

УДК 519.87:669.131.7

ОБЧИСЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ІНТЕРВАЛІВ АУСТЕМПЕРИНГУ МАТРИЦІ ЧАВУНІВ ІЗ КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ

УЗЛОВ К. І. *, *д. т. н.*

*Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (097) 950-14-08, +38 (095) 416-97-70, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

Анотація. Мета. В інтервалі температур аустемперингу бейнітних чавунів із кулястим графітом (БЧКГ) 260...420 °С спостерігається адекватно до структурного стану зміна характеру поведінки функцій механічних властивостей. Завданням цієї роботи було вивчення впливу температури ізотермічної витримки на формування мікроструктури металевої матриці та механічних властивостей зразків із чавунів із кулястим графітом та обчислення оптимальних температурних інтервалів аустемперингу їх матриці. **Методика.** Досліджені чавуни з кулястим графітом термічно зміцнені ізотермічним гартуванням на промисловому устаткуванні за технологією підприємства «Амстед-Рейл». Термічно оброблені зразки підлягали металографічному аналізу та механічним випробуванням за стандартними методиками. Математичну обробку здійснювали з використанням програми «Microsoft Excel 2003». Апроксимацію експериментальних даних проводили за допомогою програмного забезпечення «Curve Expert». Подальший аналіз моделі щодо наявності екстремальних точок і точок перегинів кривих залежностей проводили із застосуванням програми MathCAD 14. **Результати.** У статті визначено температурні інтервали формування бейнітних структур металевої матриці БЧКГ: нижній бейніт (260...280 °С), змішана бейнітна структура (300...360 °С), верхній бейніт (360...420 °С). Дослідження механічних властивостей БЧКГ продемонструвало інтенсивне монотонне зниження тимчасового опору руйнуванню в дослідженому інтервалі температур, закономірно протилежне за напрямком, але ідентичне щодо поведінки підвищення пластичних властивостей, та ступінчастий, відповідно до структурного стану, характер зміни твердості. Розгляд функції залежності твердості від температури аустемперингу проводили за допомогою апроксимації експериментальних даних. Здійснено аналіз моделі з точки зору пошуку екстремальних точок та точок перегину. **Наукова новизна.** Математичною обробкою функціональної залежності структурно-чутливої властивості (твердості) від температури аустемперингу визначено наявність точки перегину відповідного поліному та її положення. **Практична значимість.** Обчислені кількісні значення температурних інтервалів структуроутворення бейнітної матриці БЧКГ та відповідної поведінки властивостей виробів із них дозволяють прогнозно призначати промислові режими термічного зміцнення для деталей із специфічними умовами експлуатації.

Ключові слова: бейнітний чавун із кулястим графітом, аустемперинг, структурний стан, механічні властивості, програмне забезпечення, поліноміальна залежність, аналіз моделі, промислові режими термічного зміцнення.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНТЕРВАЛОВ АУСТЕМПЕРИНГА МАТРИЦЫ ЧУГУНОВ С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

УЗЛОВ К. И. *, *д.т.н.*

* Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, проспект Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (097) 950-14-08, +38 (095) 416-97-70, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

Аннотация. Цель. В интервале температур аустемперинга бейнитных чугунов с шаровидным графитом (БЧШГ) 260...420 °С наблюдается адекватно структурному состоянию изменение характера поведения функций механических свойств. Задачей настоящей работы было изучение влияния температуры изотермической выдержки на формирование микроструктуры металлической матрицы и механических свойств образцов из чугунов с шаровидным графитом и вычисление оптимальных температурных интервалов аустемперинга их матрицы. **Методика.** Исследованные чугуны были термически упрочнены изотермической закалкой на промышленном оборудовании и по технологии предприятия «Амстед-Рейл». Термически упрочненные образцы подвергали металлографическому анализу и механическим испытаниям по стандартным методикам. Математическую обработку производили с использованием программного обеспечения «Microsoft Excel 2003». Апроксимацию экспериментальных данных проводили с помощью программного обеспечения

