

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ОБРОБЛЮВАНІСТЬ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

Лалазарова Н.О., Донченко Д.О., ХНАДУ, Путятіна Л.І.,
Український державний університет залізничного транспорту

Анотація. Використання високоміцного чавуну з кулястим графітом у машинобудуванні стримується недостатньою його оброблюваністю різанням. Чавун характеризується значною хімічною та структурною неоднорідністю, що однозначно пов'язана з оброблюваністю і визначається коефіцієнтом неоднорідності. Для покращення оброблюваності запропоновано термічну обробку, за допомогою якої можна спрямовано змінювати структуру, тобто зменшувати неоднорідність.

Ключові слова: високоміцний чавун з кулястим графітом, неоднорідність, оброблюваність, термічна обробка.

Вступ

Сучасний рівень розвитку техніки вимагає використання високоміцних чавунів із кулястим графітом (ВЧКГ), що мають високий рівень конструкційної міцності, а саме: високу твердість і міцність у поєднанні зі значною пластичністю й ударною в'язкістю.

ВЧКГ має широкий діапазон експлуатаційних властивостей. У зв'язку з цим його використовують у багатьох галузях техніки замість литої і кованої сталі, сірого та ковкого чавунів. Наприклад, номенклатура відливоч з високоміцного чавуну, освоєна в автомобілебудуванні та сільськогосподарському машинобудуванні: колінчасті й розподільні вали; блоки циліндрів; кронштейни та пальці ресор; кришки підшипників; поршневі кільця; картер заднього моста; зубчасті колеса; шатуни та ін. ВЧКГ знаходить вживання при виготовленні деталей високої втомної міцності, зносо- та корозійної стійкості [1–5].

Однак більш широке використання високоміцного чавуну стримується його невисоким рівнем оброблюваності [6].

Аналіз публікацій

Оброблюваність різанням – це комплекс понять, що визначається станом оброблюваного матеріалу, різального інструменту і характером їх взаємодії. Вона є найважливішим чинником, що впливає на продуктивність, якість і собівартість продукції. Як показників оброблюваності доцільно використовувати такі, які характеризують:

1. стан оброблюваного матеріалу (якість поверхні);

2. стан інструменту (знос, стійкість або швидкість різання);

3. взаємодію оброблюваного матеріалу та інструменту (вид стружки, коефіцієнти усадки і тертя, силу різання та її динамічну складову).

Поліпшити оброблюваність ВЧКГ можна такими шляхами:

1. незалежно від процесу різання за рахунок різних впливів на матеріал виробу: зміни властивостей оброблюваного матеріалу, технології отримання чавуну (легування), технології виготовлення заготовки, термічної обробки;

2. впливаючи на інструмент і умови обробки у процесі різання: зміни властивостей різального інструменту, зміни взаємодії заготовки та інструменту.

Перша група об'єднує методи зміни оброблюваності, які використовують до процесу механічної обробки і незалежно від нього, наприклад, при металургійному циклі за рахунок зміни хімічного складу при виготовленні заготовки, за рахунок термічної обробки. Ці методи можуть використовуватися в тому випадку, якщо технологічно і економічно можливо здійснити зміну технології процесу лиття, якщо процеси додаткового легування і термообробки не мають негативного впливу на отримання необхідного комплексу властивостей оброблюваної деталі. Термообробка з метою покращення оброблюваності зазвичай є проміжною операцією, після якої необхідно проводити остаточну обробку, що значно подовжує і здорожує процес.

Оптимальним є такий режим термічної обробки, коли задовільна оброблюваність поєднується з отриманням високого рівня механічних властивостей.

ВЧКГ у литому стані має порівняно низький рівень механічних властивостей, характеризується значною ліквідацією хімічних елементів та структурною неоднорідністю. Тому розробка раціональних, з точки зору комплексу експлуатаційних властивостей, режимів термічної обробки є першочерговим завданням.

До другої групи належать методи підвищення оброблюваності, які реалізуються у процесі обробки різанням: зміна властивостей, конструкції, геометрії інструменту і характеру взаємодії інструменту з оброблюваною заготовкою (режими різання, змащувально-охолоджувальна рідина, різання з підгіривом, з випереджаючим пластичним деформуванням та ін.).

Покращення оброблюваності може здійснюватися шляхом застосування будь-якого одного методу (наприклад, термообробки). Більшої ефективності можна досягти при використанні одночасно декількох методів. Оскільки оброблюваність є комплексним поняттям, то для її покращення необхідно розробити комплекс методів, які стосувалися б і властивостей оброблюваного матеріалу, і властивостей інструменту, і характеру їх взаємодії.

