

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. І. Савуляк, О. Б. Янченко**

**ЕКОНОМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ВИСОКОМІЦНИХ ГРАФІТИЗОВАНИХ  
СПЛАВІВ ЗАЛІЗА**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2014

УДК 669.162.14 + 669.132

ББК 34.323

C13

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 27.03.2014 р.)

Рецензенти:

**В. А. Матвійчук**, доктор технічних наук, професор

**І. О. Сивак**, доктор технічних наук, професор

**Савуляк, В. І.**

C13 Економічні технології високоміцних графітизованих сплавів заліза : монографія / В. І. Савуляк, О. Б. Янченко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 160 с.

ISBN 978-966-641-598-4

В монографії викладено основні підходи до розв'язання проблеми одержання високоміцних чавунів триботехнічного призначення без використання дорогих та дефіцитних присадок. Значну увагу також приділено економії енергетичних ресурсів за рахунок розробки та впровадження нових процесів термічної обробки матриці чавунів на бейніт.

Монографія призначена для широкого кола інженерно-технічних працівників, науковців та студентів.

**УДК 669.162.14 + 669.132**

**ББК 34.323**

**ISBN 978-966-641-598-4**

© В. Савуляк, О. Янченко, 2014

*Пам'яті людини, вченого та вчителя*



**доктора технічних та доктора хімічних наук, професора  
*АНДРІЯ ОЛЕКСАНДРОВИЧА ЖУКОВА***

15.09.1928 р. – 04.11.2002 р.

Під керівництвом А. О. Жукова виконано та захищено 7 докторських і 25 кандидатських дисертацій. Науковий спадок складає більше 700 наукових робіт, з них більше 40 робіт надрукованих за кордоном, 10 книг та довідників, 12 брошур та 60 авторських свідоцтв і патентів на винахід.

За наукові досягнення А. О. Жуков удостоєний двох премій Д. К. Чернова, премії Соболєнського, премії Міністерства вищих навчальних закладів України та медалі ВДНГ.

А. О. Жуков був членом ливарних секцій НТО Машпром, членом бюро міжнародного комітету технічних асоціацій ливарників (Цюріх), членом редколегії журналу «Ливарне виробництво» та міжнародного журналу «Cast Metals».

Світлу пам'ять про Андрія Олександровича Жукова та творче відношення до його великого наукового спадку зберігають його багаточисленні учні та соратники.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень.....	6
Вступ.....	7
<b>РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОТРИМАННЯ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ ЗАЛІЗА З ДРІБНОЗЕРНИСТИМ КОМПАКТНИМ ГРАФІТОМ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Фактори впливу на кінетику графітизації високовуглецевих сплавів заліза та на морфологію включень графітної фази.....	12
1.2 Фактори впливу на механічні, технологічні та експлуатаційні властивості високовуглецевих сплавів заліза із дрібнозернистими компактними включеннями графіту.....	18
1.3 Підвищення фізико-механічних властивостей високовуглецевих сплавів заліза з дрібнозернистим компактним графітом гартуванням на бейніт.....	22
1.3.1 Наукове обґрунтування доцільності використання бейнітного гартування при виробництві Fe–C-сплавів з компактним графітом....	22
1.3.2 Розвиток теорії бейнітного перетворення.....	24
1.4 Лита графітизована сталь – перспективний матеріал трибо-технічного призначення.....	27
1.4.1 Вибір оптимального хімічного складу.....	28
1.4.2 Термообробка.....	34
<b>РОЗДІЛ 2 ТЕРМОДИНАМІКА ГРАФІТИЗАЦІЇ ТА ГРАФІТИЗУВАЛЬ- НОГО ВІДПАЛУ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ФОРМУ- ВАННЯ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО КОМПАКТНОГО ГРАФІТУ.....</b>	<b>37</b>
2.1 Термодинамічні фактори процесу графітизації високовуглецевих сплавів для формування дрібнозернистого компактного графіту..	37
2.2 Гетерогенне зародження графіту у високовуглецевих сплавах.....	50
2.3 Активність, дезактивація і реактивація неметалічних включень, як центрів графітизації у високовуглецевих сплавах.....	63
<b>РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНО СТАБІЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБ- НИЦТВА АНТИФРИКЦІЙНИХ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ З ДРІБНОЗЕРНИСТИМ КОМПАКТНИМ ГРАФІТОМ.....</b>	<b>72</b>
3.1 Оптимальні склади антифрикційних залізовуглецевих сплавів з дрібнозернистим компактним графом.....	72
3.2 Оптимальний склад графітизованої сталі та економні режими бейнітного гартування.....	77

