

ỨNG DỤNG CỦA GRAPHENE OXIDE VÀ GRAPHENE TRONG LĨNH VỰC BÔI TRƠN .I. CẤP ĐỘ NANO VÀ VI MÔ

VŨ THỊ MINH HỒNG¹, NGUYỄN VIỆT HÙNG¹, NGUYỄN TIẾN HÙNG¹,
TRƯƠNG VĂN TỪ¹, NGUYỄN TRẦN TUÂN¹, BÙI THỊ LỆ THỦY^{2*}

1. Trường Đại học Mở - Địa chất, Đức Thắng, Bắc Từ Liêm, Hà Nội

2. Nhóm nghiên cứu mạnh “Nghiên cứu các quá trình Hóa học xanh” (HUMG-GCP), Trường Đại học Mở - Địa chất, Hà Nội

SUMMARY:

APPLICATION OF GRAPHENE OXIDE VÀ GRAPHENE IN LUBRICANTS.I. NANO-SCALE VÀ MICRO-SCALE

Many scientists focus on using graphene oxide and graphene them as lubricants or lubricant additives due to their special layer structure. The friction mechanism of graphene is studied based on computational methods at different scales from nano to meso. In most nanoscale experimental and computational studies on graphene, the friction properties have been shown to depend on the layer stacking ability, structural characteristics, and nature of the sliding surfaces. In addition to being used as a solid lubricant, graphene can also be used as an additive in conventional lubricants, such as for oils, solvents and other types of fluids.

Keywords: Graphene oxide, graphene, lubricants.

I. MỞ ĐẦU

Graphene có cấu trúc mạng lục giác hai chiều của carbon, được công nhận là vật liệu nổi bật nhất trong thập kỷ này với một loạt ứng dụng. Graphene có các tính chất ma sát và mài mòn độc đáo mà các vật liệu khác không có. Bên cạnh các tính chất nhiệt, điện, quang và cơ học, graphene có thể đóng vai trò là chất bôi trơn rắn hoặc chất bôi trơn dạng keo[1]. Graphene có độ bền cơ học cao, lực tương tác Van der Waals giữa các lớp có độ dày nguyên tử yếu nên các lớp này dễ bị tách ra khi chịu lực dẫn đến độ bền dạng thấp; hơn nữa, khi tách ra, các lớp có bề mặt rất mịn. Ngoài ra, graphene có tính trơ về mặt hóa học, độ dẫn nhiệt cao và diện tích bề mặt lớn. Graphene có cấu trúc siêu mỏng ngay cả khi có vài lớp, nó có thể được sử dụng bôi trơn cho các hệ thống với các chi tiết dao động, quay và trượt kích thước nano hoặc micro để giảm bám dính,

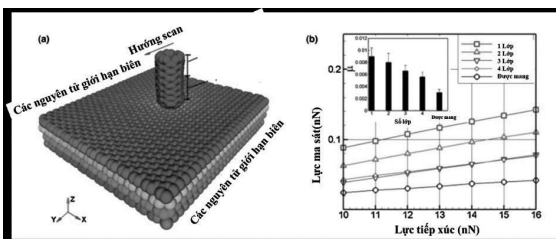
ma sát và mài mòn. Nhờ tất cả các đặc tính mà graphene được sử dụng rộng rãi làm chất bôi trơn và phụ gia bôi trơn nhằm tạo ra ma sát và độ mài mòn thấp. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng graphene làm chất bôi trơn rắn, làm phụ gia cho chất bôi trơn và cho kết quả rất khả quan[2]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng graphene ít lớp[3-6] có thể làm giảm độ mài mòn tới 10^4 lần và ma sát 10^5 - 10^6 lần. Ngoài ra, người ta đã được chứng minh rằng graphene hoạt động trong môi trường ẩm và khô đều tốt như nhau, trong khi các chất bôi trơn rắn thông thường ví dụ như graphite nhiệt phân trật tự đều không có tính chất này. Bài báo này trình bày một số tìm hiểu về các nghiên cứu cấp độ nano và vi mô về ứng dụng của graphene oxide và graphene trong lĩnh vực bôi trơn.