«Curve Expert». Дальнейший анализ модели на предмет наличия экстремальных точек и точек перегибов кривых зависимостей осуществляли с использованием программного обеспечения MathCAD 14. **Результаты.** В работе определены температурные интервалы формирования бейнитных структур металлической матрицы БЧШ: нижний бейнит (260...280 °С), смешанная бейнитная структура (300...360 °С), верхний бейнит (360...420 °С). Исследование механических свойств БЧШГ продемонстрировало интенсивное монотонное снижение временного сопротивления разрушению в исследованном интервале температур, закономерно противоположенное по направлению, но идентичное по поведению повышение пластических свойств, и ступенчатый, соответственно структурному состоянию, характер смены твердости. Рассмотрение функции зависимости твердости от температуры аустемперинга осуществляли с помощью аппроксимации экспериментальных данных. Проведен анализ модели с точки зрения поиска экстремальных точек и точек перегибов. **Научная новизна.** Математической обработкой функциональной зависимости структурно-чувствительной характеристики (твердости) от температуры аустемперинга определено наличие точки перегиба соответствующего полинома и ее положение. **Практическая значимость.** Вычисленные количественные значения температурных интервалов структурообразования бейнитной матрицы БЧШГ и соответствующего поведения свойств изделий из них позволяют прогнозно назначать промышленные режимы термического упрочнения для деталей со специфическими условиями эксплуатации.

Ключевые слова: бейнитный чугуны с шаровидным графитом, аустемперинг, структурное состояние, механические свойства, программное обеспечение, полиномиальная зависимость, анализ модели, промышленные режимы термического упрочнения.

CALCULATION OF OPTIMAL TEMPERATURE INTERVALS OF MATRIX AUSTEMPERING WITH NODULAR GRAPHITE CAST IRONS

UZLOV K. I. *, *Dr. Sc. (Tech.)*.

*Materials science department, National metallurgical academy of Ukraine, prospect Gagarina, 4, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (097) 950-14-08, +38 (095) 416-97-70, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

Abstract. Purpose. In austempering temperature range 260...420 °C of bainitic cast irons with nodular graphite (ADI) the changing of the behavior of functions of mechanical properties is observed adequately to the structural condition. Objective of present work was an investigation of temperature influence of isothermal holding on microstructure formation of metal matrix and mechanical properties of cast irons with nodular graphite specimens and to calculate the optimal temperature intervals of their matrix austempering. **Methodology.** Investigated globular graphite cast irons were thermally hardened by isothermal quenching on industrial equipment according to enterprise «Amsted-Rail» technology. Thermally treated samples were subject of metallographic analysis and mechanical tests according to standard methods. Mathematical processing carried out using the program «Excel 2003». Approximation of experimental data was done with software «Curve Expert». Further analysis of the model concerning the presence of extreme points and inflection points of the curve dependencies were realized using program «MathCAD 14». **Findings.** Temperature ranges of bainite structures forming in ADI metal matrix have been defined in the present work: lower bainite (260...280 °C), mixed bainite structure (300...360 °C), upper bainite (360...420 °C). Study of ADI mechanical properties demonstrated intense monotonous decreasing of ultimate tensile strengths in studied temperature range, naturally the opposite direction but identical regarding the behavior increased plastic properties and step – type, according to the structural condition, the nature of the changes in hardness. Consideration of the hardness functional dependence vs. austempering temperature obtained using experimental data approximation. Model analysis in terms of finding extreme points and inflection points was carried out. **Originality.** Mathematical processing of functional dependence of structurally sensitive properties (hardness) vs. austempering temperature determined the presence of point of corresponding polynomial curve inflection and its position. **Practical value.** Calculated quantitative values of ADI bainite matrix formation temperature intervals and appropriate behaviors of their products property, allow for forecasting prescribe industrial modes of thermal hardening for details of the specific conditions of operation.

Key words: bainitic cast iron with nodular graphite, austempering, structural condition, mechanical properties, software, polynomial dependence, model analyses, industrial regimes of heat treatment

Вступ. Мікроструктура продуктів бейнітної реакції залежить від температури проміжного перетворення [11; 14]. У специфічних температурних інтервалах [15]

перетворення формуються змішані структури ізотермічного розпаду [2].

