Дорошенко В.С., Клименко С.І.
(ФТІМС НАН України, Київ)

ОГЛЯД ТРІЩИНОСТІЙКИХ ФЕРИТО-АУСТЕНІТНИХ ЧАВУНІВ З КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ

E-mail: doro55v@gmail.com

Чавуни з кулястим графітом (ЧКГ) – це сімейство матеріалів, які вигідно конкурують зі сталлю для застосування у виробництві машинобудівних та будівельних конструкцій. ЧКГ характеризується мікроструктурою, яку можна описати як «сталеву матрицю з високим вмістом кремнію, яка оточує кулястий графіт». Кулястий графіт та кремній дозволяють здійснювати твердотільні термообробні перетворення, які неможливі зі сталлю [1], зокрема, після отримання на всю товщину стінки виливка з насиченого вуглецем аустеніту. При кристалізації рідини в тверду речовину вуглець і кремній забезпечують набагато нижчу (порівняно зі сталлю) температуру плавлення, властивості самопідживлення, захист від окислення поверхні та можливість утворення безкарбідної матриці. З іншого боку, графітові сфероїди впливають на пластичну деформацію ЧКГ під навантаженням після початку утворення шийок і/або навіть запобігають початку утворення шийок [1]. За характеристиками матеріал ЧКГ часто розглядають як альтернативу литій, кованій і зварній сталі.

Серед досліджень по створенню такої металевої матриці ЧКГ, що забезпечує високі механічні властивості та підвищену тріщиностійкість, відомі роботи по утворенню бейнітної структури, що практично не містить цементиту і складається лише з фериту та аустеніту [2-4]. Цей матеріал отримав назву безкарбідного бейнітного ЧКГ, або аусферитного ЧКГ. В роботах [2, 3] досліджено вплив легувальних елементів, температури ізотермічного гартування та кількості термічно стабілізованого залишкового аустеніту на статичну тріщиностійкість бейнітного ЧКГ. Чавун виплавляли в індукційній печі з корегуванням хімічного складу щодо кремнію та легувальних елементів. Після цього при температурі 1480-1500 °С в процесі позапічного оброблення рідкого металу було проведено

сфероїдизацію за Sandwich-методом і вторинне модифікування для полегшення графітизації. Досліджено ЧКГ двох хімічних складів [2, 3] (масова частка, %): легованого ЧКГ (зразки №№ 1-3, див. табл. 1): 3,01 C; 2,97 Si; 0,14 Mn; 0,007 S; 0,07 P; 0,044 Cr; 0,0073 N; 0,033 Mg; 0,25 Mo; 0,060 Cu; 0,59 Ni, а також нелегованого ЧКГ (зразки №№ 4-6): 3,18 C; 2,90 Si; 0,27 Mn; 0,007 S; 0,07 P; 0,043 Cr; 0,0077 N; 0,032 Mg; 0,037 Cu; 0,035 Ni. Для отримання безкарбідної бейнітної структури металевої матриці ЧКГ піддавали ізотермічному гартуванню в соляних ваннах. Термообробка досліджених складів ЧКГ включала аустенізацію та ізотермічне гартування за режимами, представленими в табл. 1, де також вказано стандартні механічні властивості, що визначені при статичному навантаженні на гладких циліндричних зразках відповідно до ГОСТ 1497-84. Структуру шести зразків (див. табл. 1) досліджено за допомогою світлової мікроскопії, а також трансмісійної електронної мікроскопії [2, 3]. Ці дослідження показали, що в структурі ЧКГ після ізотермічного гартування в дослідженому інтервалі бейнітного перетворення (290–390 °C), цементиту практично не виявлено (Fe_3C < 3 % об.).

Таблиця 1 – Режими ізотермічного гартування легованого і нелегованого ЧКГ та їх механічні властивості [2, 3]

Хімічний склад ЧКГ	Номер зразка	Аустенізація		Ізотермічне гартування		$\sigma_{0.2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %
		T, °C	τ, хв	*T,* °C	τ, хв			
Легований	1	930	60	290	30	998	1301	4,5
	2	890	60	340	30	850	1000	7,5
	3	950	60	390	30	777	907	9,0
Нелегований	4	860	60	290	65	1187	1291	5,0
	5	900	60	340	35	974	1115	12,1
	6	900	60	390	30	772	1040	15,4

Тріщиностійкість при статичному навантаженні визначено не за в'язкістю руйнування K_{IC}, а за межею тріщиностійкості I_C (згідно ГОСТ 25.506-85) в процесі триточкового вигину без суто крихкого руйнування [3]. Ця характеристика не вимагає запису діаграми «сила-деформація». Необхідно знати лише значення навантаження $P = P_{max}$. При обчисленні межі тріщиностійкості I_C використано

відомі формули коефіцієнта інтенсивності напруження K, в яких $P = P_{max}$, що дозволило вважати: $I_C \geq K_{IC}$. У разі руйнування за умов значної пластичності реалізується нерівність $I_C > K_{IC}$ [3].

