

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОРОШКОВОГО ДІОКСИДУ КРЕМНІЮ НА ПЛИННІСТЬ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ РІЗНОГО ВИДУ

Кононенко А. В., Ланін В. Ю., Кононенко Ю. І., Скребцов А. А., Фасоляк А. В.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Анотація. У роботі досліджено вплив домішок пірогенного (AEROSIL® 200) та осажденного (SIPERNAT® 22S) діоксиду кремнію на покращення плинності сферичних і несферичних титанових порошків, що використовуються в адитивних технологіях.

Ключові слова: діоксид кремнію, порошки титану, плинність, пірогенний, осаджений, дисперсія.

Вступ

Рівень і сталість показників технологічних властивостей металевих сферичних порошків є визначальними факторами доцільності їх використання в адитивних технологіях. Необхідний рівень плинності порошку є передумовою ефективного компактування й точного його дозування у формуванні шарів матеріалу, що визначає загальну якість отриманого за адитивною технологією напівфабрикату й значно впливає на формування монолітної структури.

Існують несферичні титанові порошки, які є перспективними для використання в адитивних технологіях. Такі порошки отримують за HDH-процесом (гідрування заготовки зі сплаву, подрібнення її і дегідрування отриманого порошку). Несферичні порошки мають суттєвий недолік порівняно зі сферичними – їм не властива плинність.

Для покращення плинності в порошкову суміш додають допоміжні речовини, що створюють на поверхні частинок порошку прошарок, який зменшує сили взаємодії між частинками та полегшує їх рух [1–3]. Допоміжними речовинами в цьому разі можуть бути дрібнодисперсні порошкові матеріали на основі діоксиду кремнію SiO_2 [4–7], а саме продукти AEROSIL® 200 (пірогенний діоксид кремнію) та SIPERNAT® 22S (осаджений діоксид кремнію) виробництва компанії *Evonik Industries AG*.

Застосування цих речовин для покращення плинності металевих порошків, які використовують в адитивних технологіях, є маловивченим.

Аналіз публікацій

Актуальність використання порошкових металевих матеріалів у сучасних реаліях виробництва спонукала науковців аналізувати причини їх злипання, а також знаходити способи розв'язання цієї проблеми. У роботах

[1–4] висвітлено теоретичні засади, на основі яких досліджують поведінку плинності та ущільнення порошків за умови застосування допоміжних речовин. Також автори пропонують кількісно оцінити ризик злежування порошків і обґрунтовують використання SiO_2 як антизлежувача й модифікатора їх властивостей. Зазначено, що застосування SiO_2 зменшує сили зчеплення частинок металевого порошку й покращує його зберігання і транспортування.

Практичну ефективність від використання SiO_2 для розв'язання питань, описаних вище, описано в дослідженнях [5–7].

Біомедичні властивості матеріалів, що містять порошковий діоксид кремнію, розглянуто в працях [8–12].

У роботі [11] подано механізм дії частинок різних форм діоксиду кремнію як антизлежувача.

У низці публікацій [13–17] продемонстровано результати досліджень впливу SiO_2 на процес спікання титану, його пористість, механічні властивості та хімічну стабільність.

Мета й постановка завдання

Мета роботи – дослідити вплив вмісту дрібнодисперсних порошкових матеріалів на основі діоксиду кремнію SiO_2 , а саме продуктів AEROSIL® 200 та SIPERNAT® 22S, на плинність різних видів титанового порошку, що використовують в адитивних технологіях.

Матеріали й методика досліджень

Порошки кремнію, проаналізовані в цій роботі, є дрібнодисперсними частинками, властивості яких наведено в табл. 1.

Для експерименту обрано такі титанові порошки: несферичний HDH BT1-0 (фракційного складу -63+50 мкм), сферичний Ti-6Al-4V (фракційного складу -63+40 мкм). Ці матеріали нині є найбільш перспективними для використання в адитивних технологіях.

Таблиця 1 – Деякі властивості діоксиду кремнію, що використовується в адитивних технологіях

Властивість і одиниця виміру	Значення
Питома площа поверхні за ISO 5794-1, м ² /г	190
Середній розмір частинок за ISO 8130-1, мкм	100
Насипна щільність за ISO 787-11, г/л	260
SiO ₂ за ISO 3262-17, %	98
Na ₂ O за ISO 3262-18, %	1
Fe ₂ O ₃ за ISO 5794-1, %	0,03
SO ₃ , %	0,8

За допомогою приладу Холла відповідно до ГОСТ 20899-98 проведено вимірювання плинності дослідних порошків. Вага однієї проби становила 50 г. Об'ємну частку домішки діоксиду кремнію збільшували від 0,2 % до 1,0 % з кроком 0,2 %. Максимальна кількість доданого порошку (1,0 %) була обрана з тих міркувань, щоб запобігти можливого мікролегування виробів, які отримують за адитивними технологіями [8–17].