Проведені в роботах [6, 7] дослідження показали, що неоднорідність чавуну є визначальним фактором оброблюваності. У зв'язку з цим всі методи покращення оброблюваності так чи інакше повинні впливати на неоднорідність чавуну безпосередньо або побічно. Методи, які відносяться до першої групи, дозволяють безпосередньо змінювати структурну і хімічну неоднорідність чавуну в процесі легування або термічної обробки. Таким чином, існує проблема покращення оброблюваності чавуну шляхом проведення термічної обробки.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є дослідження впливу термічної обробки на оброблюваність ВЧКГ.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання: 1) провести дослідження впливу режимів термічної обробки на неоднорідність чавуну; 2) визначити коефіцієнт оброблюваності; 3) проаналізувати залежність між показниками оброблюваності й неоднорідністю чавуну.

Покращення оброблюваності високоміцного чавуну

Для проведення досліджень був обраний високоміцний чавун наступного хімічного складу: 3,3–3,8 % С; 2,4–3,2 % Si; $C+1/3 Si = 4,25-4,35$ %; 0,004–0,007 % S; 0,5–0,9% Mn; 0,045–0,008 % P; 0,05–0,1 % Cr; 0,1–0,15 % Ni; 0,04–0,09 % Mg. Цей чавун широко застосовується у промисловості, тому що для його отримання не потрібно дефіцитних легуючих добавок і модифікаторів.

Чавун у вихідному стані характеризується розвинутою ліквідацією всіх хімічних елементів, що входять до його складу. Литий чавун неоднорідний і за структурою, і за розподілом хімічних елементів [1]. Ферит зосереджений в основному в колографітній зоні (рис. 1).

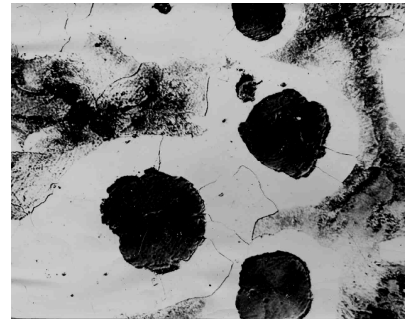


Рис. 1. Мікроструктура досліджуваного чавуну в литому стані, травлення 4 % азотною кислотою, $\times 450$

Як інструментальний матеріал використовували надтвердий інструментальний матеріал на основі нітриду бору томал-10.

Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 з навантаженням 50 г. Дослідження сили різання та її коливань виконували на установці на основі високочутливого однокомпонентного динамометра. Твердість вимірювали на твердомірі Брінелля моделі UIT HBW-1.

Властивості матеріалу визначає його структура. Чавуни, на відміну від сталей, мають неоднорідну структуру: металева матриця у них пронизана включеннями графіту, має місце ліквідація хімічних елементів, неоднорідна структура металевої матриці. Завдяки такій неоднорідній структурі в литому стані ВЧКГ має недостатньо високий рівень показників міцності, ударної в'язкості, зносостійкості.

Структурна та хімічна неоднорідність чавуну визначає оброблюваність, призводить до ударних навантажень на інструмент та до інтенсифікації його зносу. Ударні наванта-

ження особливо є небезпечними для твердо-сплавного, мінералокерамічного інструменту та інструменту із надтвердих матеріалів.

Для отримання різного ступеня неоднорідності та твердості були запропоновані наступні режими термічної обробки (табл. 1).

Таблиця 1 – Режими термічної обробки чавуну

Умовний номер чавуну та його стан	HBW	K_H	K_{σ}/V_0
1. Литий стан	210–220	1,7	0,6/ 3,0
2. Подвійна нормалізація: нагрів до 890 °С, витримка 1,5 години, охолодження на повітрі, нагрів до 860 °С, витримка 1,5 години, охолодження на повітрі	260–270	11,26	0,8/ 4,0
3. Нормалізація з МКІ: нагрів до 860 °С, витримка 1,5 години, охолодження у струмені повітря	275–285	1,36	0,73/ 3,6
4. Гартування і відпуск: нагрів до 860 °С, витримка 1,5 години, охолодження в маслі. Відпуск при 220 °С протягом 2 годин, охолодження на повітрі	470–480	11,9	0,5/ 2,8
5. Сірий чавун із пластинчастим графітом СЧ20	190–200	11,0	11,0/ 5,04

Термічна обробка з міжкритичного інтервалу A_{c1}^n – A_{c1}^k значно впливає на зміну неоднорідності чавуну. У цьому інтервалі температур в рівновазі знаходяться три фази – аустеніт, ферит і графіт [1].