На рис. 1 представлено значення межі тріщиностійкості I_C досліджених чавунів залежно від вмісту залишкового аустеніту $A_{зал.}$ у металевій матриці (дані по легованих чавунах представлені у верхній групі, обмеженій суцільними лініями на рис. 1) [3]. З рис. 1 видно, що максимальні значення I_C реалізуються у разі, коли в структурі бейнітного ЧКГ залишковий аустеніт міститься в межах 30–35 %. Цілком імовірно, цей аустеніт має оптимально високу стабільність по відношенню до утворення мартенситу деформації. Збільшення кількості залишкового аустеніту до 50-60 % зазвичай викликає зменшення його легованості вуглецем, що знижує стійкість аустеніту, і мартенсит деформації, що утворюється, сприяє падінню тріщиностійкості [2, 3].

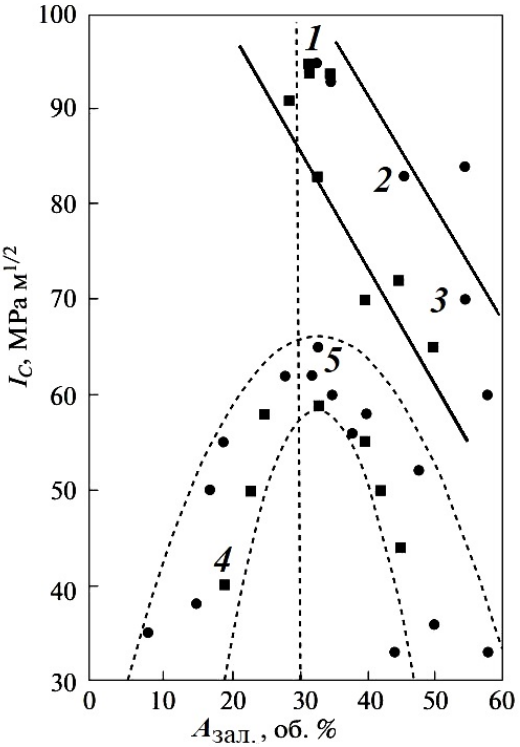

Рис. 1. Вплив кількості залишкового аустеніту на межу тріщиностійкості I_C (суцільні лінії – для легованого ЧКГ, штрихові лінії – для нелегованого ЧКГ)

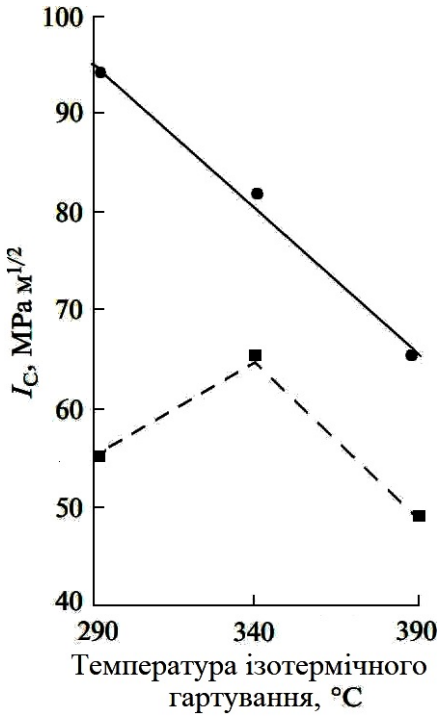

Рис. 2. Вплив температури ізотермічного гартування на межу тріщиностійкості I_C (суцільні лінії – легований ЧКГ, штрихові – нелегований ЧКГ)

Леговані чавуни при тій самій кількості залишкового аустеніту $A_{зал.}$ мають у два рази вищі значення I_C порівняно з I_C нелегованих чавунів, що також пов'язано з підвищенням деформаційної стабільності аустеніту при введенні легувальних елементів Ni, Cu і Mo [3]. На рис. 2 показано вплив температури ізотермічного гартування на межу тріщиностійкості безкарбідних бейнітних ЧКГ. Для отримання максимальних значень I_C у нелегованих чавунах оптимальне співвідношення фаз у структурі досягається після загартування при 340 °С, а для легованих чавунів найкраща тріщиностійкість – при 290 °С.

За висновками роботи [3] носієм міцності бейнітного чавуну є бейнітний ферит з високою щільністю дислокацій та наявністю нанорозмірного цементиту (Fe_3C < 3 % об.), що розташовується як усередині, так і за межами бейнітного фериту. Зазвичай підвищення межі плинності та міцності призводить до окрихчування матеріалу, тобто зниження K_{IC}. Тому основне завдання створення нових матеріалів полягає в забезпеченні одночасно високих міцності та тріщиностійкості. Саме нанокристалічні матеріали можуть забезпечити оптимальне поєднання цих властивостей, досягаючи позитивного ефекту не за рахунок дорогих легувальних компонентів, а лише внаслідок зміни структури [5].