II. CÁC NGHIÊN CỨU Ở QUY MÔ NANO

Một số nghiên cứu đã dự đoán bản chất của cơ chế ma sát của graphene dựa trên các phương pháp tính toán ở các quy mô khác nhau từ nano cho đến meso[7-10]. Trong hầu hết các nghiên cứu thực nghiệm và tính toán ở quy mô nano trên graphene, tính chất ma sát được chứng minh là phụ thuộc vào khả năng xếp chồng các lớp, các đặc điểm cấu trúc, bản chất của các bề mặt trượt. Hiện tượng này đúng đối với hai hệ thống khác nhau: (a) ma sát của đầu

kính hiển vi lực nguyên tử (AMF) ở quy mô nano trượt trên bề mặt của các lớp graphene (mô phỏng các phép đo lực biên của AFM) và (b) ma sát giữa chính các lớp graphene. Trong trường hợp (a), người ta thấy rằng ma sát giảm khi tăng số lượng lớp[7,10], trong khi ở trường hợp (b) ma sát được tìm thấy hoạt động theo cách ngược lại, đạt được tính chất ma sát hoặc trượt dính cao hơn khi số lớp tăng lên hơn ba[7, 8]. Như được hiển thị trong Hình 1[10], mô hình

hóa các tương tác giữa đầu AFM và graphene, trong đó lực được tính bằng tổng các thành phần theo trục Oy của các lực Van der Waals tác dụng giữa các nguyên tử của đầu CNT và các nguyên tử của các lớp graphene, chứng minh rằng lực ma sát giảm khi số lớp tăng lên; kết luận đó cũng được khẳng định bởi các phép đo thực nghiệm AFM [11]. Lực ma sát đó bị chi phối bởi sự đóng góp từ biến dạng ngoài mặt phẳng, cơ chế được gọi là ‘sự nhả nhúm’ ở phía trước đầu quét (Hình 2d), làm tăng diện tích tiếp xúc và do đó, tăng ma sát. Khi số lượng các lớp graphene tăng lên, các tương tác giữa các lớp làm giảm thiểu hiệu ứng nhả nhúm và do đó làm giảm ma sát. Hơn nữa, [12], Liu và Zhang tuyên bố rằng không chỉ số lượng lớp tăng lên, mà khoảng cách bề mặt đầu nhọn tăng lên cũng làm giảm hệ số ma sát đối với các tương tác trượt giữa đầu mũi của dụng cụ và bề mặt. Phần lớn các nghiên cứu thực nghiệm về ma sát graphene ở quy mô nano đã sử dụng lực bên AFM hoặc kính hiển vi lực ma sát (FFM) [12].

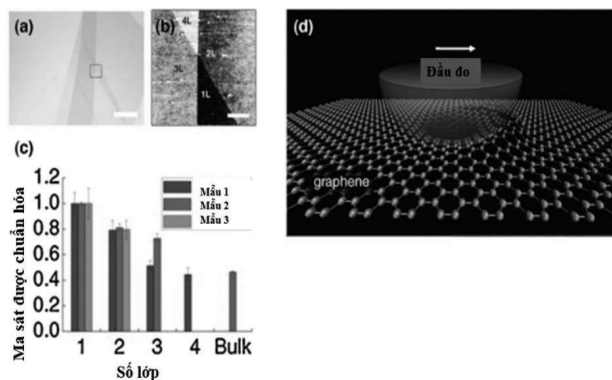


Hình 1. (a) Graphene bốn lớp, màu sắc của mỗi lớp nguyên tử được xác định bởi vị trí theo trục Z của nó. (b) Lực ma sát là hàm của lực tiếp xúc và hệ số ma sát là hàm số của số lớp

Các kết quả thu được từ các mô phỏng động lực học Brownian mà mô hình hóa phép đo lực biên AFM giữa carbon nanotube (chiều cao và đường kính lần lượt là 2,3 và 1,2nm) và huyền phù graphene vài lớp (5,5nm, 6,2nm). Lực tiếp xúc được giữ ở mức 10-16nN. Các mô phỏng được điều nhiệt ở 300K [10].