Перемішування проводили за рекомендаціями виробника домішки [5–6], а саме: змішували в лабораторній «п'яній бочці» (змішувач шейкерного типу) за нормальних умов упродовж 30 хв. Дослідні порошки використовували після сушки у вакуумі.

Було оцінено дисперсії значень плинності залежно від вмісту допоміжної речовини.

Результати досліджень

Плинність дослідних титанових порошків залежно від вмісту порошкового діоксиду кремнію AEROSIL® 200 та SIPERNAT® 22S було виміряно п'ять разів і обчислено середні значення (табл. 2).

У процесі дослідження встановлено (див. табл. 2), що додавання порошкової домішки AEROSIL® 200 у концентрації від 0,2 % до 1,0 % практично не змінювало середній показник плинності порошку HDH BT1-0. Значення залишалося стабільним у межах 11,57–11,85 с, що свідчить про незначний вплив цієї домішки на несферичний титановий порошок. Аналогічна тенденція спостерігалася у використанні діоксиду кремнію SIPERNAT® 22S: за умови концентрації 0,2 % плинність становила 11,93 с, а в разі 1,0 % – 12,93 с. Це відповідає зниженню плинності на 8 %. Водночас вихідний порошок без жодних домішок не демонстрував плинності взагалі, що підтверджує необхідність використання допоміжних речовин для забезпечення технологічного оброблення.

Для сферичного порошку Ti-6Al-4V базове значення плинності становило 7,42–7,44 с. Однак навіть незначне додавання діоксиду кремнію негативно впливало на цей показник. Додавання 0,2 % AEROSIL® 200 та SIPERNAT® 22S призводило до зниження плинності на 19 % та 18 % відповідно. Подальше збільшення концентрації до 1,0 % спричиняло ще більш виражене її погіршення: плинність зменшувалась на 44 % (AEROSIL® 200) та 45 % (SIPERNAT® 22S). Встановлено, що кожне додавання 0,2 % діоксиду кремнію спричиняє середнє зниження плинності на 4 % для AEROSIL® 200 та на 6 % для SIPERNAT® 22S. Отримані результати свідчать про чутливість сферичного титанового порошку до наявності дрібнодисперсних домішок, що необхідно брати до уваги в проектуванні складів для адитивного виробництва. Результати підрахунку дисперсії значень плинності залежно від вмісту порошків AEROSIL® 200 та SIPERNAT® 22S показано в табл. 3.

Таблиця 2 – Середні значення плинності

SiO ₂	Порошок	Середнє значення плинності від вмісту SiO ₂ , % (мас.)					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
22S	HDH Ti	Відс.	11,93	12,18	12,71	13,17	12,93
200	-63+50 мкм	Відс.	11,57	11,85	11,76	11,62	11,78
200	Ti-6Al4V	7,42	9,15	9,6	10,03	12,09	13,18
22S	-63+40 мкм	7,44	9,09	9,8	11,48	11,95	13,55

Таблиця 3 – Дисперсія значень плинності

SiO ₂	Порошок	Дисперсія від вмісту SiO ₂ , % (мас.)					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
22S	HDH Ti	Відс.	0,014	0,017	0,044	0,006	0,002
200	-63+50 мкм	Відс.	0,003	0,021	0,01	0,034	0,031
200	Ti-6Al4V	0,008	0,058	0,026	0,036	0,03	0,043
22S	-63+40 мкм	0,005	0,066	0,097	0,126	0,041	0,012

Унаслідок аналізу інформації, поданої в табл. 3, встановлено, що для несферичного порошку HDH Ti спостерігається нестабільна зміна значень дисперсії показника плинності в процесі додавання SIPERNAT® 22S: з 0,014 (0 %) до максимуму – 0,044 (0,4 %), після чого значення різко зменшується до 0,002 (1 %). У разі AEROSIL® 200 дисперсія коливається в межах 0,003–0,034 без чітко вираженої тенденції.

