полученных данным методом, легко изготовить изделия требуемого размера и формы, в том числе осуществить их перфорацию.

Процесс получения тонколистовых порошковых изделий методом ленточного литья включает следующие основные технологические операции: приготовление литейной суспензии, литье суспензии на технологическую подложку, сушку полученной заготовки, прокатку ее в волках при необходимости, вырубку заготовок требуемых геометрических размеров, термическое удаление органического связующего и спекание [15]. При этом толщину получаемого изделия регулируют ракельным ножом («doctor blade» процесс), схема процесса представлена на рисунке 1. В производстве тонколистовых изделий, получаемых методом ленточного литья, используются суспензии, состоящие из: металлического или керамического порошка – основного компонента, органического связующего, пластификатора, депрессанта и растворителя.

В настоящее время широкое распространение получили суспензии, основанные на органических растворителях таких как: этиловый и изобутиловый спирт, толуол, метилэтилкетон или их смеси [16 -19]. В качестве органической связки в таких суспензиях чаще всего используется поливинилбутираль и поливинилацетат, в качестве пластификатора – дибутилфталат и диоктилфталат, а в качестве дисперсанта – рыбий жир. Такие суспензии характеризуются высоким содержанием

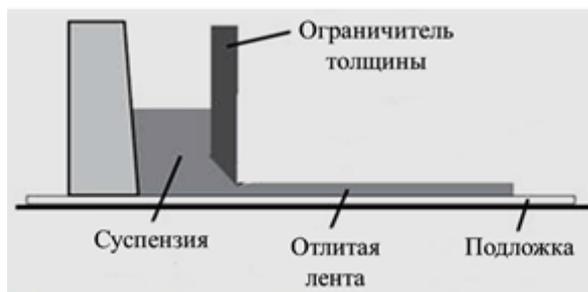


Рисунок – Схема получения тонколистовых порошковых изделий с использованием ракельного ножа

твердой фазы и отличными технологическими свойствами, что позволяет получать на их основе высококачественные тонколистовые порошковые материалы.

Суспензии на основе органических растворителей отличаются высокой токсичностью, и поэтому в последнее время в мировой практике наблюдается тенденция к переходу к более безопасным суспензиям на водной основе, хотя они и характеризуются более худшими технологическими свойствами [20 - 22]. В качестве органической связки в таких суспензиях в основном используют поливиниловый спирт, пластификатором служит глицерин или полиэтиленгликоль, а в качестве депрессантов используют полиэлектролиты на основе солей акриловой кислоты.

Одним из основных параметров тонколистовых порошковых изделий получаемых методом ленточного литья является толщина формируемой заготовки.

Очевидно, что толщина получаемых тонколистовых изделий определяется не только зазором между технологической подложкой и ракельным ножом, но и реологическими свойствами используемой суспензии, скоростью движения ракельного ножа, формой и углом заточки лезвия ножа.

К настоящему времени в научно-технической литературе предложено большое количество аналитических моделей, основанных на теориях течения ньютоновских и неньютоновских жидкостей, связывающие параметры процесса ленточного литья и реологические свойства суспензии с толщиной формируемой заготовки [23 - 26]. Большинство исследователей для моделирования процесса ленточного литья используют степенной закон вязкости жидкостей или модель Бингама, как наиболее точно описывающие процессы, протекающие при литье вязких суспензий [27 - 30]. Однако, как и все аналитические решения, данные модели включают различные приближения и предположения, что делает необходимым в каждом конкретном случае введение в расчеты эмпирических коэффициентов. Таким образом, в настоящее время предложенные для описания процессов ленточного литья аналитические модели не являются универсальными, хотя и позволяют установить качественные зависимости между параметрами процесса ленточного, реологическими свойствами суспензии и толщиной формируемой заготовки.

В последнее время, по мере роста вычислительной мощности компьютеров, ряд исследователей [31 - 33] предпринимают попытки численного моделирования процессов ленточного литья, используя такие параметры как вязкость суспензии, скорость движения технологической подложки, величиной зазора между ракелем и технологической подложкой. Однако в данный момент все эти исследования носят предварительный характер и не применимы на практике.

Таким образом, экспериментальные исследования до сих пор играют определяющую роль при разработке технологии получения конкретного изделия методом ленточного литья, с требуемыми техническими характеристиками.

### **Заключение.**

Рассмотрены области применения и методы изготовления тонколистовых порошковых материалов. Показано, что перспективным, а в некоторых случаях и единственным методом получения таких материалов является метод ленточного литья вязких суспензий на технологическую подложку. Рассмотрен процесс и технологические особенности ленточного литья порошковых тонколистовых материалов. Рассмотрены различные аналитические и численные модели описывающие процесс ленточного литья суспензий в зависимости от технологических параметров. Показано, что в настоящее время не существует не аналитической, не численной модели, полностью описывающей данный процесс.