В першу чергу при нагріванні слід враховувати перерозподіл хімічних елементів, таких як вуглець і кремній. Перерозподіл вуглецю починається в умовах досить низької температури (нижче A_{c1}^n). Оскільки розчинність вуглецю у фериті зі зростанням температури помітно не підвищується і вміст кремнію досить великий, то вільний вуглець, що утворюється при розпаді цементиту, спрямовується до графіту. Йде процес звільнення від вуглецю металеві матриці основи і збільшення включень графіту. Розпаду цементиту передують його сфероїдизація. Відстань

між пластинами цементиту збільшується, а вуглець відводиться до графітних включень. Найбільш активний розпад цементиту відбувається за температури, близьких до точки A_{c1}^n .

За досягнення температури A_{c1}^n $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення насамперед починається в ділянках перліту, які мають підвищений вміст вуглецю і знижений – кремнію. Потім аустенізація поширюється на феритні ділянки. Однак оскільки вміст кремнію в окремих зернах α -фази відрізняється, температура початку $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення буде різною. В результаті при нагріванні в МКІ співіснують області аустеніту, графіту і фериту з підвищеним вмістом кремнію.

За збільшення витримки здійснюються процеси насичення вуглецем аустеніту і перерозподіл кремнію. Оскільки розчинність кремнію у фериті значно більше, ніж в аустеніті, у міру розвитку $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення кремній відтісняється від границі γ -фази у ферит, що зберігся. Однак оскільки при переході через A_{c1}^n з'являється велика кількість зародків аустеніту, то утворюється структура з відносно дрібними ділянками, що чергуються, з підвищеним і зниженим вмістом кремнію. Таким чином, неоднорідність за кремнієм вирівнюється. Чим більше формується зародків аустеніту, тим тонше ця неоднорідність.

Нормалізація відрізняється низькою трудомісткістю і дозволяє отримати високі службові характеристики чавуну. У процесі проведення нормалізації охолодження з МКІ здійснюється з невеликою швидкістю – у струмені повітря. Тому відбувається розпад аустеніту з утворенням ферито-карбідної суміші. Витримка після нагрівання забезпечує необхідне насичення аустеніту вуглецем, перерозподіл кремнію. В результаті нормалізації утворюється досить однорідна перліто-феритна структура [1]. Неоднорідність у розподілі кремнію не зникає, а стає тоншою, оскільки ділянки фериту і перліту подрібнюються, ділянки висококремнистого фериту чергуються з ділянками, що містять мало кремнію.

Варіювання режиму охолодження з МКІ призводить до зміни структурної неоднорідності. Що ж стосується неоднорідності за кремнієм, то як при нормалізації, так і після гартування вона залишається практично однаковою. Більш істотної зміни хімічної неоднорідності можна досягти, збільшивши кіль-

кість переходів через критичну точку [1], застосувавши подвійну нормалізацію.

Було запропоновано методику визначення оброблюваності чавуну з урахуванням структурної та хімічної неоднорідності. Найзручнішою для дослідження впливу структури на оброблюваність характеристикою є сила різання: її середнє значення та коливання [6]. Середнє значення сили різання, середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації розраховували за даними осцилограм сил різання (складової P_z) при обробці чавунів з різною мікроструктурою.

Для характеристики неоднорідності чавуну введено коефіцієнт неоднорідності

$$K_n = \frac{V_{вч}}{V_{сч}}, \quad (1)$$

де $V_{вч}$ – коефіцієнт варіації миттєвих значень сили різання для ВЧКГ; $V_{сч}$ – коефіцієнт варіації миттєвих значень сили різання для сірого чавуну.

Коефіцієнт неоднорідності як комплексна характеристика чавуну визначає його оброблюваність; K_o – коефіцієнт відносної оброблюваності

$$K_o = \frac{K_{нсч}}{K_n} = \frac{1}{K_n}, \quad (2)$$

де $K_{нсч}$ – коефіцієнт неоднорідності сірого чавуну, $K_{нсч} = 1$.

Для практичного застосування необхідно знати абсолютну величину оброблюваності. Були визначені розрахункові значення швидкостей різання за стійкості 60 хв для досліджуваних чавунів при обробці надтвердим інструментальним матеріалом – гексанітом-Р

$$V_{60} = K_o \cdot V_{сч}, \quad (3)$$

де $V_{сч}$ – швидкість різання при обробці сірого чавуну, м/с.