Результати розрахунку дисперсії значень плинності для сферичного порошку Ti-6Al-4V демонструє іншу поведінку. У використанні AEROSIL® 200 дисперсія зростає з 0,008 (0 %) до піку – 0,058 (0,2 %), після чого спостерігається нерівномірне зниження й повторне зростання до 0,043 (1 %). Для SIPERNAT® 22S властиве різке зростання дисперсії до 0,126 за умови 0,6 %, після чого вона знижується до 0,012, якщо 1 %.

Загалом SIPERNAT® 22S має більш виражений вплив на дисперсію значень плинності, особливо у сферичних порошках, що може бути пов'язано з морфологією частинок діоксиду кремнію. Діоксид кремнію AEROSIL® 200 демонструє менш негативний вплив.

Отримані результати для значень плинності порошку залежно від кількості AEROSIL® 200 і SIPERNAT® 22S та їх поведінку зображено на графіку (рис. 1).

Виявлені закономірності можна пояснити з огляду на морфологічні особливості частинок порошку. Несферичний титановий порошок HDH BT1-0 має значно розвинену поверхню, що сприяє інтенсивному зчепленню частинок.

Під час висипання такого порошку крізь воронку Холла частинки взаємодіють між собою на великій площі, що ускладнює їх переміщення, спричиняє підвищене тертя й може призводити до заклинювання в отворі.

Додавання навіть незначної кількості допоміжної речовини (наприклад, 0,2 % діоксиду кремнію) сприяє утворенню на поверхні частинок ковзного тонкого шару.

Він зменшує площу контакту між частинками до точкових зіткнень, що значно знижує тертя та покращує плинність. Частинки легше переміщуються одна щодо одної та вздовж стінок воронки, що забезпечує стабільний потік порошку. Такий механізм дії домішки не суперечить викладеному в працях [5–7]. У разі сферичного порошку Ti-6Al-4V ситуація є протилежною.

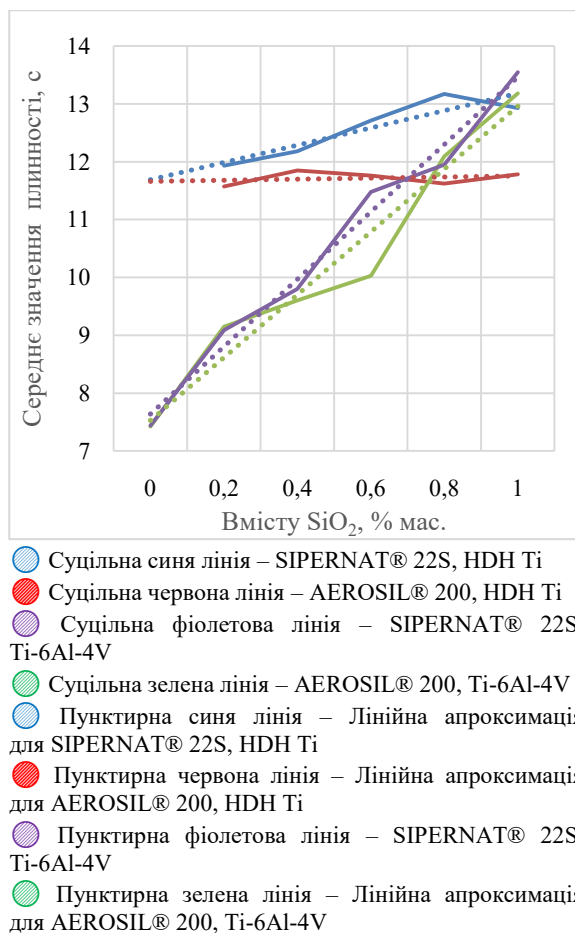


Рис. 1. Графік впливу діоксиду кремнію AEROSIL® 200 і SIPERNAT® 22S на плинність дослідних порошків

Завдяки геометрично правильній формі частинок такий порошок вже має добру плинність, оскільки тертя між частинками мінімізоване.

Проте додавання діоксиду кремнію, частинки якого мають нерегулярну форму з гострими виступами, призводить до осідання їх на порошинках титану, що порушує гладкість поверхні та сферичність останніх. Утворюється шорсткий поверхневий шар, який збільшує площу контакту між частинками, що зі свого боку підвищує тертя. Унаслідок цього плинність металевго порошку знижується. Отже, ефективність допоміжної речовини залежить від морфології базового порошку: для несферичних частинок вона є корисною, а для сферичних, навпаки, може погіршувати плинність.