Các phép đo lực biên AFM đã chứng minh sự phụ thuộc của ma sát vào số lớp graphene [11], phù hợp với tính chất được dự đoán trong việc mô phỏng đã xem xét ở trên. Lý

và cs[13] đã thực hiện các nghiên cứu FFM trong điều kiện môi trường xung quanh bằng cách sử dụng đầu dò silicon. Cả graphene tự do và graphene dịch chuyển cơ học trên SiO_2 đều có sự giảm ma sát theo số lớp (Hình 2) có lẽ là do hiệu ứng ‘puckering’. Tuy nhiên, nếu lớp graphene được liên kết chặt chẽ với chất nền (như đã thấy trong trường hợp chất nền mica [11]), thì không quan sát thấy sự phụ thuộc chặt chẽ của lực ma sát vào số lượng lớp graphene. Sự phụ thuộc của ma sát vào số lớp xảy ra không chỉ ở graphene mà ở tất cả các vật liệu lát mỏng cơ nguyên tử [13].



Hình 2. (a) Hình ảnh kính hiển vi quang học của mẫu graphene. Hình vuông chấm màu đỏ đại diện cho khu vực quét AFM tiếp theo. Thanh tỷ lệ, 10mm. (b) Ảnh địa hình và ảnh ma sát (quét về phía trước) được đo đồng thời bằng AFM từ các khu vực được chỉ định. 1L, 2L, 3L... cho biết các tấm có độ dày của một, hai, ba... lớp nguyên tử. Thanh tỷ lệ, 1mm. (c) Ma sát trên các khu vực có độ dày lớp khác nhau. Đối với mỗi mẫu, ma sát được chuẩn hóa thành giá trị thu được cho lớp mỏng nhất. Các thanh sai số biểu thị độ lệch chuẩn của các tín hiệu ma sát của từng khu vực. Trong biểu đồ, cùng một màu đại diện cho dữ liệu từ cùng một mẫu. (d) Một sơ đồ cho thấy hiệu ứng nhả nhúm được đề xuất, trong đó độ bám dính vào đầu AFM trượt tạo ra mặt phẳng biến dạng của một tấm graphene, dẫn đến tăng diện tích tiếp xúc và ma sát; thang màu của các nguyên tử biểu thị vị trí ngoài mặt phẳng của chúng [13]

III. CÁC NGHIÊN CỨU Ở QUY MÔ VI MÔ

Mặc dù quá trình chuyển đổi giữa quy mô nano và quy mô vi mô không hoàn toàn rõ ràng, các nghiên cứu về tính chất graphene được thực hiện ở quy mô nhỏ bằng các kỹ thuật khác ngoài AFM. Kim và cs [14] đã nghiên cứu các đặc tính bám dính và ma sát của graphene ở quy mô vi mô bằng máy đo lực ma sát vi mô. Graphene lắng đọng trên đế Ni và Cu bằng CVD được chuyển lên đế SiO_2 , và phép thử ma sát được thực hiện trong môi trường gần nhiệt độ phòng bằng cách sử dụng thấu kính silica và polydimethylsiloxane (PDMS) hợp chất làm đối tác. Tải trọng tiếp xúc dao động từ 5 đến 70mN. Kết quả đã chứng minh rằng cả lực bám dính và lực ma sát đều giảm khi bề mặt SiO_2 được phủ graphene (Hình 3). Sự thay đổi tính

chất của graphene phủ trên các kim loại khác nhau được cho là do lực bám dính giữa graphene đã lắng đọng trên Cu và bề mặt SiO_2 yếu hơn, dẫn đến graphene dễ bị mài mòn, ngay cả khi tải 5mN.

