

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

**ОГЛЯД ТРИЩИНОСТІЙКИХ ФЕРИТО-АУСТЕНИТНИХ ЧАВУНІВ З
КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В
ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ**

E-mail: doro55v@gmail.com



АНОТАЦІЯ. Чавуни з кулястим графітом (ЧКГ) є матеріалами, що ефективно конкурують зі сталлю у машинобудуванні та будівництві завдяки унікальній мікроструктурі з графітовими сфероїдами. Для підвищення механічних властивостей ЧКГ застосовують ізотермічне гартування, що забезпечує формування бейнітної структури з залишковим аустенітом. Досліджено вплив хімічного складу та параметрів термообробки на тріщиностійкість ЧКГ. Встановлено, що оптимальна кількість залишкового аустеніту (30–35 %) сприяє максимальній стійкості до утворення тріщин. Описано методи покращення тріщиностійкості та перспективні напрями застосування ЧКГ у техніці та оборонному секторі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: чавун з кулястим графітом, бейнітна структура, термообробка, тріщиностійкість, залишковий аустеніт.

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 вилівка 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, кованих 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 С; 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 С; 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 °С), цементиту практично не виявлено ($Fe_3C < 3 \%$ об.).

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].

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	σ_B , 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

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].

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.

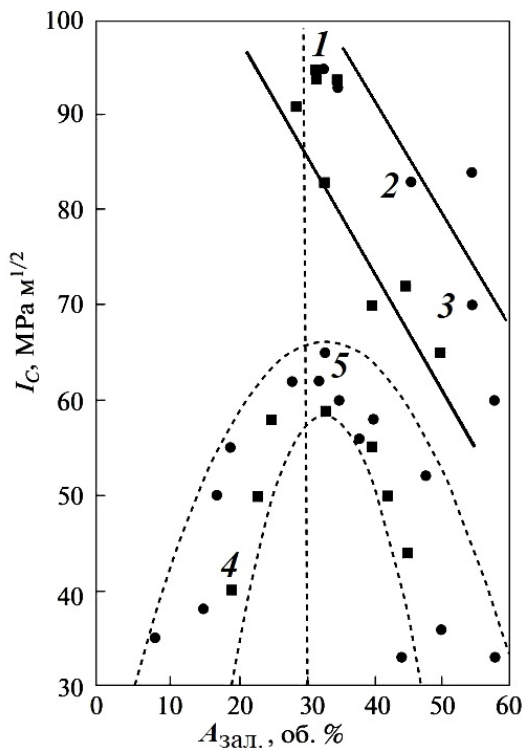


Рис. 1. Вплив кількості

залишкового аустеніту на межу тріщиностійкості I_C (суцільні лінії – для легованого ЧКГ, штрихові лінії – для нелегованого ЧКГ)

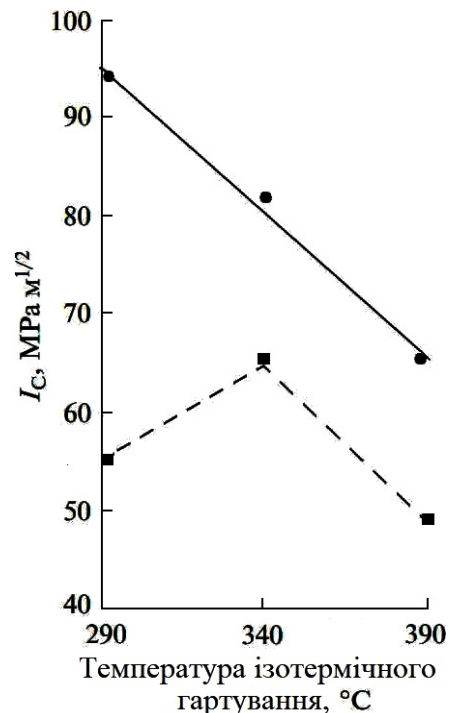


Рис. 2. Вплив температури

ізотермічного гартування на межу тріщиностійкості I_C (суцільні лінії – легований ЧКГ, штрихові – нелегований ЧКГ)

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].

Нові матеріали і технології в машинобудуванні, № 5, 2024

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) виливаються (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.

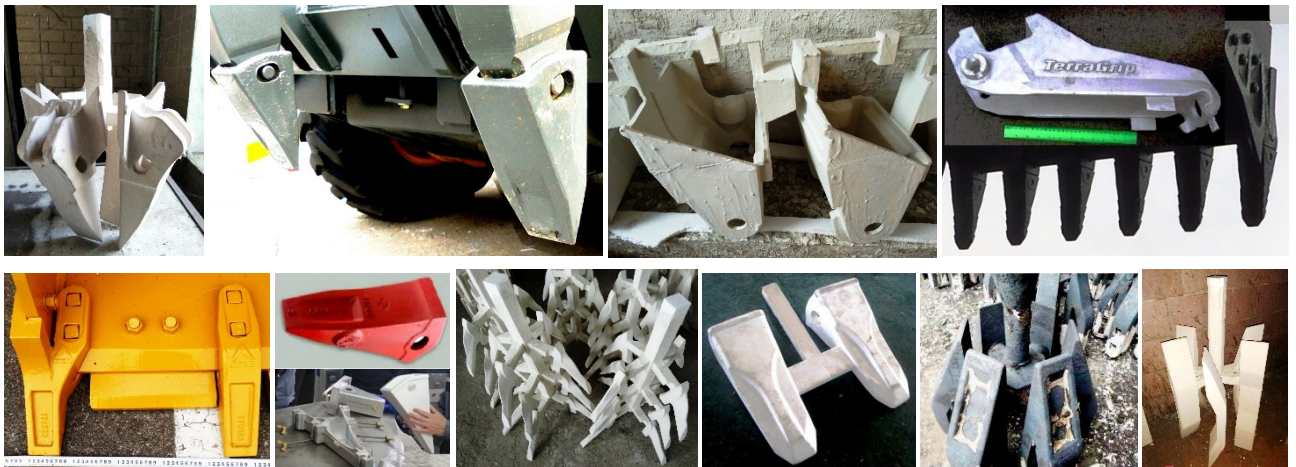


Рис. 3. Литі органи землерийної техніки і їх моделі з цеху ЛГМ ФТІМС НАН України

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 вилівка досягають створенням у ньому

бейнітної структури з залишковим аустенітом (в кількості 30-35 %), що в процесі експлуатації зазнає деформаційного мартенситного перетворення.

Аналогічний спосіб термообробки броньфутерувальних 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 В22D 7/00, В22D 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 В22D 7/00, В22D 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 С21D 1/00. Спосіб термообробки сталі для бронештукатурвальних плит. – Опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.



ABSTRACT. Spheroidal graphite cast irons (SGCI) are materials that effectively compete with steel in engineering and construction due to their unique microstructure with graphite spheroids. To enhance SGCI mechanical properties, isothermal quenching is applied, forming a bainitic structure with retained austenite. The study investigates the influence of chemical composition and heat treatment parameters on SGCI crack resistance. It is established that an optimal retained austenite content (30–35%) ensures maximum crack resistance. Methods for improving crack resistance and promising applications of SGCI in engineering and defense sectors are described.

KEYWORDS: spheroidal graphite cast iron, bainitic structure, heat treatment, crack resistance, retained austenite.