Як показників оброблюваності використовували коефіцієнт відносної оброблюваності та швидкості різання за стійкості 60 хв.

Аналіз значень V_{60} , які отримані для чавунів після різних видів термічної обробки, показав, що величина швидкості різання знаходиться у певній залежності від неоднорідності чавуну. Найкращу оброблюваність (найбільше значення V_{60}) має чавун не з найниж-

чою твердістю, а з найменшим ступенем неоднорідності – після подвійної нормалізації ($K_n=1,26$). Найгіршу оброблюваність має чавун після гартування з найбільшим ступенем неоднорідності ($K_n=1,9$). Чавун після подвійної нормалізації характеризується не тільки високим рівнем оброблюваності різанням, а і достатньо високим рівнем механічних властивостей – твердості, що дозволяє рекомендувати цей режим в якості кінцевої термічної обробки.

Висновки

Незважаючи на високий рівень експлуатаційних властивостей високоміцного чавуну, його використання в машинобудуванні стримується недостатньою оброблюваністю різанням.

Високоміцний чавун характеризується значною хімічною та структурною неоднорідністю, що однозначно пов'язана з оброблюваністю і визначається коефіцієнтом неоднорідності K_n .

Для оцінки оброблюваності в роботі запропоновано використовувати універсальний критерій – відносну оброблюваність K_o .

Оскільки оброблюваність залежить від коефіцієнта неоднорідності чавуну, одним зі шляхів її покращення є термічна обробка, за допомогою якої можливо спрямовано змінювати структуру, тобто зменшувати неоднорідність. З точки зору оброблюваності, оптимальною є подвійна нормалізація, яка дозволяє отримати чавун з найменшим коефіцієнтом неоднорідності ($K_n=1,26$), найгіршу – забезпечує гартування та низький відпуск ($K_o=0,5$).

Чавун після подвійної нормалізації характеризується не тільки високим рівнем оброблюваності різанням, а і достатньо високим рівнем твердості, що дозволяє рекомендувати цей режим в якості кінцевої термічної обробки.

Література

1. Солнцев Л.А. Получение чугунов повышенной прочности / Л.А. Солнцев, А.М. Зайденберг, А.Ф. Малый. – Харьков : Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. – 152 с.
2. Покровский А.И. Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колёс / А.И. Покровский, Л.Р. Дудецкая // Литьё и металлургия. – 2015. – №2(79). – С. 126–134.
3. Александров Н.Н. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом – перспективный конструкционный материал XXI века / Н.Н. Алек-

- сандров // Арматуростроение. – №2(53). – 2008. – С. 72–74.
4. Ebrahimpour, S. R. Effect of Different Austempering Temperatures on Wear Properties of Ductile Iron / S. R. Ebrahimpour, A. Abedi, M. Abbasi, M. R. Alizadeh // *Tech. J. Engin. & App. Sci.* – 2013. – 3 (7). – P. 553-561.
 5. Sharma, S. Effect of Austempering Temperature and Time on the Wear Characteristics of Austempered Ductile Iron (ADI) / S. Sharma, R. Gupta // *International Journal of Engineering Research and General Science.* – 2015. – V. 3, 1. – P. 986 - 990.
 6. Батыгин Ю.В. Исследование обрабатываемости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / Ю.В. Батыгин, Н.А. Лалазарова // *Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр.* – 2011. – Вып. 54. – С. 123–126.
 7. Лалазарова Н.А. Оценка обрабатываемости высокопрочного чугуна / Н.А. Лалазарова // *Вісник інженерної академії України.* – 2001. – №3. – Ч.1. – С. 431–433.