В дослідженнях [13] було встановлено, що в інтервалі температур аустемперингу

бейнітних чавунів із кулястим графітом (БЧКГ) 260...420 °С спостерігається адекватно до структурного стану зміна характеру поведінки функцій механічних властивостей. При цьому за при температур 320...360 °С зафіксовано змішані, тобто перехідні від нижнього до верхнього бейніту, структури. За цих самих температур спостерігали зупинку твердості у разі підвищення температури ізотермічної витримки.

Мета роботи – вивчення впливу температури ізотермічної витримки на формування мікроструктури металевої матриці та механічних властивостей зразків із чавунів із кулястим графітом та обчислення оптимальних температурних інтервалів аустемперингу їх матриці.

Методика. Матеріалом досліджень був чавун ВЧ 450 - 10 за ДСТУ 3925 [1]. Термічну обробку методом ізотермічного гартування здійснювали на підприємстві «Амстед-Рейл» на промисловому устаткуванні за технологією, характеристики якої розглянуті в [12].

Металографічний аналіз проводили на виготовлених за стандартними методиками (ГОСТ 5639 [3], ГОСТ 3443 [4]) мікрошліфах за допомогою мікроскопа «Neophot-2».

Механічні випробування на статичний розтяг проводили згідно з ГОСТ 1497 [5] на випробувальній машині «Instron». Випробування на ударний згин проводили згідно з ГОСТ 9454 [6] на маятниковому копрі PSW-5. Твердість вивчали за допомогою твердоміра ТБ 5004 за вимогами ГОСТ 9012 [7].

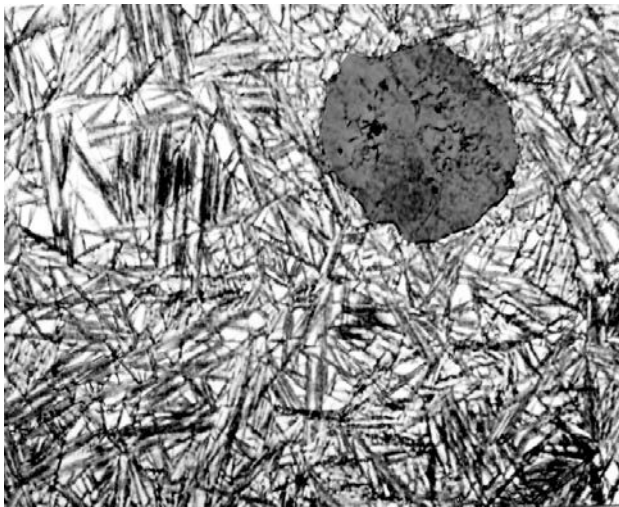
Математичну обробку даних лабораторних та промислових експериментів здійснювали із застосуванням програми «Microsoft Excel 2003» з наступним зображенням ліній тренду. Визначення довірчих границь похибки результатів вимірювань здійснювали за вимогами ДСТУ ГОСТ 8.381:2008 [8].

Апроксимацію експериментальних даних проводили за допомогою програмного забезпечення Curve Expert із побудовою полінома відповідного ступеня або тригонометричної функції.

Одержані залежності піддавали аналізу з точки зору визначеності функції в аналізованому інтервалі зміни аргументу. Подальший аналіз моделі щодо наявності екстремальних точок і точок перегинів кривих залежностей проводили із застосуванням програми MathCAD 14 із відтворенням відповідних функцій за одержаними коефіцієнтами рівняння регресії [9; 10].

Результати. Вивчаючи вплив температури ізотермічної витримки на формування мікроструктури металевої матриці та механічних властивостей, зразки із ЧКГ аустенітизували за температури 900 °С. Після цього зразки занурювали у сольову ванну з температурами 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420 °С для аустемперингу з витримкою 120 хвилин у всіх випадках. Мікроструктурним аналізом було встановлено (рис. 1 а – в), що в інтервалі температур дослідження 260...420 °С в металевій матриці БЧКГ формуються бейнітні структури різної морфології. За низьких температурах зафіксовані голчасті структури з високою твердістю (до 490 НВ), що свідчить про формування в цьому термічному інтервалі (260...300 °С) структури нижній бейніт з її типовою голчастою мартенситоподібною морфологією (рис. 1 а). За високих температур (380...420 °С) спостерігали структури із лінзоподібною формою бейнітних платівок з невисокою твердістю 260...280 НВ, що закономірно пов'язано із формуванням верхнього бейніту у матриці БЧКГ (рис. 1 в). У перехідному інтервалі температур 300...360 °С наявні змішані бейнітні структури (рис. 1 б).

