

ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИТОЇ ГРАФІТИЗОВАНОЇ СТАЛІ

З використанням методу планування експерименту та подальшої графічної оптимізації були отримані залежності впливу компонентів литої графітизованої сталі на її властивості. Запропонований оптимальний склад сталі з високими показниками статичної та циклічної міцності, застосування якого у машинобудуванні забезпечить підвищення надійності та довговічності деталей, що працюють в умовах статичних та циклічних навантажень.

Ключові слова: графітизована сталь, структура, механічні властивості, оптимізація складу.

Вступ

Відомо, що графітизовані сталі є залізовуглецеві сплави, в яких вуглець частково знаходиться у вигляді графітових включень. Завдяки більш низькому по відношенню до чавунів вмісту вуглецю (1,2...1,8 %) й, відповідно, графіту ці сплави поєднують у собі, з одного боку, позитивні якості чавунів (висока демпфуюча здатність, низька чутливість до концентраторів напружень, високі технологічні властивості, низька вартість та ін. [1–4]), з іншого – більш високі у порівнянні з чавунами механічні властивості [5–7].

Деталі машин, для яких графітизовані сталі могли б використовуватися як конструкційні матеріали (колінчасті вали, шатуни, сепаратори та вкладиші підшипників та ін.) працюють у достатньо різноманітних умовах, що часто включають в себе як статичні, так й циклічні навантаження з широкими діапазонами частот. Так, наприклад, за даними Пойди А. А. і Хуторяньського М. М. [8] частота робочих коливань колінчастого валу з високоміцного чавуну ВЧ50-2 для дизеля ПД1М, що несе шість циліндрових мас та масу генератора може досягати 22000 коливань за хвилину). Враховуючи цей факт, можна сказати, що одним з визначальних факторів вибору для таких виробів матеріалу є високий рівень його статичної та циклічної міцності як при низьких, так й при високих частотах навантажень. Проте, опір графітизованих сталей руйнуванню при циклічних навантаженнях вивчено недостатньо. Є лише окремі відомості з малоциклової витривалості [9] та циклічної в'язкості руйнування при частоті навантаження до 15Гц [10]. У зв'язку з цим, дослідження опору руйнуванню графітизованих сталей при статичних та циклічних навантаженнях в умовах високих частот, як потенційного конструкційного матеріалу для важконавантажених виробів відповідального призначення, має науковий та практичний інтерес.

Метою роботи було оцінювання впливу вуглецю й кремнію як елементів, що найбільш сильно впливають

на процеси графітизації, а також міді, яка сприяє графітизації вторинного цементиту, покращує розподіл графітових включень і підвищує механічні властивості графітизованих сплавів [11], на формування структури металевої основи, графітної фази й властивості графітизованих сталей. А також визначення оптимального вмісту вказаних хімічних елементів для отримання високих показників статичної й циклічної міцності дослідних сталей.

Матеріали та методика досліджень

Виплавляння різних складів сталей проводили з використанням планування експерименту, де в якості незалежних змінних було прийнято вміст вуглецю (0,5...1,9 %) й кремнію (0,6...2,6 %), а також міді (0...4,0 %). Вміст інших хімічних елементів складав: 0,60...0,70%Mn; 0,15...0,18%Cr; 0,22...0,25%Al і до 0,02%S і 0,03%P. В якості залежних змінних були прийняті статична s_b і циклічна s_{-1} міцність сплаву. В роботі був реалізований повний факторний експеримент другого порядку 2^3 (табл. 1), що містив у собі вісім головних дослідів, а також досліді на «зірковому» й нульовому рівнях.

Аналіз отриманих результатів

Результати металографічного аналізу виплавлених сплавів у литому (не термообробленому) стані показали різноманітність мікроструктур, головним чином, у залежності від вмісту вуглецю і кремнію [12].

Для покращення структури й властивостей дослідних сталей отримані вилівки піддавали гартуванню (нагрівання до 860 °С, витримка 1 год, охолодження у маслі) з подальшим середнім відпусканням (500 °С, 2 год). Проведене термооброблення дослідних сплавів сприяло утворенню сорбіту відпускання у структурі металевої основи та майже не змінило кількість, форму та розподіл графітових включень. У подальшому з виплавлених та термооброблених злитків вирізали зразки для механічних випробувань, результати яких наведені у табл. 2.