Описані методи досягнення максимальних значень тріщиностійкості ЧКГ за рахунок поєднання міцності бейнітного фериту з високою пластичністю залишкового аустеніту (у кількості 30-35 %), зокрема, співставні з результатами роботи по підвищенню зносостійкості ЧКГ для змінних деталей сільгосптехніки та транспорту [6], в якій рекомендовано досягати 27-35 % залишкового аустеніту в бейнітному ЧКГ. Також відомі аналогічні до цього рекомендації термообробки ріжучих тріщиностійких елементів з ЧКГ для бульдозерів та іншої землерийної техніки [7]. При цьому доречно навести приклади того, що такі елементи землерийної та ґрунтообробної техніки (рис. 3) виливають за моделями, що газифікуються (ЛГМ), а науково-технологічні основи цього процесу удосконалюються у відділі проф. О.Й. Шинського. Такі литі зуби, долота, коронки, ковші, леміші застосовують як в гірничодобувній, сільськогосподарській та

будівельній галузях, так і в оборонному секторі, зокрема для зведення фортифікаційних і інженерних споруд для укриття тощо.

Рис. 3. Литі органи землерийної техніки і їх моделі з цеху ЛГМ ФТІМС НАНУ

Крім того, в якості прикладів застосування тріщиностійких виливків запатентовано способи виготовлення корпусів боєприпасів [8] та броньованих перешкод [9]. З огляду екстремальних умов експлуатації (імпульсне руйнування чи протидія такому руйнуванню) цих обох металовиробів з ЧКГ високі показники міцності і пластичності виливка досягають створенням у ньому бейнітної структури з залишковим аустенітом (в кількості 30-35 %), що в процесі експлуатації зазнає деформаційного мартенситного перетворення.

Аналогічний спосіб термообробки бронефутерувальних плит для дробарок з високовуглецевої сталі запатентовано Л.С. Маліновим та ін.; в структурі сталі отримують 25-30 % залишкового аустеніту [10] для підвищення механічних властивостей цих плит за рахунок деформаційного мартенситного перетворення та динамічного старіння мартенситу і аустеніту. На це витрачається значна частина енергії зовнішньої дії, і менша її доля йде на руйнування. Нині також наявна значна потреба у виготовленні тріщиностійких контактних (витратних) органів протимінних тралів (коткових, ножових і бойкових), для чого можуть стати корисними описані дослідження.

Література:

1. Zanardi, F., Mapelli, C. & Barella, S. Reclassification of Spheroidal Graphite

Ductile Cast Irons Grades According to Design Needs. Inter Metalcast 14, 622–655 (2020). https://doi.org/10.1007/s40962-020-00454-x.

2. Valkov K.G., Georgiev M.N., Andreev Ch.A. Crack resistance of austempered ductile irons in dependence on silicon content and parameters of austempering // Engineering science. Bulgerien Academy of Science. 2010. V. XLVII. № 1. P. 86–95.

3. Вълков К.Г. Изследване на влиянието на химическия състав и параметрите на термична обработка върху структурата и механичните свойства на изотермичнозакаления сферографитен чугун: Автореф. дис… д-ра / ТУ - София. София, 2015. – 35 с.

4. Rundman K.B. It's About Austenite and Carbon. Mate – A story of the Physical Metallurgy of ADI. Part II, 2006. – P. 1–9.

5. Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие/ Под общей редакцией Н.Е. Денисовой. – Пенза. Изд-во: ПГУ, 2006. – 248 с.

6. Волощенко С.М. Створення наукових засад структуроутворення в високоміцному чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту: автореф. дис. … докт. техн. н. - К., 2018. – 40 с.

7. Хужаназаров Б.Ф. Выбор материала и метода повышения износостойкости режущих элементов бульдозеров // Механика ва технология илмий журнали. – 2022. – № 2. – С. 218-223.

8. Патент 139559 Україна, МПК B22D 7/00, B22D 23/00. Спосіб лиття корпусів боєприпасів з високоміцного чавуну у ливарних формах с сипкого піску. – 10.01.2020, Бюл. № 1.

9. Патент 139560 Україна, МПК B22D 7/00, B22D 23/00, F41H 5/00. Спосіб виробництва броньової перешкоди з високоміцного чавуну у ливарних формах з сипкого піску. – Опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.

10. Патент 64796 Україна, МПК C21D 1/00. Спосіб термообробки сталі для бронефутерувальних плит. – Опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.