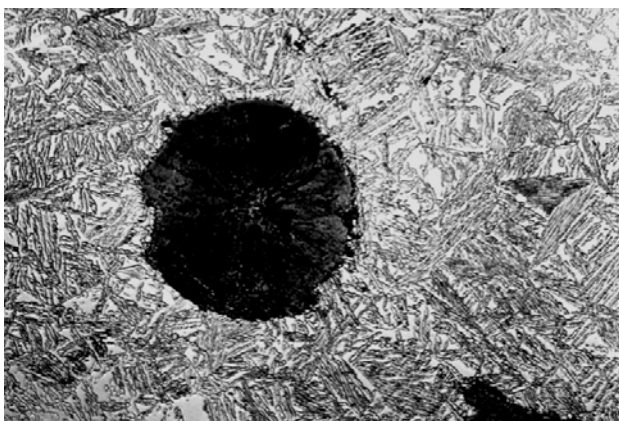
Дані механічних випробувань відповідних зразків БЧКГ наведено на рисунках 2, 3, 4. Як видно з рис. 2, тимчасовий опір руйнуванню, інтенсивно знижується від 1 534 МПа за 260 °С до 984 МПа за 360 °С, тобто більше ніж у 1,5 раза. Далі інтервалі 360...420 °С ця характеристика практично стабілізується і залишається на рівні 984...953 МПа.



a



b



v

Рис. 1. Мікроструктура бейнітної матриці чавуну з кулястим графітом після аустемперингу за 280 °C (a × 500), 320 °C (б × 250), 420 °C (в × 500)

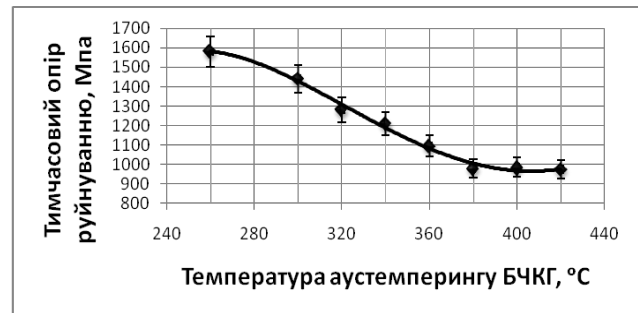


Рис. 2. Залежність тимчасового опору руйнуванню БЧКГ від температури сольового розплаву

Закономірно інакше демонструє свою поведінку відносно видовження (рис. 3). В інтервалі температур 260...380 °C δ_{10} інтенсивно зростає з досягненням величини 7,5 %. Після цього підвищення температури в межах 380...420 °C майже не змінює відносного видовження і залишається на рівні 7,5...8,5 % (рис. 3), подібно до характеру зміни залежності тимчасового опору руйнуванню (рис. 2).

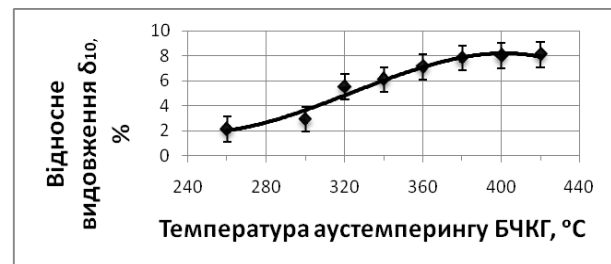


Рис. 3. Залежність відносного видовження БЧКГ від температури сольового розплаву / ADI elongation vs. salt bath temperature

Адекватно до поведінки тимчасового опору руйнуванню, у разі підвищення температури сольового розплаву (аустемперингу) від 260 °C до 320 °C твердість (рис. 4) БЧКГ різко падає практично прямолінійно від 486 НВ (260 °C) до 350 НВ (320 °C).