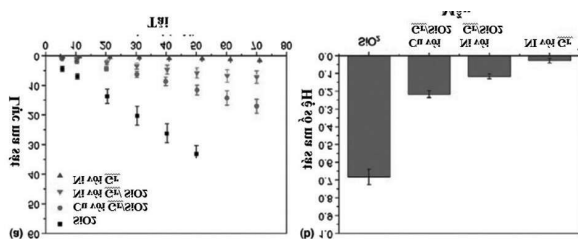
Shin và cs [15] đã tiến hành các thử nghiệm trượt xước ở quy mô vi mô như một cách khác để đo hệ số ma sát của graphene ở quy mô vi mô. Kết quả cho thấy ở quy mô này, hệ số ma sát luôn ở mức 0,03 bất kể số lượng lớp là bao nhiêu. Trên cơ sở của cả nghiên cứu vi mô và nano, các tác giả cho rằng sự khác biệt về sự phụ thuộc ma sát vào độ dày của màng graphene đối với môi trường và kích thước đầu dò. Hơn nữa, việc đưa vào các khuyết tật (do plasma oxygen cung cấp) làm tăng ma sát graphene. Do

đó, sự khác biệt cũng có thể phát sinh từ lớp trên cùng bị lỗi hoặc không hoàn hảo trên màng graphene. Ngược lại, nếu mức độ oxy hóa của graphene oxide bị giảm, như Ou

và sc chỉ ra[16], đối với các tấm nano graphene oxide được khử hóa học trên đế silicon, lực kết dính cũng giảm và điều này dẫn đến giảm ma sát.

IV. NGHIÊN CỨU VỀ GRAPHENE BIẾN TÍNH

Sự thay đổi trong hiệu quả ma sát của graphene như là một hàm số của hóa học bề mặt được các nhà khoa học quan tâm. Do đó, các tính chất ma sát của graphene biến đổi hóa học (flouro hóa, hydrogen hóa hoặc oxy hóa) đã được nghiên cứu bằng thực nghiệm cũng như lý thuyết bằng tính toán theo thuyết hàm mật độ (DFT)[17].



Hình 3. (a) Lực ma sát là một hàm của tải trọng và (b) hệ số ma sát của các mẫu graphene

Chỉ có thấu kính silica nung chảy được sử dụng làm vật liệu đối trọng trong các phép thử ma sát. Hệ số ma sát được tính bằng cách chia lực ma sát cho tải trọng. Các thanh sai số trong cả hai biểu đồ cho biết độ lệch chuẩn. Gr là graphene[14]. Đối với graphene bị oxy hóa[17] ma sát giữa hai lớp graphene trượt tăng lên khi có sự xuất hiện của các nhóm epoxide và hydroxyl, đồng thời bị chi phối bởi các tương tác tĩnh điện và liên kết hydro không ổn định. Hệ thống oxide sẽ vượt qua rào cản năng lượng cao hơn nhiều do sự hình thành liên kết hydrogen, do đó dẫn đến sự tiêu tán năng lượng cao.

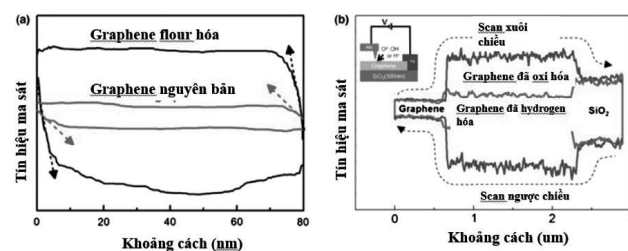
Ngược lại, đối với các tấm graphene hydro hóa một mặt, ma sát giảm đáng kể so với graphene nguyên chất. Các tính toán DFT cho tải trọng thay đổi từ 1 đến 9nN đã dự đoán hệ số ma sát nằm trong khoảng 0,01-0,05 khi liên kết hydrogen được đưa vào. Ma sát thấp hơn được giải thích là do các electron tập trung giữa nguyên tử carbon và nguyên tử hydrogen được gắn vào, tạo ra lực đẩy của hai tấm tương tác và do đó làm giảm năng lượng tương tác.