Висновки

Вплив діоксиду кремнію на плинність залежить від морфології металевго порошку.

Проведені лабораторні дослідження дають підстави рекомендувати допоміжні ма-

теріали AEROSIL® 200 і SIPERNAT® 22S для збільшення плинності несферичних металевих порошків.

Використання таких матеріалів для сферичних порошків не завжди буде доцільним.

Література

1. W. Jenike, Storage and Flow of Solids, Utah Engineering Experiment Station, Utah Univ., Salt Lake City (USA), 1970, Bulletin No. 123, p. 207. <https://doi.org/10.2172/5240257>
2. H. Rumpf Die Wissenschaft des Agglomerierens / Chemie Ing. Techn., 46 (1974), pp. 1–11 <https://doi.org/10.1002/cite.330460102>
3. Schultze, D. (2018). Partikelmesstechnik. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58776-8>
4. Nanomaterials as Flow Regulators in Dry Powders / I. Zimmermann, M. Eber, K. Meyer, Z. Phys. January 2004 Zeitschrift für Physikalische Chemie 218 (1-2004): 51–102 <http://dx.doi.org/10.1524/zpch.218.1.51.25388>
5. Evonik Industries AG. (2015). SIPERNAT® specialty silica and AEROSIL® fumed silica as flow aid and anticaking agent. Технічна інформація TI 1351. URL: https://products.evonik.com/assets/46/73/TI_1351_SIPERNAT_and_AEROSIL_as_flow_aid_and_anticaking_agent_EN_EN_244673.pdf (дата звернення: 19.09.2025)
6. Evonik Industries AG. (2015). SIPERNAT® specialty silica and AEROSIL® fumed silica as flow aid and anticaking agent. Технічна інформація TI 1351. URL: <https://www.aerosil.com/ru/download/ti/ti-1351.pdf> (дата звернення: 19.09.2025)
7. Evonik Industries AG. (б.д.). AEROSIL® and SIPERNAT® for free flowing and non-caking sugars and sugar alcohols. Технічна інформація TI 1386. URL: https://products.evonik.com/assets/50/66/TI_1386_AEROSIL_and_SIPERNAT_for_free_flow_and_non_caking_sugars_and_sugar_alcohols_EN_EN_245066.pdf (дата звернення: 19.09.2025)
8. SCCS (Scientific Committee on Consumer Safety). (2015). Opinion on Silica, Hydrated Silica, and Silica Surface Modified with Alkyl Silylates (nano form). [Електронний ресурс]. SCCS/1545/15. URL: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_175.pdf (дата звернення: 19.09.2025)
9. Morin, L., Torres, A., Collin-Faure, V., Fenel, D., Sergeant, J.-A., & Rabilloud, T. (2023). About the Transient Effects of Synthetic Amorphous Silica: An In Vitro Study on Macrophages. International Journal of Molecular Sciences, 24 (1), p. 220. <https://doi.org/10.3390/ijms24010220>
10. Xiong, Y., Qian, C., & Sun, J. (2012). Fabrication of porous titanium implants by three-dimensional printing and sintering at different temperatures. Dental Materials Journal, 31(5), 815–820. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.06.017>
11. Tokuyama Corporation. Fumed Silica REOLOSIL. URL: https://www.tokuyama.co.jp/eng/products/advanced_materials/reolosil.html (дата звернення: 16.09.2025)
12. Kim, S., Park, J. Y., Gu, Y. M., Jang, I. S., Park, H., Oh, K. K., Lee, J. H., & Chun, J. (2021). Eco-friendly and facile synthesis of size-controlled spherical silica particles from rice husk. Nanoscale Advances, 3(25), 6965–6972. <https://doi.org/10.1039/D1NA00668A>
13. Porous titanium materials produced by sintering of titanium powder with silica additions. Автори: K. K. Chawla, R. K. V. Kumar, K. K. Chawla (2007). Journal of Materials Science.
14. Liu, Sf., Xi, Zp., Tang, Hp. et al. Sintering Behavior of Porous Titanium Fiber Materials. J. Iron Steel Res. Int. 21 (2014), pp. 849–854. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60152-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60152-7)
15. Chang, JM., Liu, GL. & Tung, HM. Effects of Sintering Temperature on the Porosity and Mechanical Behavior of Porous Titanium Scaffolds Prepared by Freeze-Casting. J. of Materi Eng and Perform 28 (2019), pp. 5494–5500. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04291-w>
16. Pribytkov, G. A., Vagner, M. I., Korzhova, V. V. et al. Sintering of Titanium, Silicon, and Titanium Silicide Powder Mixtures. Powder Metall Met Ceram 52 (2014), pp. 613–619. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9568-4>
17. K.P Rao, Y.J Du In situ formation of titanium silicides-reinforced TiAl-based composites. Materials Science and Engineering: A, Vol. 277, Issues 1–2, 31, pp. 46–56 [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00557-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00557-2)