В інтервалі 320...380 °C зниження твердості (рис. 4) відбувається не так активно. Ця характеристика зменшується дуже повільно (350...329 НВ) і в інтервалі в 60 °C падає всього на 21 НВ, тобто майже у 7 разів повільніше, ніж у попередньому інтервалі (260...320 °C).

Підвищення температури від 380 °C до 420 °C зумовлює повернення прямолінійного характеру падіння твердості (рис. 4) від 329 НВ до 241 НВ із формуванням типової структури верхньої бейніт (рис. 1 в).

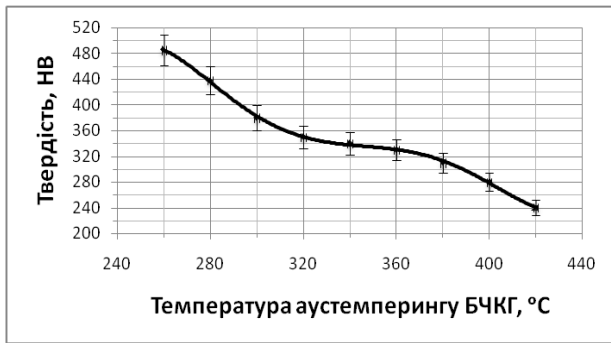


Рис. 4. Залежність твердості БЧКГ від температури сольового розплаву

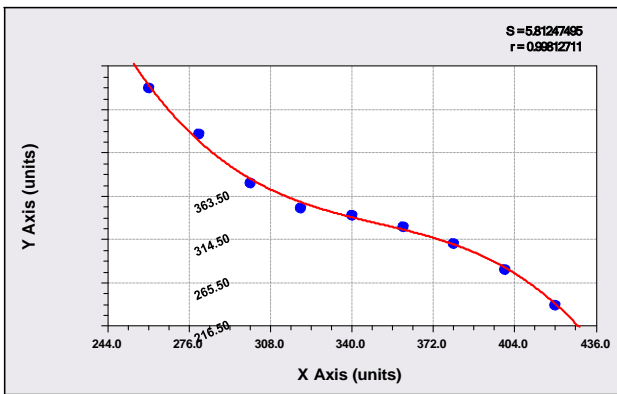


Рис. 5. Графічне зображення функціональної залежності експериментальних даних твердості БЧКГ (Y-axis) від температури аустемперингу (X-axis), побудовані за допомогою програми Curve Expert

Подальший розгляд функції залежності твердості від температури аустемперингу (рис. 4) проводили за допомогою апроксимації експериментальних даних із застосуванням програми Curve Expert з аналізом моделі з точки зору пошуку екстремальних точок та точок перегину за допомогою програми MathCAD 14 (рис. 5).

3rd degree Polynomial Fit:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3...$$

Coefficient Data:

$$a = 6,14246028350E+003$$

$$b = 4,84097046330E+001$$

$$c = 1,36285924483E-001$$

$$d = 1,29712080911E-004$$

r – коефіцієнт кореляції (0,9981).

За одержаними коефіцієнтами рівняння регресії відтворюється функція залежності твердості від температури:

$$B(t) := 6143 - 48,1 \cdot t + 1,36 \cdot 10^{-1} \cdot t^2 - 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3,$$

для $t = 260, 280 \dots 420$.

Графічне відображення функції залежності твердості БЧКГ від температури аустемперингу наведено на рисунку 6.