3.2.1 Графітизація литої сталі в процесі контрольованого охолодження виливків у ливарній формі.....	83
3.2.2 Зностійкість і оброблюваність різанням.....	84
3.2.3 Теоретичні та експериментальні дані і передумови.....	84
<b>РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА, МАТЕРІАЛИ ТА УСТАТКУВАННЯ.....</b>	<b>88</b>
4.1 Виплавка високосірчистих чавунів.....	88
4.2 Проведення експериментальних робіт і добір проб.....	88
4.3 Одержання феросірки та розробка методу легування чавуну сіркою і міддю при індукційному плавленні.....	91
<b>РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАФІТИЗУВАЛЬНОГО ВІДПАЛУ ЧАВУНІВ ТИПУ ЧДКГ.....</b>	<b>93</b>
5.1 Виплавляння і термічна обробка високовуглецевих сплавів заліза з дрібнозернистим компактним графітом, відлитих у кокіль.....	93
5.2 Виплавляння і термічна обробка високовуглецевих сплавів заліза з дрібнозернистим компактним графітом, відлитих у піщано-глинисту форму.....	108
5.3 Виплавляння і термічна обробка чавуну з дрібнозернистим компактним графітом для заготовок поршневих кілець.....	113
5.4 Аналіз технологічного процесу виробництва литої арматури на Харцизькому заводі «Армлит».....	119
<b>РОЗДІЛ 6 БЕЙНІТНЕ ГАРТУВАННЯ ЧАВУНІВ ІЗ ДРІБНОЗЕРНИСТИМ КОМПАКТНИМ ГРАФІТОМ ТА ГРАФІТИЗОВАНИХ СТАЛЕЙ.....</b>	<b>124</b>
6.1 Витримка деталей у рідкому цинку.....	128
6.2 Витримка у воді.....	129
6.3 Експериментальні дослідження графітизації чавунів та сталей і їх бейнітного гартування.....	130
6.3.1 Відбіл чавунів та графітизувальний відпал на дрібнозернистий компактний графіт.....	130
6.3.2 Дослідження графітизованої сталі.....	132
6.4 Легування висококремнистої сталі сіркою і міддю.....	133
6.5 Гаряча вибивка чавунних і сталевих виливків та самовідпал.....	134
<b>ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....</b>	<b>136</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>138</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>157</b>

## ПЕРЕІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ADI – austempered ductile iron – аустемпований високоміцний чавун;

ВЧ – високоміцний чавун;

ПКЧ – перлітний ковкий чавун;

ПНТО – попередня низькотемпературна обробка;

КЧ – ковкий чавун;

ЛГС – лита графітизована сталь;

РЗМ – рідкоземельні метали;

СЧ – сірий чавун;

ЧВГ – чавун з вермикулярним графітом;

ЧДКГ – чавун з дрібнозернистим компактним графітом;

ФКЧ – феритний ковкий чавун;

н. в. – неметалічні включення;

к.т.р. – коефіцієнт термічного розширення;

$\sigma$  – напруження;

$\delta$  – видовження.

## ВСТУП

Науково-технічний процес у машинобудуванні нерозривно пов'язаний зі створенням нових та удосконалюванням відомих конструкційних матеріалів. Найбільш широке застосування з конструкційних матеріалів у машинобудуванні, а також і в низці інших галузей господарства знаходять чорні метали — сталі та чавуни.

У найближче десятиліття, а швидше за все і на більш тривалому проміжку часу, чавун збереже провідне положення серед ливарних конструкційних матеріалів. Особливо зростає виробництво виробів з високоміцних чавунів. За даними міжнародної організації ISSM світове виробництво литва з високоміцного чавуну різних марок складає більше 40 млн. тонн на рік та прогнозується щорічне збільшення на 1 млн тонн.

Проблемою у забезпеченні таких обсягів литва є дефіцит модифікаторів, їх висока вартість, а також висока енергоємність процесів і їх технологічна нестабільність. Тому постає завдання щодо розробки матеріалознавчих та технологічних основ отримання чавунів достатньо високої міцності із певним запасом пластичності, незначною чутливістю до коливань хімічного складу шихти, компактною формою графіту без модифікування магнієм та іншими дефіцитними присадками.

Між сірими чавунами з пластинчастим графітом (СЧ) та високоміцними чавунами з кулястим графітом (ВЧ) лежить область сплавів із проміжними властивостями. Її певним чином представляють чавуни з вермикулярним графітом (ЧВГ). Одержання чавунів з вермикулярним графітом у даний час відноситься до одного з найменш стабільних технологічних процесів.