Đối với tương tác của hai bề mặt trượt, vì không có ứng suất cơ học ngoài mặt phẳng nào được đặt vào, nên những thay đổi về ma sát được giới hạn ở những thay đổi do ứng suất trong mặt phẳng. Kết quả đo kính hiển vi lực ma sát sử dụng đầu AFM dẫn điện[18] đã chứng minh rằng ma sát ở cấp độ nano tăng lên so với graphene lần lượt là hai, sáu và bảy lần đối với graphene hydrogen hóa, flour hóa và oxy hóa (Hình 4).

Mặc dù có sự gia tăng ma sát đối với graphene biến tính, tính chất kết dính đã được chứng minh là giảm đối với graphene floride hóa hoặc hầu như không thay đổi đối với graphene hydrogen hóa và oxy hóa với những thay đổi hóa

học do giảm diện tích tiếp xúc của Van der Waal. Điều này chứng minh rằng ngoài độ bám dính có yếu tố khác ảnh hưởng đến tính ma sát của các bề mặt. Ko và cs[18] gợi ý rằng các tính chất cơ học thay đổi đáng kể khi có sự lai hóa sp^3 tạo ra do sự biến tính hóa học graphene, và thực tế này đóng vai trò chính trong sự gia tăng ma sát ở quy mô nano. Ngoài việc giảm độ cứng trong mặt phẳng và năng lượng bám dính, sự biến đổi hóa học làm giảm tính linh hoạt ngoài mặt phẳng của graphene, điều này có liên quan đến sự gia tăng độ cứng chịu lực theo phương vuông góc và uốn cong của graphene biến tính. Đối với graphene được flour hóa, hydrogen hóa và oxy hóa, tính linh hoạt ngoài mặt phẳng làm cho ma sát tăng.

Graphene dạng tiểu cầu có thể làm giảm sự mài mòn của chất bôi trơn rắn khác. Kandanur và cs[19] đã chứng minh rằng tỷ lệ mài mòn của polytetrafluoroethylene (PTFE) đã giảm bốn lần khi 10% KL tiểu cầu graphene được kết hợp cùng với chất độn nano. Các tiểu cầu graphene, thu được bằng cách tách lớp và khử graphene oxide. Tỷ lệ mài mòn giảm khi tiểu cầu được đưa vào 'Teflon'. Kandanur và cs[19] gợi ý rằng, ban đầu, PTFE bị mài mòn cao do tạo ra các vết nứt dưới bề mặt lan truyền song song với giao diện trượt và cuối cùng kết nối với bề mặt, trong khi chất độn có thể can thiệp vào sự hình thành các vết nứt, do đó làm chệch hướng chúng và hạn chế mài mòn.



Hình 4. (a) Các cấu hình ma sát được đo trên graphene và graphene flo hóa (tải áp dụng là 70nN). (b) Các cấu hình ma sát thu được từ các lần quét tiến và lùi trên SiO_2 và graphen một lớp, bao gồm các vùng nguyên sơ, vùng bị oxygen hóa và hydrogen hóa. Hình nhỏ cho thấy sơ đồ thí nghiệm của quá trình oxygen hóa và hydrogen hóa graphene[18]

Tỷ lệ mài mòn của vật liệu tổng hợp polyetylen có trọng lượng phân tử rất cao (UHMWPE) đã giảm đáng kể bằng cách thêm các tấm nano graphene oxide ở khoảng nồng độ từ 0,1 đến 3% trọng lượng như minh họa trong Hình 5. UHMWPE được sử dụng rộng rãi làm ổ trục cho cấy ghép hông và đầu gối[20]. Mặc dù hệ số ma sát tăng nhẹ, nhưng độ mài mòn giảm 40% khi hàm lượng graphene oxide trong UHMWPE đạt 3% trọng lượng (Hình 5). Tác