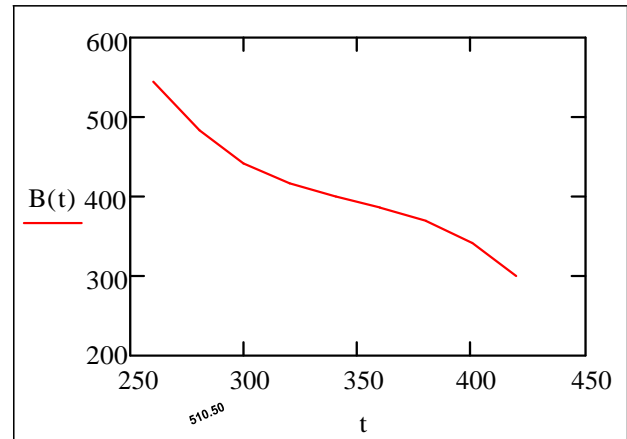


Рис. 6. Графічне зображення функціональної залежності твердості БЧКГ «B(t)» від температури аустемперингу «t», відтвореної за коефіцієнтами рівняння регресії, одержаними за допомогою програми MathCAD 14

На заданому інтервалі температур визначаються значення першої та другої похідних:

$$HB(t) = B(t):$$

$$\frac{d}{dt} B(t) \rightarrow \begin{pmatrix} -3.744 \\ -2.516 \\ -1.6 \\ -0.996 \\ -0.704 \\ -0.724 \\ -1.056 \\ -1.7 \\ -2.656 \end{pmatrix}$$

Зміна знака першої похідної у досліджуваному інтервалі не відбувається, тобто залежність, що аналізується, монотонна і екстремальних точок не має.

$$\frac{d^2}{dt^2} B(t) \rightarrow \begin{pmatrix} 0.0692 \\ 0.0536 \\ 0.038 \\ 0.0224 \\ 0.0068 \\ -0.0088 \\ -0.0244 \\ -0.04 \\ -0.0556 \end{pmatrix}$$

Зафіксована зміна знака у другій похідній, що свідчить про наявність точок перегину:

$$Y(t) := \frac{d^2}{dt^2} B(t)$$

$t := 340$

Використовуючи оператор «Root», визначали точний розмір аргументу у точці перегину:

$\text{soln} := \text{root}(Y(t), t); \text{soln} = 348,718.$

Тобто точне значення аргументу в точці перегину встановлене як:

$T_{\text{аустемп.}} = 348,718 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Таким чином, математична обробка функціональної залежності твердості від температури аустемперингу визначає наявність точки перегину відповідного полінома та її положення як $T_{\text{аустемп.}} \sim 349 \text{ } ^\circ\text{C}$ із коефіцієнтом кореляції поліноміальної моделі 0,998.

Установлені в статті кількісні значення температурних інтервалів структуроутворення бейнітної матриці БЧКГ та відповідної поведінки властивостей виробів із них, дозволяють прогнозно призначати промислові режими термічного зміцнення для деталей із специфічними умовами експлуатації.

Висновки.

1. У роботі визначені температурні інтервали формування бейнітних структур металевої

матриці БЧКГ: нижній бейніт (260...280 °С), змішана бейнітна структура (300...360 °С), верхній бейніт (360...420 °С).

2. Дослідження механічних властивостей БЧКГ продемонструвало інтенсивне монотонне зниження тимчасового опору руйнуванню в дослідженому інтервалі температур, закономірно протилежне за напрямком але ідентичне щодо поведінки підвищення пластичних властивостей та ступінчастий відповідно до структурного стану характер зміни твердості.

3. Математична обробка функціональної залежності твердості від температури аустемперингу визначає наявність точки перегину відповідного поліному та її положення як $T_{\text{аустемп.}} \sim 349 \text{ } ^\circ\text{C}$ з коефіцієнтом кореляції поліноміальної моделі 0,998.

4. Обчислені кількісні значення температурних інтервалів структуроутворення бейнітної матриці БЧКГ та відповідної поведінки властивостей виробів з них, дозволяють прогнозно призначати промислові режими термічного зміцнення для деталей із специфічними умовами експлуатації.

Автор висловлює подяку к. т. н., доценту кафедри матеріалознавства НМетАУ С. С. Петрову за допомогу у постановці та проведенні математичної обробки експериментальних даних.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 3925 – 99. Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки. – [Введ. 2000–07–01]. – Київ : Держ. ком. стандартизації, метрології та сертифікації України, 1999. – 25 с. – Режим доступу: http://www.ukrindnc.org.ua/index.php?option=com_ushop&Itemid=69&grp=1054&pgrp=1063&lstdssu=1065
2. Влияние температуры изотермической выдержки при аустемперинге на механические свойства высокопрочного чугуна / К. И. Узлов, А. Н. Хулин, Ж. А. Дементьева [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. / НАН Украины, Ин-т чер. металлургии им. З. И. Некрасова. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 18. – С. 175-178.* – Режим доступа: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/62720>
3. ГОСТ 5639 – 82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Введ. 1983–01–01. – Москва : Гос. стандарт СССР, 1982. – 38 с. – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
4. ГОСТ 3443 – 87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – Введ. 1988–07–01. – Москва : Гос. стандарт СССР, 1987. – 43 с. – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
5. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986–01–01. – Изд. офиц. – Москва : Гос. стандарт СССР, 1985. – 23 с. – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
6. ГОСТ 9454 – 78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 1979–01–01. – Москва : Гос. комиздат, 1980. – 11 с. – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
7. ГОСТ 9012 – 59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 1960–01–01. – Москва : Гос. комитет СССР по стандартам, 1960. – 40 с. – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>

8. ДСТУ ГОСТ 8.381:2008. ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешности. Введ. 2008–10–01. – К. : Госпотребстандарт, 2008. – 11 с. Режим доступа: http://www.ukrndnc.org.ua/index.php?option=com_ushop&Itemid=69&grp=237&pgrp
9. Дэниел Н. Применение статистики в промышленном эксперименте / Н. Дэниел. – Москва : Мир, 1979. – 299 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/604320/>
10. Карташев А. П. Математический анализ / А. П. Карташев, Б. Л. Рождественский. – Москва : Наука, 1984. – 448 с. – Режим доступа: <http://www.mate.oglib.ru/bgl/3247.html>
11. Курдюмов Г. В. Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – Москва : Наука, 1977. – 236 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/1051184/>
12. Промышленное освоение технологии аустемперинга чугунов с шаровидным графитом на предприятии «А. Стаки-Рейл» / К. И. Узлов, А. Н. Хулин, Ж. А. Деметьева [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 4. – С. 79-81. – Режим доступа: <http://www.metaljournal.com.ua/mgp-04-2006/>
13. Нестеренко А. М. Рентгеноструктурный анализ бейнитной структуры чугунов с шаровидным графитом после аустемперинга в интервале температур сдвигово-диффузионного превращения / А. М. Нестеренко, К. И. Узлов, А. Н. Хулин // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 22. – С. 178 – 189. – Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/62417>
14. Elliott , R. Cast Iron Technology / R. Elliott. - London, Boston, Singapore, Sydney/Toronto, Wellington : Butterworths, 1988. – 244 p. – Режим доступа: <http://trove.nla.gov.au/work/13611346?selectedversion=NBD5646233>
15. Takahashi M. A Model for Transition from Upper to Lower Bainite / M. Takahashi, H. K. D. H. Bhadeshia // *Mat. Sci. and Tech.* – 1990. – Vol. 6, № 7. – P. 592-603. – Режим доступа: <http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1179/mst.1990.6.7.592>