Кононенко А. В., аспірант кафедри «Теоретична та прикладна механіка»,
andru3952@gmail.com;

Ланін В. Ю., аспірант кафедри «Теоретична та прикладна механіка»,
vyacheslav.lanin@gmail.com;

Кононенко Ю. І., старший викладач кафедри «Фізичне матеріалознавство»,
juliakon7335@gmail.com;

Скребцов А. А., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка»,
andreyskrebtssov04@gmail.com,
тел.: +3(80) 66-091-17-92;

Фасоляк А. В., канд. фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри «Математика».
Національний університет «Запорізька політехніка»

An Investigation into the Effect of Silicon Dioxide Powder on the Flowability of Various Titanium Powder Types

Problem. The flowability of metallic powders is a critical parameter in additive manufacturing (AM), directly influencing layer formation, compaction, and dosing accuracy. While spherical titanium powders generally exhibit acceptable flow characteristics, non-spherical powders – particularly those produced via the HDH (Hydride-Dehydride) process – suffer

from poor flowability, limiting their applicability in AM. Existing research offers limited insight into the use of auxiliary agents to improve powder flow, especially for non-spherical titanium powders. **Goal.** This study aims to investigate the effect of two types of silicon dioxide (SiO_2) additives – pyrogenic (AEROSIL® 200) and precipitated (SIPERNAT® 22S) – on the flowability of spherical and non-spherical titanium powders. The objective is to determine whether these additives can enhance powder flow and to assess their suitability for use in AM processes without compromising material integrity. **Methodology.** Titanium powders of two types were selected: non-spherical HDH Ti BT1-0 ($-63+50\ \mu\text{m}$) and spherical Ti-6Al-4V ($-63+40\ \mu\text{m}$). Flowability was measured using a Hall flowmeter in accordance with GOST 20899-98. SiO_2 additives were introduced in volumetric concentrations ranging from 0.2% to 1.0%, with increments of 0.2%. Each measurement was repeated five times to obtain average values and dispersion data. The study also analyzed the physical characteristics of the additives, including particle size, surface area, and chemical composition. **Results.** For non-spherical HDH Ti powder, both AEROSIL® 200 and SIPERNAT® 22S improved flowability, with SIPERNAT® 22S showing a more pronounced effect. In contrast, the addition of SiO_2 to spherical Ti-6Al-4V powder resulted in a significant decrease in flowability – up to 45% with SIPERNAT® 22S at 1.0% concentration. The findings suggest that while SiO_2 additives can mitigate interparticle adhesion in non-spherical powders, they disrupt the smooth surface and ideal geometry of spherical powders, increasing friction and reducing flow. **Originality.** This study provides a

comparative analysis of pyrogenic and precipitated SiO_2 additives on titanium powders of differing morphology, a topic previously underexplored. It offers a mechanistic explanation for the contrasting effects observed, grounded in particle surface interactions and additive morphology. **Practical Value.** The results support the targeted use of SiO_2 additives to enhance the flowability of non-spherical titanium powders in AM, potentially expanding the material base for cost-effective manufacturing. Conversely, the findings caution against indiscriminate use of such additives with spherical powders, preserving their inherent flow advantages.

Keywords: Silicon dioxide, titanium powders, flowability, fumed, precipitated, dispersion.

Kononenko Andrii, PhD student, Department of Theoretical and Applied Mechanics, andrju3952@gmail.com;

Lanin Vyacheslav, PhD student, Department of Theoretical and Applied Mechanics, vyacheslav.lanin@gmail.com;

Kononenko Julia, Senior Lecturer, Department of Physical Materials Science, juliakon7335@gmail.com;

Skrebtsov Andrii, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Theoretical and Applied Mechanics, andreyskrebtsov04@gmail.com, tel: +3(80) 66-091-17-92;

Fasoliak Anton, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Department of Mathematics.

National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine