

усіх ланках металургійного виробництва з урахуванням як короткотермінових соціально-економічних завдань так і довготермінових стратегій.

### Список літератури

1. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking/ International Energy Agency, OECD/IEA, Paris, 2020. 190 p.
2. Украинская металлургия: современные вызовы и перспективы развития/ А.И. Амоша, В.И. Большаков, А.А. Минаев, Ю.С. Залознова, Л.А. Збаразская, Ю.В. Макогон и др. Донецк: НАН Украины, Ин-т экономики пром-сти, 2013, 114 с.
3. Energy technology perspectives: harnessing electricity's potential. OECD/IEA, Paris, 2014, 382 p.
4. World Steel Association. Statistical reports. <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html> (дата звернення: 02.12.2021).
5. Energy Technology Perspectives: Catalysing energy technology transformations. OECD/IEA, Paris, 2017, 33 p.

УДК 69.14.018.298:621.789

**В. Ж. Шемет<sup>1</sup>, А. Ю. Семенко<sup>2</sup>, М. М. Ворон<sup>2</sup>, А. М. Тимошенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

<sup>2</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*e-mail:* [semenko.au@gmail.com](mailto:semenko.au@gmail.com)

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ Fe-Mn-Al-C СТАЛЕЙ

Fe-Mn-Al-C сталі отримали велику увагу щодо застосування в конструкціях автомобілів завдяки чудовому поєднанню низької густини, високого рівня механічних властивостей та стійкості до корозії. Загальновідомо, що хімічний склад, особливо вміст вуглецю, який підвищує міцність і зменшує густину сталей, відіграє важливу роль у контролі мікроструктури та характеристик металу [1-4]. Проаналізувавши результати роботи інших фахівців у даній області відносно впливу вуглецю у сплаві з високим вмістом марганцю, можна стверджувати наступне: при не надто високому вмісті алюмінію, зі збільшенням вмісту вуглецю кількість аустеніту поступово збільшується і двофазна

мікроструктура ферит/аустеніт перетворюється на однофазний аустеніт; міцність сталі монотонно збільшується, зокрема, збільшується і пластичність до вмісту вуглецю  $\sim 0,8-0,9$  % мас., а після перевищення вказаного вмісту вуглецю починає зменшуватись.

Статистичний аналіз показує, що координаційна здатність деформації аустеніту вища, ніж здатність фериту [5]. Отже, зі збільшенням вмісту аустеніту пластичність двофазної сталі помітно збільшується, тоді як міцність – не так стрімко. Для однофазних аустенітних сталей межа текучості зростає, але здатність до подовження та зміцнення при роботі зменшується зі збільшенням вмісту С, що пов'язано з виділенням скупчень к-карбідів. Пошук оптимальних складів високоміцних високомарганцевих сталей залишається актуальним завданням, особливо – для литого стану. В ході досліджень механічних властивостей вказаних матеріалів, які характеризувались відносно високим вмістом алюмінію та середнім вмістом марганцю, методом аргоно-дугового переплаву було одержано зразки високоміцної аустенітної Fe-Mn-Al-C сталі різного хімічного складу.

Оптимальним шляхом вивчення механічних властивостей дослідних зразків сталі є поєднання випробування на розтяг з методом мікроіндентування. Тому, на першому етапі досліджень, для оцінки фізико-механічних властивостей статичним випробуванням на розтяг стандартні п'ятикратні зразки випробовували на автоматизованій розривній машині UTM-100. Результати випробувань Fe-Mn-Al-C сталі на розтяг у литому стані показали, що для збільшення пластичності раціонально дотримуватись співвідношення Fe-(25-27Mn)-(8-10)Al-( $<1$ )C, оскільки при концентрації Fe-(19-21)Mn-(10-12)Al-(0,93-1,02)C сталь при розриві проявила крихкість (пластичність  $< 1\%$ ), у той час як при збільшенні вмісту Mn до 25 % мас. при вмісті Al до 10 % мас. та C до 1 % мас. пластичність зросла до 5%.

Після випробування зразків Fe-Mn-Al-C сталі різного хімічного складу на розтяг було здійснено їх відпал при 1100 °C протягом 1 години, а також випробування на твердість методом Бринелля кулькою діаметром 5 мм, силою натиску 750 кгс та витримкою протягом 30 с. Результати випробувань показали, що: вплив вмісту вуглецю як на міцність так і на твердість, зокрема з урахуванням попереднього досвіду, показує, що оптимальний його вміст має становити  $< 1$  % мас., оскільки при дотриманні цієї умови була зафіксована максимальна міцність 1123,7 МПа; вплив вмісту марганцю на міцність, а також на твердість після відпалу показали, що збільшення його частки у сталі від 21 до 25 (% мас.) позитивно впливає на механічні властивості; при вмісті алюмінію 9-10 % мас. зразки показали середню твердість на рівні 215-245 НВ.

На наступному етапі досліджень було здійснено мікроіндентування дослідних зразків, оскільки можливості цього методу дозволяють дослідити наявність і однорідність виділення к-карбідної фази зразків з різним вмістом марганцю та алюмінію. Відповідні результати представлено на рисунку.

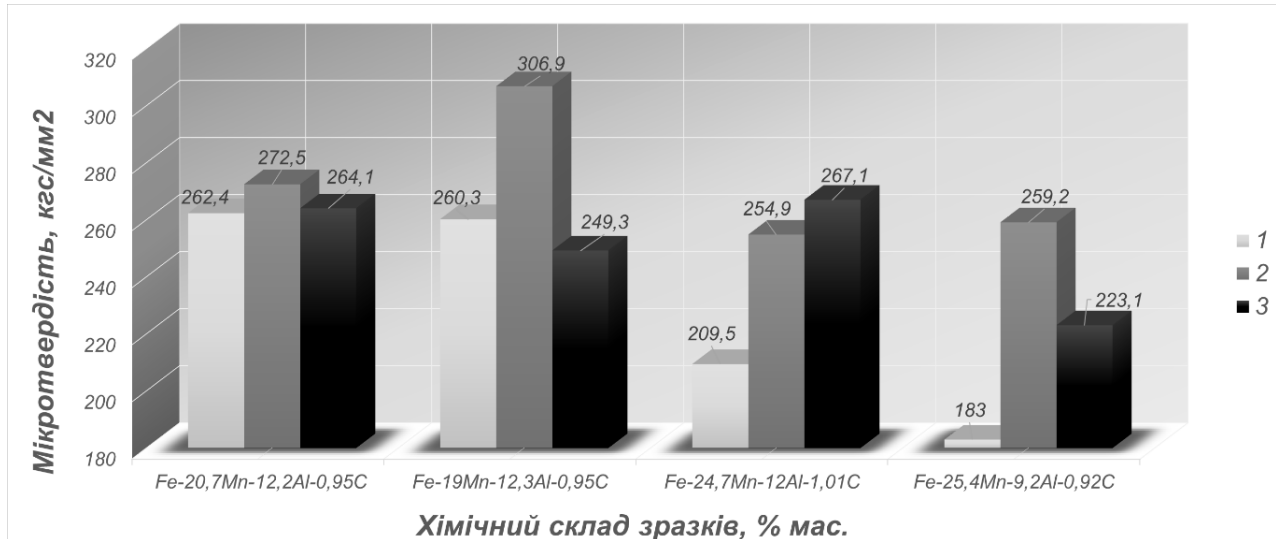


Рис. – Мікротвердість дослідних зразків Fe-Mn-Al-C сталі чотирьох складів, де: 1 – аустенітна фаза; 2 – феритна фаза; 3 – скупчення к-карбідів

Відповідно до широкого ряду досліджень, можна сказати, що, одержані показники механічних властивостей в литому стані є досить високими, проте їх додаткове підвищення (міцності до 1500 МПа і пластичності до 45-65%) можливе після застосування додаткової термо-деформаційної обробки.

Робота виконувалась у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Дослідження проведено в рамках виконання Проєкту 2020.02/0283 «Нові високопластичні надміцні сталі Fe-Mn-Al-C: вплив технологічних параметрів на формування їх структури та фізико-хімічні властивості» за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України.

### Список літератури

1. Min Chul Ha, Jin-Mo Koo, Jae-Kon Lee, Si Woo Hwang, Kyung-Tae Park. (2013). Tensile deformation of a low-density Fe-27Mn-12Al-0.8C duplex steel in association with ordered phases at ambient temperature. Materials Science and Engineering: A, Volume 586, pp. 276-283, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.094>

2. E. Welsch, D. Ponge, S.M. Hafez Haghghat, S. Sandlöbes, P. Choi, M. Herbig, S. Zaefferer, D. Raabe. (2016). Strain hardening by dynamic slip band refinement in a high-Mn lightweight steel. *Acta Materialia*, Volume 116, pp. 188-199, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.037>
3. I. Gutierrez-Urrutia, D. Raabe. (2012). Multistage strain hardening through dislocation substructure and twinning in a high strength and ductile weight-reduced Fe–Mn–Al–C steel. *Acta Materialia*, Volume 60, Issue 16, pp. 5791-5802, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.07.018>
4. M.J. Yao, E. Welsch, D. Ponge, S.M.H. Haghghat, S. Sandlöbes, P. Choi, M. Herbig, I. Bleskov, T. Hickel, M. Lipinska-Chwalek, P. Shanthraj, C. Scheu, S. Zaefferer, B. Gault, D. Raabe. (2017). Strengthening and strain hardening mechanisms in a precipitation-hardened high-Mn lightweight steel. *Acta Materialia*, Volume 140, pp. 258-273, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.049>
5. Ch. Haase and L. A. Barrales-Mora. (2019). From High-Manganese Steels to Advanced High-Entropy Alloys. *Metals*, 9, 726. <https://doi.org/10.3390/met9070726>

УДК 669

**М. В. Ягольник, А. М. Круглов, М. М. Бойко, Н. В. Полякова, С. В. Журавльова**

Український державний університет науки і технологій, Дніпро

### **ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ШАРУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКТУ**

З теорії агломераційного процесу відомо, що для забезпечення успішного спікання шихти необхідно організувати інтенсивне надходження повітря до зони горіння. Мінімальна швидкість фільтрації повітря через шар, при якій можливий перебіг реакцій горіння твердого палива та утворення рідкої фази, повинна становити не менше  $0,15 \dots 0,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ . Агломераційна шихта відноситься до сипучих матеріалів, що складаються з окремих частинок, які контактують один з одним, між якими знаходяться канали або пори. Прийнято вважати, що газ у шарі сипучого матеріалу або обтікає окремі частинки, або рухається по звивистих, змінного перерізу, каналах.

Значний вплив на газодинаміку шару, що агломерується, має сегрегації. Результати переважної більшості досліджень показують, що сегрегація класів крупності шихти позитивно впливає на структуру та газопроникність шару.