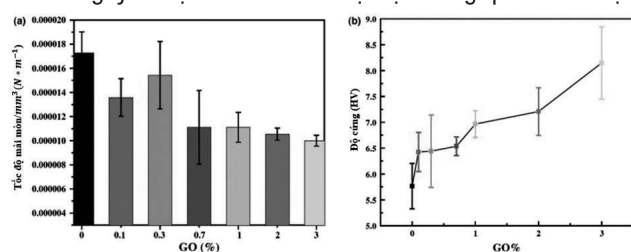
dụng chống mài mòn này được cho là do xu hướng hình thành màng bảo vệ tăng lên và tăng độ bền cơ học cũng như độ cứng, giúp hạn chế sự hình thành và phát triển của vết nứt vì mô mà gây ra sự mài mòn UHMWPE trong quá trình trượt.

V. KẾT LUẬN

Graphene có bản chất nguyên tử mỏng và có khả năng bao phủ lên các vật thể vi mô và nano bằng cách phân bố các mảnh graphene trong dung dịch thành huyền phù. Lớp phủ có khả năng giảm ma sát và chống mài mòn do đó kéo dài tuổi thọ của các thiết bị, điều này khuyến khích các nhà khoa học thực hiện nhiều nghiên cứu theo hướng này.

Các nghiên cứu đã cho rằng bản chất của cơ chế ma sát của graphene dựa trên các phương pháp tính toán ở các quy mô khác nhau từ nano cho đến meso. Trong hầu hết các nghiên cứu thực nghiệm và tính toán ở quy mô nano trên graphene, tính chất ma sát được chứng minh là phụ thuộc vào khả năng xếp chồng các lớp, các đặc điểm cấu trúc, bản chất của các bề mặt trượt. Khi tham gia bôi trơn các lớp graphene che phủ bên bề mặt kim loại, lực liên kết giữa các lớp graphene yếu nên các lớp graphene có thể tách ra làm giảm ma sát trượt giữa các bề mặt.

Ngoài việc được sử dụng như một chất bôi trơn rắn, graphene còn có thể được sử dụng như một chất phụ gia trong chất bôi trơn thông thường, chẳng hạn như cho dầu, dung môi và các loại chất lỏng khác. Tỷ lệ mài mòn của vật liệu tổng hợp polyetylen có trọng lượng phân tử rất cao đã giảm đáng kể bằng cách thêm các tấm nano graphene oxide ở khoảng nồng độ từ 0,1 đến 3% trọng lượng. Tác dụng chống mài mòn này được cho là do xu hướng hình thành màng bảo vệ tăng lên và tăng độ bền cơ học cũng như độ cứng, giúp hạn chế sự hình thành và phát triển của vết nứt vi mô mà gây ra sự mài mòn của vật liệu trong quá trình trượt.



Hình 5. (a) Sự thay đổi tốc độ mài mòn của vật liệu tổng hợp GO/UHMWPE như là một hàm của hàm lượng GO sau các thử nghiệm mài mòn. (b) Độ cứng vi mô của vật liệu tổng hợp GO/UHMWPE với các hàm lượng GO khác nhau[20]

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Diana Berman, Ali Erdemir and Anirudha V. Sumant, *Graphene: a new, emerging lubricant*, Materials Today Volume 17, Number 1 January/February 2014

[2]. Diana Berman, Ali Erdemir, Alexander V. Zinovev, Anirudha V. Sumant, *Nanoscale friction properties of graphene and graphene oxide*, Diamond and Related Materials, Volume 54, April 2015, Pages 91-96

[3]. D. Berman, A. Erdemir, A.V. Sumant, *Few layer graphene to reduce wear and friction on sliding steel surfaces*, Carbon 54 (2013) 454-459.