REFERENCES

1. DSTU3925–99. *Chavun z kuliastymy grafitom dlia vylyvky. Marky* [GOST 3925 – 99. Spheroidal graphite iron for casting. Grades]. Derzhavnyi komitet standartyzatsii, metrologii ta sertyfikatsii–The State Committee for Standardization, Metrology and Certification . Kyiv, 1999, 25 p. (in Ukrainian). Available at: http://www.ukrndnc.org.ua/index.php?option=com_ushop&Itemid=69&grp=1054&pgrp=1063&lstssu=1065
2. Uzlov K. I., Hulin A. N., Dementeva Zh. A. *Vliyanie temperatury izotermicheskoy vyiderzhki pri austemperinge na mehanicheskie svoystva vyisokoprochnogo chuguna* [Influence of austempering isothermal tempering temperature on mechanical properties of ductile iron]. *Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii - Fundamental and applied problems of the steel industry. Sbornik nauchnykh trudov* –Collection of scientific papers. Kiev, 2008, pp. 175-178. (in Russian). Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/62720>
3. *GOST 5639 – 82. Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [GOST 5639 – 82. Steel and alloys. Methods for detection and determination of grain size]. Moscow, Gosstandart, 1982. 38 p. (in Russian). Available at: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
4. *GOST 3443 – 87. Otlivki iz chuguna s razlichnoy formoy grafitu. Metody opredeleniya struktury* [GOST 3443 – 87. Cast iron castings with graphite of different form. Methods of structure determination]. Moscow, Gosstandart, 1987. 43 p. (in Russian). Available at: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
5. *GOST 1497 – 84. Metaly. Metody ispytany na rastyazhenie* [GOST 1497 – 84Metals. Methods of tension test] Moscow, Gosstandart, 1985. 23 p. (in Russian). Available at: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
6. *GOST 9454 – 78. Metaly. Metod ispytaniya na udarny izhib pri ponizhenii komnatnoy i povyshenyh temperatur* [GOST 1497 – 78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature]. Moscow, Gosstandart, 1980. 11 p. (in Russian). Available at: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
7. *GOST 9012 – 59 Metaly. Metod izmereniya tverdosi po Brinelyu* [GOST 1497 – 59. Metals. Method of Brinell hardness measurement]. Moscow, Gosstandart, 1960. 40 p. (in Russian). Available at: <http://vsegost.com/Catalog/30/30103.shtml>
8. *DSTU GOST 8.381:2008. Etalony. Sposoby vyrazheniya pogreshnosti* [GOST 1497 – 78. Standards. The ways of expressing the errors]. Kyiv, Gospotrestandart, 2008. 11 p. (in Russian). Available at: http://www.ukrndnc.org.ua/index.php?option=com_ushop&Itemid=69&grp=237&pgrp=238&lstssu=238
9. Deniel N. Deniel N. *Primenenie statistiki v promyishlennom eksperimente* [Application of statistics in industrial experiment] Moscow, Mir, 1979. 299 p. (in Russian). Available at: <http://www.twirpx.com/file/604320/>
10. Kartashev A. P. Rozhdestvenskiy B. L. *Matematicheskiy analiz* [Mathematical analysis]. Moscow, Nauka, 1984. 448 p. (in Russian) Available at: <http://www.mate.oglib.ru/bgl/3247.html>
11. Kurdyumov G. V., Utevskiy L. M., Entin R. I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow, Nauka, 1977. 236 p. (in Russian). Available at: <http://www.twirpx.com/file/1051184/>
12. Uzlov K. I., Hulin A. N., Dementeva Zh. A. *Promyishlennoe osvoenie tehnologii austemperinga chugunov s sharovidnym grafitom na predpriyatii* [Industrial mastering of technology of cast-irons with spherical graphite on the enterprise] *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyishlennost -Metallurgical and Mining Industry*, 2006, no. 4, pp. 79-81. (in Russian). Available at: <http://www.metaljournal.com.ua/mgp-04-2006/>

13. Nesterenko A. M., Uzlov K. I., Hulin A. N. Nesterenko A. M., Uzlov K. I., Hulin A. N. *Rentgenostrukturniy analiz beynitnoy strukturyi chugunov s sharovidnyim grafitom posle austemperinga v intervale temperatur sdvigovo – diffuzionnogo prevrascheniya* [X-ray analysis of ADI bainitic matrix after austempering in shear – diffusion transformation temperature interval]. *Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii* - Fundamental and applied problems of the steel industry. *Sbornik nauchnykh trudov* - Collection of scientific papers. Dnipropetrovs'k, ISI NASU Ukraine, 2010, no.22, pp. 178-189. (in Russian). Available at: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/62417>
14. Elliott R. *Cast Iron Technology*. London, Boston, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington. Butterworths, 1988. 244 p. Available at: <http://trove.nla.gov.au/work/13611346?selectedversion=NBD5646233>
15. Takahashi M., Bhadeshia H. K. D. H. A Model for Transition from Upper to Lower Bainite. *Mat. Sci. and Tech.*, 1990. Vol. 6, pp. 592-603. Available at: <http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1179/mst.1990.6.7.592>