Таблиця 1 – Центральний композиційний план повнофакторного експерименту 2³

| Інтервал варіювання й рівні факторів | | Дослідні фактори | | |
|----------------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | X ₁ (C, %) | X ₂ (Si, %) | X ₃ (Cu, %) |
| Нульовий рівень: X ₀ = 0 | | 1,2 | 1,6 | 2,0 |
| Інтервал варіювання | 1,0 | 0,4 | 0,6 | 1,2 |
| | 1,682 | 0,7 | 1,0 | 2,0 |
| Нижній рівень: X = - 1,0 | | 0,8 | 1,0 | 0,8 |
| Верхній рівень: X = + 1,0 | | 1,6 | 2,2 | 3,2 |
| Зіркові точки | X = 1,682 | 0,5 | 0,6 | 0 |
| | X = 1,682 | 1,9 | 2,6 | 4,0 |

Таблиця 2 – Механічні властивості дослідних сплавів

| № дослідю | Хімічний склад | | | | | | Механічні властивості | | |
|-----------|----------------|------|-------|------|-------|------|-----------------------|------|-----------------------|
| | C, % | | Si, % | | Cu, % | | σ _B , МПа | δ, % | σ ₋₁ , МПа |
| | р. | ф. | р. | ф. | р. | ф. | | | |
| 1 | 0,8 | 0,78 | 1,0 | 1,01 | 0,8 | 0,84 | 820,0 | 19 | 384 |
| 2 | 1,6 | 1,54 | 1,0 | 1,07 | 0,8 | 0,85 | 760,0 | 12 | 315 |
| 3 | 0,8 | 0,78 | 2,2 | 2,18 | 0,8 | 0,92 | 915,0 | 15 | 385 |
| 4 | 1,6 | 1,73 | 2,2 | 2,29 | 0,8 | 0,87 | 778,0 | 8 | 312 |
| 5 | 0,8 | 0,74 | 1,0 | 1,01 | 3,2 | 3,17 | 970,0 | 17 | 389 |
| 6 | 1,6 | 1,74 | 1,0 | 1,04 | 3,2 | 3,15 | 880,0 | 10 | 322 |
| 7 | 0,8 | 0,72 | 2,2 | 2,17 | 3,2 | 3,25 | 1280,0 | 12 | 409 |
| 8 | 1,6 | 1,78 | 2,2 | 2,25 | 3,2 | 3,19 | 990,0 | 6 | 336 |
| 10 | 0,5 | 0,48 | 1,6 | 1,66 | 2,0 | 1,90 | 720,0 | 22 | 361 |
| 11 | 1,9 | 1,95 | 1,6 | 1,66 | 2,0 | 1,94 | 443,3 | 5 | 264 |
| 12 | 1,2 | 1,23 | 0,6 | 0,62 | 2,0 | 1,95 | 874,7 | 15 | 384 |
| 13 | 1,2 | 1,26 | 2,6 | 2,55 | 2,0 | 2,09 | 730,4 | 8 | 360 |
| 14 | 1,2 | 1,23 | 1,6 | 1,61 | 0 | 0,02 | 745,6 | 14 | 355 |
| 15 | 1,2 | 1,21 | 1,6 | 1,69 | 4,0 | 3,95 | 721,9 | 10 | 342 |
| 16 | 1,2 | 1,27 | 1,6 | 1,65 | 2,0 | 2,01 | 887,0 | 12 | 358 |

Примітка: р. – розрахунковий склад елементів, згідно з табл.1; ф. – фактичний склад, згідно з результатами хімічного аналізу.

Аналіз отриманих даних механічних властивостей показав, що усі дослідні характеристики проявляли значну чутливість до структури сплавів. Було виявлено, що найбільш високими показниками статичної та циклічної міцності характеризувалася сталь, яка містила 0,72 %C; 2,17 % Si і 3,25 %Cu (див. табл. 2, вар. 7). Це пояснюється компактною формою графітових включень, а також дрібнодисперсною сорбітною структурою, що сприяє підвищенню міцності. Звертає на себе увагу сталь, що мала найбільшу пластичність (см. табл. 2, вар. 9). В її структурі було найменша кількість графітної фази та найбільша – високопластичної феритної фази, що в цілому сприяло підвищенню відносного видовження d до 22 %. Найбільш низькими показниками міцності й пластичності характеризувалася сталь вар.10 (см. табл. 2), що можна пояснити найбільшим вмістом у її складі вуглецю, а отже й графітної не компактної фази в структурі, що знижувало механічні властивості.