### **Литература**

1. Kim, Min-Young. Fabrication and Electrical Characteristics of Graphite/Carbon Nanotube/Polyvinyl Butyral Composite Film via Tape-Casting and Heat-Treatment [Текст]/ Min-Young Kim, Seung-Woo Choi, Seong Jae Boo, et al.// Journal of Nanoscience and Nanotechnology – 2015 - Vol. 15 – pp. 8055 – 8061.

2. Cong, P. Combinatorial discovery of oxidative dehydrogenation catalysts within the Mo-V-Nb-O system [Текст]/ P. Cong, A. Dehestani, R. Doolen, D. M. Giaquinta // Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. – 1999 – 96 – pp. 11077 – 11080.
3. Ren, L. The improved photocatalytic properties of P-type NiO loaded porous TiO<sub>2</sub> sheets prepared via freeze tape-casting [Текст]/ L. Ren, Y.-P. Zeng, D. Jiang // Solid State Sci. – 2010 - 12 – pp. 138 – 143.
4. Sing, K.S.W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity [Текст]/ K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, et al. // Pure Appl. Chem. - 1985 - 57 – pp. 603 – 619.
5. Zhuiykov, S. Electrochemistry of Zirconia Gas Sensors [Текст]/ S. Zhuiykov// Boca Raton: CRC Press – 2007 - 320 с.
6. Thorel, A. Tape Casting Ceramics for High Temperature Fuel Cell Applications [Текст]/ A. Thorel// In Ceramic Materials - Intech: Rijeka – Croatia – 2010 – pp. 49 – 67.
7. Menzler, N.H. Sequential Tape Casting of Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells [Текст]/ N. H. Menzler, J. Malzbender<sup>1</sup>, P. Schoderböck, R. Kauert, H. P. Buchkremer// FUEL CELLS – 2014 – 14 - №1 – pp. 96 – 106.
8. Moon, H. Development of IT-SOFC unit cells with anode-supported thin electrolytes via tape casting and co-firing [Текст]/ H. Moon, S.D. Kim, S.H. Hyun, H.S. Kim // Int. J. Hydrogen Energy – 2008 - 33 – pp. 1758 – 1768.
9. Gongora-Rubio, M.R. Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST) [Текст]/ M.R. Gongora-Rubio, P. Espinoza-Vallejos L. Sola-Laguna, J.J. Santiago-Avilés// Sen. Actuators – A - 2005 – 89 – pp. 222 – 241.
10. Liu, G. Microstructural and dielectric properties of Ba<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>Ti<sub>1-x</sub>ZrxO<sub>3</sub> based combinatorial thin film capacitors library [Текст]/ G. Liu, J. Wolfman, C. Autret-Lambert, J.Sakai, S. Roger, M. Gervais, F. Gervais // J. Appl. Phys. – 2010 – 108 – 114108 – pp. 1 – 6.
11. Messing, G. Templated grain growth of textured piezoelectric ceramics [Текст]/ G. Messing, S. Trolier-McKinstry, E. Sabolsky, et al.// Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. – 2004 - 29 – pp. 45 – 96.
12. Bryce, R.M. Freeman. Extensional instability in electro-osmotic microflows of polymer solutions [Текст]/ Bryce, R. M. and M. R.// Physical Review – E - 2010 – 81 – pp. 28 - 36.
13. Boaro, M. Synthesis of highly porous Ytria-stabilized Zirconia by tape-casting methods [Текст]/ M. Boaro, J.M. Vohs, R.J. Gorte// J. Am. Ceram. Soc. – 2003 - 86 – pp. 395 – 400.
14. Meulenbergh, W.A. Graded porous TiO<sub>2</sub> membranes for microfiltration [Текст]/ W.A. Meulenbergh, J. Mertens, M. Bram, H.-P. Buchkremer, D. Stöver// J. Eur. Ceram. Soc. - 26 - 2006 – pp. 449 – 454.
15. Twiname, E.R. Tape casting: theory and practice [Текст]/ E.R. Twiname, R.E. Mistler// The American Ceramic Society: Westerville - OH - 2000.
16. Liu, Zhifu. Combinatorial Study of Ceramic Tape-Casting Slurries [Текст]/ Zhifu Liu, Yiling Wang, Yongxiang Li// ACS Comb. Sci. – 2012 – 14 – pp. 205 – 210.
17. Тиунова, О.В. Керамические мембраны на основе скандий-стабилизированного ZrO<sub>2</sub>, полученные методом пленочного литья [Текст]/ О.В. Тиунова, О.Ю. Задорожная, Ю.К. Непочатов, И.Н. Бурмистров.// Электрохимия – 2014 – 50 - № 8 - с. 801 – 807.
18. Gutierrez, C. Tape casting of non-aqueous silicon nitride slips [Текст]/ C. Gutierrez, R. Moreno.. J. Eur. Ceram Soc. – 2000 – 20 - (10) – pp. 1527 – 1537.