Професором Жуковим А. О. протягом багатьох років розроблялися матеріалознавчі та технологічні основи одержання чавунів середньої міцності, що мають одночасно ще і деяку пластичність, яка значно підвищує тріщиностійкість та покращує інші відповідні властивості сплавів. При цьому конструкційні сплави можуть мати переважно феритну структуру металевої матриці (тоді відносне подовження може досягти 3...5 % та вище), а антифрикційні і знос-

тійкі сплави – переважно перлітну. Дуже перспективні чавуни з бейнітною матрицею. Ці чавуни містять дрібнозернисту графітну фазу компакної форми і тому запропоновано назвати їх чавунами з дрібнодисперсним компактним графітом (ЧДКГ).

Одержання чавунів з компактною формою графіту та їхнє впровадження в машинобудування має низку переваг стосовно ЧВГ:

- менша чутливість до коливань хімічного складу шихти;
- одержання компакної форми графіту без модифікування магнієм та іншими сфероїдизувальними присадками.

Запропонований новий конструкційний матеріал нагадує ковкий чавун, але відрізняється підвищеним вмістом графітних включень у структурі у вигляді численних і досить компактних включень, що забезпечують високі антифрикційні, протизадирні властивості металу, гарну оброблюваність різанням, а у визначених умовах і підвищену зносостійкість деталей машин.

Чавун – це сплав заліза з вуглецем, що додатково містить низку елементів. Серед них: кремній, сірка та фосфор є металоїдами. Сірка та фосфор часто розглядаються винятково як шкідливі домішки. Стосовно до сталей така точка зору виправдана (за винятком автоматних сталей, легованих сіркою та фосфором). Стосовно до чавунів така точка зору далеко не виправдана. Так, наприклад, фосфор часто відіграє позитивну роль як інгредієнт чавунів, і цьому присвячена досить велика кількість досліджень та дисертаційних робіт. Щодо впливу сірки в матеріалознавців немає єдиної точки зору. Разом з тим у низці робіт показано, що підвищення вмісту сірки в чавуні інколи є доцільним. Вона дозволяє заощаджувати метал, застосовувати сірчистий кокс при ваграночній плавці та інші недефіцитні і дешеві матеріали.

Розгляд питання впливу сірки на процеси графітизації при затвердінні та графітизувальному відпалі дозволило зробити узагальнені висновки відносно одержання проміжного за своїми властивостями чавуну з дрібнозернистим компактним графітом.



Крім того, вперше розглянуто питання про бейнітне гартування чавунів із дрібнодисперсною компактною формою графіту, що дозволяє досягати певного додаткового ефекту.

Можливість бейнітного гартування обумовлена тим, що ЧДКГ містить значно більше кремнію, ніж звичайний ковкий чавун. При вмісті в чавунах кремнію вище 2 % вони отримують достатню прогартуваність для використання бейнітного гартування.

Чавуни з підвищеним вмістом кремнію мають, як правило, знижену холодостійкість. Однак після гартування на бейнітну структуру, такий метал, за рахунок підвищеного вмісту аустеніту, отримує підвищену холодостійкість.

Також розглянуто процес отримання литої графітизованої сталі (ЛГС). Це обумовлено таким:

- при неможливості відбілу Fe–C–Si сплавів сіркою, вісмутом чи телуrom, або їх сполуками (з метою одержання дрібнодисперсного компактного графіту відпалу), у нас зберігається такий потужний важіль регулювання структуроутворення, як зменшення вмісту вуглецю в металі. Теорія і практика цього питання розроблена професором А. О. Жуковим в [1] та ін.;

- зменшення вмісту вуглецю в графітизованих сплавах сприяє підвищенню їх міцності і пластичності;

- поширенню низьковуглецевих чавунів та графітизованої сталі в промисловості перешкоджала неможливість їх виплавки у вагранках. В даний час поширення електроплавки знімає ці бар'єри та дозволяє йти на додатковий перегрів розплаву у печі на 20...50 °C без великих додаткових витрат енергії і часу;

- значне подорожчання магнію та його лігатур, а також РЗМ, фактично ставить одержання ВЧ на заводах на межу рентабельності виробництва. Настав час часткової заміни ВЧ сталлю ЛГС [2, 3].

Оригінальним у цій роботі є легування ЛГС сіркою, а також сфероїдизуюче модифікування ЛГС силікокальцієм [1, 4]. Важливе значення має і бейнітне гартування ЛГС та ЧДКГ.