Регресійна обробка результатів механічних властивостей дозволила отримати низку рівнянь, що опису-

ють залежність механічних властивостей від вмісту вуглецю, кремнію та міді. Після перевірки адекватності моделей і переходу до натуральних змінних були отримані рівняння другого порядку:

$$\sigma_{-1} = 397 + 126C - 76Si - 7Cu - 5CSi + CCu + 6SiCu - 83C^2 + 21Si^2; \quad (1)$$

$$\sigma_B = 312 + 1029C - 63Si + 37Cu - 144CSi - 48CCu + 53SiCu - 372C^2 + 52Si^2 - 4Cu^2; \quad (2)$$

$$\delta = 36,7 - 19,8C - 2,3Si - Cu + 0,5CSi + 0,3CCu - 0,2SiCu + 3,4C^2 - 0,5Si^2. \quad (3)$$

Проведений графічний аналіз отриманих рівнянь показав, що криві залежностей статичної та циклічної міцності від вмісту вуглецю проходять через максимум

у межах 0,8...1,0%С. Про вплив кремнію та міді на показники опору статичного та втомного руйнування можна сказати, що окремий вплив цих елементів дещо підвищував границі міцності та витривалості сталі. Для визначення складу, який би забезпечував оптимальне поєднання властивостей статичної та циклічної міцності графітенованої сталі проводили графічну оптимізацію вмісту вуглецю та міді при вихідному вмісті кремнію 2,2%, за методикою, запропонованою Ковшовим В.Н. [13]. Для визначення оптимального вмісту вказаних елементів був побудований графік двовірних перерізів поверхонь відклику за двофакторним поліномом, у якому попередньо було введено найбільш бажане числове значення дослідних параметрів: $\sigma_b = 1000 \dots 1200$ МПа й $\sigma_{-1} = 1000 \dots 1200$ МПа. Результатом оптимізації було визначення зони оптимального вмісту вуглецю 0,8...1,1% та міді 3,0...3,2% (рис. 1, заштрихована частина).

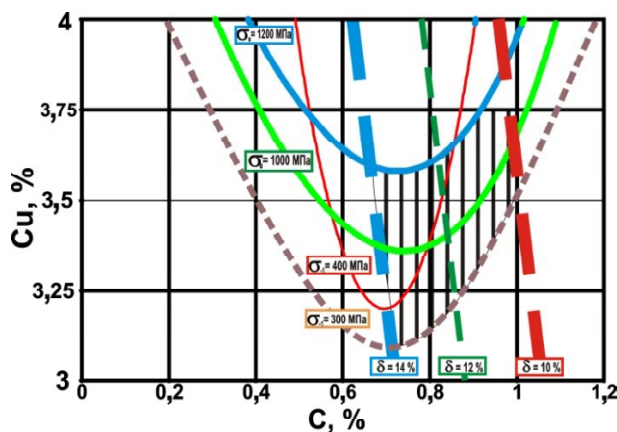


Рис. 1. Графічна оптимізація складу високоміцної графітенованої сталі за вуглецем та міддю при Si = 2,2...2,4%

Висновки

Результати проведених дослідів показали, що найбільш сприятливим поєднанням властивостей: $\sigma_b = 1000 \dots 1200$ МПа; $\delta = 10 \dots 14\%$; $\sigma_{-1} = 300 \dots 400$ МПа характеризувалася сталь складу: 0,8...1,0%С; 2,2...2,4%Si; 3,0...3,2%Cu; 0,60...0,70%Mn; 0,15...0,18%Cr; 0,22...0,25%Al і до 0,02%S і 0,03%P. За показниками статичної та циклічної міцності графітенована сталь, запропонованого складу перевершує високоміцні чавуни, марок ВЧ40...ВЧ50 та низку марок вуглецевих сталей.