19. Li, J. Preparation of non-aqueous mg green tapes by tape casting [Текст]/ J. Li, G. Luo, Q. Shen, L. Zhang, H. Zhu, C. Deng // Synth. React. Inorg. Met. Org. Chem. – 2012 -42 – pp. 758 – 763.
20. Hotza, D. Review: aqueous tape casting of ceramic powders [Текст]/ D. Hotza, P. Greil // Mater. Sci. Eng. - A – 1995 - 202 – pp. 206 – 217.
21. Gutierrez, C.A. Influence of slip preparation and casting conditions on aqueous tape casting of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Текст]/ C.A. Gutierrez, R. Moreno// Mater. Res. Bull. - 2001 - 36 – pp. 2059 - 2072.
22. Pagnoux, C. Aqueous suspensions for tape-casting based on acrylic binders [Текст]/ C. Pagnoux, T. Chartier, M. Granja, F. Doreau, J. Ferreira, J. Baumard // J. Eur. Ceram. Soc. - 18 - 1998 – pp. 241 – 247.
23. Liu, S.L. Calculation of tape thickness for ceramic tape casting [Текст]/ S.L. Liu, Q. Shen, G.Q. Luo, M.J. Li, L.M. Zhang// Key Eng. Mater. - 2012 - 512-515 – pp. 328 – 333.
24. Chantaramee, N. Characterization of particles packing in alumina green tape [Текст]/ N. Chantaramee, S. Tanaka, Z. Kato, N. Uchida, K. Uematsu // J. Eur. Ceram. Soc. – 2009 - 29 – pp. 943 – 948.
25. Mukherjee, A. Correlation between slurry rheology, green density and sintered density of tape cast yttria stabilised zirconia [Текст]/ A. Mukherjee, B. Maiti, A.D. Sharma, R.N. Basu, H.S. Maiti// Ceram. Int. – 2001 - 27 – pp. 731 – 739.
26. Bulatova, R. Thickness control and interface quality as functions of slurry formulation and casting speed in side-by-side tape casting [Текст]/ R. Bulatova, M. Jabbari, A. Kaiser, M.D. Negra, K. Andersen, J. Gorauskis, C. Bahl// J. Eur. Ceram. Soc. – 2014 - 34 – pp. 4285 – 4295.
27. Snel, M.D. Influence of tape cast parameters on texture formation in alumina by templated grain growth [Текст]/ M.D. Snel, J. van Hoolst, A.-M. de Wilde, M. Mertens, F. Snijkers, J. Luyten// J. Eur. Ceram. Soc. – 2009 - 29 – pp. 2757 – 2763.
28. Pal, R. Rheology of suspensions of solid particles in power-law fluids [Текст]/ R. Pal// Can. J. Chem. Eng. – 2015 - 93 – pp. 166 – 173.
29. Jabbari, M. An evaluation of interface capturing methods in a VOF based model for multiphase flow of a non-Newtonian ceramic in tape casting [Текст]/ M. Jabbari, R. Bulatova, J.H. Hattel, C.R.H. Bahl// Appl. Math. Model. - 2014 - 38- pp. 3222 – 3232.
30. Jabbari, M. Quasi-steady state power law model for the flow of La<sub>0.85</sub>Sr<sub>0.15</sub>MnO<sub>3</sub> ceramic slurry in tape casting [Текст]/ M. Jabbari, R. Bulatova, J.H. Hattel, C.R.H. Bahl// Mater. Sci. Technol. - 29 - 2013 – pp. 1080 – 1087.
31. Loest, H. Numerical flow simulation of viscoplastic slurries and design criteria for a tape casting unit [Текст]/ H. Loest, R. Lipp, E. Mitsoulis // J. Am. Ceram. Soc. – 1994- 77 – pp. 254 – 262.
32. Jabbari, M. Numerical modeling of the side flow in tape casting of a non-newtonian fluid [Текст]/ M. Jabbari, J. Hattel// J. Am. Ceram. Soc. – 2013 - 96 – pp. 1414 – 1420.
33. Spangenberg, J. Flow induced particle migration in fresh concrete: theoretical frame, numerical simulations and experimental results on model fluids [Текст]/ J. Spangenberg, N. Roussel, J. Hattel, H. Stang, J. Skocek, M. Geiker// Cem. Concr. Res. – 2012 - 42 – pp. 633 - 641.