[4]. D. Berman, A. Erdemir, A.V. Sumant, *Reduced wear and friction enabled by graphene layers on sliding steel surfaces in dry nitrogen*, Carbon 59 (2013) 167-175.

[5]. Q. Li, C. Lee, R.w. Carpick, J. Hone, *Substrate effect on thickness-dependent friction on graphene*, Phys. Status Solidi B 247 (2010) 2909-2914.

[6]. N.V. Medhekar, A. Ramasubramaniam, R.S. Ruoff, V.B. Shenoy, *Hydrogen bond networks in graphene oxide composite paper: structure and mechanical properties* ACS Nano 4 (2010) 2300

[7]. Liang Xu, Tian-bao Ma, Yuan Zhong Hu and Hui Wang (2011), *Vanishing stick-slip friction in few-layer graphenes: the thickness effect*, Nanotechnology, 22(28), 285708.F10

[8]. Liang Xu, Tian-bao Ma, Yuan Zhong Hu and Hui Wang (2011), *Molecular dynamics simulation of the interlayer sliding behavior in few-layer graphene*, Carbon, 50(3), 1025-1032.

[9]. P. Liu, Y.W. Zhang (2011), *A theoretical analysis of frictional and defect characteristics of graphene probed by a capped single-walled carbon nanotube*, Carbon, 49(11), 3687-3697.

[10]. A. Smolyanitsky, J.P Killgore and V.K Tewary (2012), *Effect of elastic deformation on frictional properties of few-layer graphene*, Physical Review B, 85(3), 035406-035412.

[11]. Qunyang Li, Changgu Lee, Robert W. Carpick, James Hone (2010), *Substrate effect on thickness-dependent friction on graphene*, Physica Status Solidi B, 247(11-12), 2909-2914.

[12]. Xiaofeng Feng, Sangku Kwon, Jeong Young Park and Miquel Salmeron (2013), *Superlubric Sliding of Graphene Nanoflakes on Graphene*, ACS Nano, 7(2) 1718-1724.

[13]. Changgu Lee, QunYang Li, William Kalb, Helmuth Berger, Robert W. Carpick (2010), *Frictional Characteristics of Atomically Thin Sheets*, Science, 328(5974), 76-80.

[14]. Kwang-Seop Kim, Hee-Jung Lee, Changgu Lee, Seoung-Ki Lee, Houk Jang, Jong-Hyun Ahn, Jae-Hyun Kim, Hak-Joo Lee (2011), *Chemical vapor deposition-grown graphene: the thinnest solid lubricant*, ACS Nano, 5(6), 5107-5114.

- [15]. Young Jun Shin, Ryan Stromberg, Rick Nay, Han Huang, Andrew T.S Wee, Hyunsoo Yang (2011), *Frictional characteristics of exfoliated and epitaxial graphene*, Carbon, 49(12), 4059–4073.
- [16]. Junfei Ou, Jinqing Wang, Sheng Liu, Bo Mu, Junfang Ren, Honggang Wang and Shengrong Yang (2010), *Tribology Study of Reduced Graphene Oxide Sheets on Silicon Substrate Synthesized via Covalent Assembly*, Langmuir, 26(20), 15830–15836.
- [17]. Lin-Feng Wang, Tian-Bao Ma, Yuan-Zhong Hu and Hui Wang (2012), *Atomic-scale friction in graphene oxide: An interfacial interaction perspective from first-principles calculations*, Physical Review B, 86(12), 125436
- [18]. Jae-Hyeon Ko, Sangku Kwon, Ik-Su Byun, Jin Sik Choi, Bae Ho Park, Yong-Hyun Kim and Jeong Young Park (2013), *Nanotribological Properties of Fluorinated, Hydrogenated, and Oxidized Graphenes*, Tribol Lett, 50(2), 137–144.
- [19]. S.S. Kandanur, M.A. Rafiee, F. Yavari, M. Schrameyer, Z.-Z. Yu, T.A. Blanchet, N. Koratkar (2012), *Suppression of wear in graphene polymer composites*, Carbon, 50 3178–3183.
- [20]. Zhixin Tai, Yuanfeng Chen, Yingfei An, Xingbin Yan and Qunji Xue (2012), *Tribological Behavior of UHMWPE Reinforced with Graphene Oxide Nanosheets*, Tribology Letters, 46(1), 55–63. ❖