References

1. Solntsev L.A., Zaydenberg A.M., Malyiy A.F. (1986). Poluchenie chugunov povyishennoy prochnosti [High-strength cast iron manufacturing], *Harkov, Vischa shkovla* [in Russian].
2. Pokrovskiy A.I., Dudetskaya L.R. (2015) Use of High-strength bainitic cast iron for producing gear wheels [Ispolzovanie vyisokoprochnogo beynitnogo chuguna dlya izgotovleniya zubchatyih kolyos] *Casting and metallurgy*, 2(79), 126-134 [in Russian].
3. Aleksandrov N.N. (2008). Vyisokoprochnyy chugun s sharovidnyim grafitom – perspektivnyy konstruksionnyy material XXI veka [Ductile cast iron is advanced engineering material of XXI]. *Armaturostroenie*, 2(53), 72-74 [in Russian].
4. Ebrahimpour, S. R. Effect of Different Austempering Temperatures on Wear Properties of Ductile Iron / S. R. Ebrahimpour, A. Abedi, M. Abbasi, M. R. Alizadeh // *Tech. J. Engin. & App. Sci.* – 2013. – 3 (7). – P. 553-561.
5. Sharma, S. Effect of Austempering Temperature and Time on the Wear Characteristics of Austempered Ductile Iron (ADI) / S. Sharma, R. Gupta // *International Journal of Engineering Research and General Science.* – 2015. – V. 3, 1. – P. 986 - 990.
6. Batyigin Yu.V., Lalazarova N.A. (2011). Issledovanie obrabatyivayemosti vyisokoprochnogo chuguna s sharovidnyim grafitom [The study of ductile cast iron machinability]. *Vestnik Harkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 54, 123-126 [in Russian].
7. Lalazarova N.A. (2001). Otsenka obrabatyivayemosti vyisokoprochnogo chuguna [Evaluation of high-strength cast iron machinability]. *Vestnik inzhenernoy akademii Ukrainyi*, 3, 431–433 [in Russian].

Лалазарова Наталія Олексіївна – к.т.н., доцент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел.: +38 0953903816, lalaz1932@gmail.com,

Донченко Дмитро Олександрович – студент, +38 099-281-80-66, donchenko3777@ukr.net, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, м. Харків, Україна, вул. Ярослава Мудрого, 25,

Путятіна Лариса Іванівна – к.т.н., доцент, кафедра якості, стандартизації, сертифікації та технології виготовлення матеріалів, тел.:+38 050-874-92-12, larisaputaytina@gmail.com, Український державний університет залізничного транспорту, 61050, Україна, м. Харків, площа Фейєрбаха 7.

HEAT TREATMENT EFFECT ON HIGH-STRENGTH CAST IRON MACHINABILITY

Lalazarova N.O., Donchenko D.O., KhNAHU, Putyatina L.I., Ukrainian State University of Railway Transport

Abstract. Problem. The use of ductile cast iron (DCI) in engineering is constrained by its insufficient cutting ability. There is a problem of improving the machinability of cast iron by performing heat treatment. **Goal.** The aim of the work is to study the effect of heat treatment on DCI machinability. **Method.** The research has been carried out on the basis of high-strength cast iron chemistry widely used in industry. Cast iron is heterogeneous in structure and distributing chemical elements. The hardness and microhardness of cast iron, average values and oscillations of the cutting force have been studied. **Results.** Structural and chemical inhomogeneity of cast iron determines its machinability, causes shock loads on the tool and intensifies its wear. The heterogeneity coefficient was used as a complex characteristic of inhomogeneity. It is determined by instantaneous values of the cutting force. The coefficient of relative machinability has been defined on the basis of the heterogeneity coefficient. The machinability of gray cast iron is taken as 1. Taking into account the machinability factor the cutting speed has been calculated with the stability of 60 min for hexanite-R while high-strength cast iron turning. The heterogeneity of such cast irons has been changed by heat treatment according to different modes. **Scientific novelty.** Heat treatment allows to change structural and chemical heterogeneity of cast irons and to effect on their machinability. That is, DCI machinability depends on the degree of cast iron heterogeneity de-

terminated by the heterogeneity coefficient. **Practical significance.** The technique for determining the heterogeneity and machinability of ductile cast iron has been suggested. The research of the heat treatment effect (heterogeneity) on machinability has been carried out. The studies have shown that after double normalizing cast iron is characterized not only by a high level of cutting ability but also by a sufficiently high level of mechanical properties – hardness. This fact allows to recommend this mode as the final heat treatment.

Key words: ductile cast iron, heterogeneity, machinability, heat treatment.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Лалазарова Н.А., Донченко Д.А., ХНАДУ,

Путятинна Л.И.,
Украинский государственный университет
железнодорожного транспорта

Аннотация. Использование высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в машиностроении сдерживается недостаточной его обрабатываемостью резанием. Чугун характеризуется значительной химической и структурной неоднородностью, которая однозначно связана с обрабатываемостью и определяется коэффициентом неоднородности. Для улучшения обрабатываемости предложена термическая обработка, с помощью которой возможно направленно изменить структуру, то есть уменьшать неоднородность.

Ключевые слова: высокопрочный чугун с шаровидным графитом, неоднородность, обрабатываемость, термическая обработка.