Список літератури

1. А.с. 1574674 СССР, МКИ С 22 С 38/18, В 22 С 38/34. Графитизированная сталь / О. Б. Колотилкин, И. П. Волчок, С. А. Уваров (СССР). – № 4471327; заявл. 05.09.88; опубл. 30.06.90, Бюл. № 24. – 2 с.
2. А.с. 1793001 СССР, МКИ С 22 С 38/34. Графитизированная сталь / И. П. Волчок, О. Б. Колотилкин,

3. С. А. Уваров (СССР). – № 4910094; заявл. 11.02.91; опубл. 07.02.93, Бюл. № 5. – 2 с.
4. Pat. 5,139,583, C22C38/00. Graphite Precipitated hot-rolled Steel plate having workability and hardenability and method therefore / Yoshikazu Kawabata, Masahiko Morita, Fusao Togashi (USA). – № US19920822649; filed. 21.01.92; publ. 18.08.92.
5. Pat. US5830285, C21D1/26; C21D1/84, C21D8/06, C22C38/12, C22C38/60. Fine Graphite uniform dispersion steel excellent in gold Machinability, Cuttability and Hardenability, and production method for the same / Sakae Katayama, Toshimi Tarui, Masahiro Toda, Ken-Ichiro Naito (Japan). – № US19960700355; filed. 23.08.96, publ. 03.11.98.
6. Жураковский В. М. Организация трансформируемой структуры и обеспечение заданных свойств графитсодержащей стали: автореф. дисс. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.01 «Материаловедение» / В. М. Жураковский. – Минск, 1985. – 40 с.
7. Скворцов А. И. Магнитные и демпфирующие свойства графитизированных сталей после изотермической закалки / Скворцов А. И., Агапова Л. И. // Металлургия. 1993. – № 5. – С. 9–10.
8. Колмыков В. И. Особенности формирования графитсодержащих диффузионных слоев при двухступенчатой нитроцементации конструкционных сталей / В. И. Колмыков, И. Н. Росляков, О. В. Летова // Технология металлов. – 2008. – № 11. – С. 22–24.
9. Тепловозы: Механическое оборудование: Устройство и ремонт: Учебник для техн. школ / А. А. Пойда, Н. М. Хуторянский, В. Е. Кононов. – М.: Транспорт, 1988. – 320 с.
10. Акимов И. В. Підвищення високотемпературної витривалості графітенованих сталей / І. В. Акимов, І. П. Волчок // FIDES. Intern. Forum for the Development of Education and Science Proc. – Norway: Lulu Press Inc., 2010. – 61 p.
11. Akimov I. Wear resistance of graphitized steels. / Akimov I., Belikov S., Volchok I. // Archives of metallurgy and materials, Volume 58, 2013, Issue 3, P. 827–830.
12. Сильман, Г. И. Влияние меди на структурообразование в чугунах / Г. И. Сильман, В. В. Камынин, А. А. Тарасов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. – № 7. – С. 15–20.
13. Акимов И. В. Усталостное разрушение графитизированных сталей при высоких частотах нагружения Строительство, материаловедение, машиностроение / Акимов И. В. // Сб. научн. трудов. Вып. 74 – Днепро-ск, ГВУЗ «ПГАСА», 2014. – С. 66–71.
14. Ковшов В. Н. Методические указания к постановке эксперимента при выполнении курсовых научно-исследовательских работ / В. Н. Ковшов. – Днепропетровск: НМетАУ, 1999. – 50 с.

Одержано 20.05.2015

Акимов И.В. Повышение механических свойств литой графитизированной стали

С использованием метода планирования эксперимента и последующей графической оптимизации, были получены зависимости влияния компонентов литой графитизированной стали на её свойства. Предложен оптимальный состав стали с высокими показателями статической и циклической прочности, применение которого в машиностроении обеспечит повышение надежности и долговечности деталей, работающих в условиях статических и циклических нагрузок.

Ключевые слова: *графитизированная сталь, структура, механические свойства, оптимизация состава*

Akimov I. Increasing of mechanical properties of the cast graphitized steel

The dependences of the influence of the cast graphitized steel's components on its properties have been obtained, with the use of the experiment planning method and further graphical optimization. The optimal composition of steel with high static and cyclic strength indices has been suggested. Its application in mechanical engineering will provide the increase of the reliability and durability of the articles operating under static and cyclic loads.

Key words: *graphitized steel, structure, mechanical properties, composition optimization.*