Phản biện: TS UÔNG THỊ NGỌC HÀ

NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG TÍNH CHẤT CỦA TINH QUẶNG ZIRCON VIỆT NAM LÀM NGUYÊN LIỆU CHO QUÁ TRÌNH SẢN XUẤT ZrO_2

(Tiếp theo trang 49)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Piconi C, Maccauro G., *Zirconia as a ceramic biomaterial*, Biomaterials, 2019, 99, 1 - 25.
- [2]. Xiuping Zhang, Xin Wu, Jing Shi, *Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review*, J. Mater. Res. Technol., 9(4), 2020, 9029 - 9048.
- [3]. Musyarofah, Novia Dwi Lestari, Rizka Nurlaila, et al., *Synthesis of high-purity zircon, zirconia, and silica nanopowders from local zircon sand*, Ceramics International, 45 (6), 2019, 6639 - 6647.
- [4]. Jingchong Liu, Jing Song, Tao Qi, Changqiao Zhang, Jingkui Qu, *Controlling the formation of Na_2ZrSiO_5 in alkali fusion process for zirconium oxychloride production*, Advanced Powder Technology, 2015, dx.doi.org/10.1016/j.appt.2015.08.005.
- [5]. H Poernomo, Sajima and N D Pusporini, *Synthesis of Zirconium Oxychloride and Zirconia Low TENORM by Zircon Sand from Landak West Kalimantan*, Journal of Physics: Conf. Series 1436, 2020, 012106.
- [6]. Moch Setyadji and Sudaryadi, *Leaching kinetics of Sodium Zirconate in Hydrochloric Acid based on shrinking core models*, Journal of Physics: Conf. Series 1436, 2020, 012011.
- [7]. Rifki Septawendar, Ahmad Nuruddin, Suhanda Sutardi, Eneng Maryani, Lia A. T. W. Asri, Bambang Sunendar Purwasasmita, *Low-temperature metastable tetragonal zirconia nanoparticles (NpMTZ) synthesized from local zircon by a modified sodium carbonate sintering method*, Journal of the Australian Ceramic Society, doi.org/10.1007/s41779-018-0193-4, 2018.
- [8]. Hong-Qian SUN, Jing SONG, Shuai SUN, Jing-Kui QU, Wei LÜ, Tao QI, *Decomposition kinetics of zircon sand in NaOH sub-molten salt solution*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 29, 2019, 1948 - 1955.
- [9]. Vũ Thị Thu Hà, *Nghiên cứu chế tạo zirconium dioxide từ nguồn tinh quặng zircon vùng Bình Thuận đạt chất lượng sử dụng trong ngành công nghiệp gốm sứ cao cấp; Thuyết minh đề tài nghiên cứu ứng dụng và phát triển công nghệ cấp quốc gia, Thuộc “Chương trình Khoa học và Công nghệ trọng điểm cấp quốc gia phục vụ đổi mới, hiện đại hóa công nghệ khai thác và chế biến khoáng sản đến năm 2025”*, 2022.
- [10]. U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2020. ❖
- Trân trọng cảm ơn Bộ Công thương đã cấp kinh phí thực hiện đề tài theo Hợp đồng số 001.2022.CNKK.QG/HĐKHCHN, ngày 10/01/2022.

Phản biện: PGS, TS ĐẶNG TUYẾT PHƯƠNG