Графітизована сталь, як єдина справді антифрикційна сталь серед величезної кількості її марок, пройшла через зеніт інтересу до неї у довоєнні та повоєнні роки і тепер представлена у СНД прак-

тично лише у науково-дослідницьких та впроваджувальних роботах шкіл професорів В. М. Жураковського та І. П. Волчка.

Аустемпування чавунів, у тому числі високоміцних, у СНД практично відсутнє. Бейнітне гартування тракторних колінвалів на Харківському моторобудівному заводі протрималося декілька десятків років і припинило своє існування. Бейнітне гартування чавунних колінвалів на Ризькому дизелебудівному заводі географічно перемістилися у «ближнє зарубіжжя». Україна не приділяє достатньої уваги проблемам по ADI (austempered ductile iron - аустемпованому високоміцному чавуну). Разом з тим ці три напрямки тісно пов'язані між собою й у взаємодії між ними можна знайти ключ до вирішення всіх трьох проблем у комплексі. Ідеологія такого «синтезу» напрямків така.

1. Однією з причин затримки у розвитку виробництва ЧДКГ і графітизованої сталі є переможний хід по земній кулі (за винятком СНД) технологій високоміцного чавуну з кулястим та вермикулярним графітом (ВЧ та ЧВГ). Правда, використання високоміцного чавуну для деталей у північному виконанні гальмувалася зниженою холодостійкістю (яка є наслідком підвищеного вмісту кремнію у ВЧ).

2. Коли було доведено, що в аустемпованих чавунах кремній сприяє стабілізації аустеніту і сприяє утворенню «аусфериту» – дуже міцної, удароміцної та холодостійкої структури, фактор підвищеного вмісту кремнію, як нібито завжди несприятливий, відпав. Навпаки, у зв'язку з розвитком теорії і практики аустемпування, можна вести мову не про зниження вмісту кремнію у графітизованій сталі (в деталях «у північному виконанні»), а про підвищення цього вмісту (аж до 3 %).

3. Класичний ковкий чавун через порівняно невисокий вміст кремнію (0,8...1,5 % за масою) погано аустемпується через недостатнє прогартування. Підвищити вміст кремнію у КЧ стало можливим за рахунок легування чавуну сіркою і мікролегування вісмутом та телуrom, або їх сполукою  $Vi_2Te_3$ . При цьому істотно подрібнюється графітна фаза. Аустемпований ЧДКГ із підвищеним вмістом кремнію має високі механічні властивості.

4. Досягнутий великий прогрес у теорії і практиці аустемпування. Принципово нові процеси аустемпування – гартування з меж критичного інтервалу, витримування у рідкому цинку (чи розплавах цинк-алюміній), витримування у холодній, а потім у киплячій воді з подальшим проведенням ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту у звичайних печах з повітряною атмосферою.

У монографії розглядаються:

– термодинамічні розрахунки впливу сірки на активність вуглецю в сплавах Fe–C–S;

– роль сірки як елемента-акцептора валентних електронів на схильність високовуглецевих сплавів до графітизації;

– роль сульфідних фаз у чавуні як активних неметалічних включень у відношенні нуклеації графітної фази;

– теорія технологічних стабільних процесів, що складаються з технологічно менш стабільних ланок, розділених «буферними» інтервалами, що амортизують коливання їхніх параметрів;

– деякі питання теорії бейнітного гартування чавунів;

– експериментальні дослідження властивостей високосірчистих чавунів із дрібнозернистим компактним графітом;

– дослідження чавунів із дрібнозернистим компактним та пластичним графітом, що піддаються загартуванню на бейніт за новими технологіями;

– роботи з перенесення отриманих результатів у область графітованих сталей ;

– визначення антифрикційних властивостей ЧДКГ і ЛГС.

# **РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОТРИМАННЯ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ ЗАЛІЗА З ДРІБНОЗЕРНИСТИМ КОМПАКТНИМ ГРАФІТОМ**

## **1.1 Фактори впливу на кінетику графітизації високовуглецевих сплавів заліза та на морфологію включень графітної фази**

Високовуглецеві сплави, у яких вуглець чи його частина кристалізується у формі графіту, знайшли широке застосування в усіх галузях виробництва.

На практиці одержання ковкого чавуну поєднується зі значними технологічними складнощами, трудомісткістю та енергоємністю, що зумовлено необхідністю тривалого відпалу. У зв'язку з цим і виникла задача: – прискорити відпал шляхом керування процесами графітизації за рахунок зміни хімічного складу чавуну, модифікування, використовуючи як термодинамічні, так і кінетичні фактори та інші важелі керування формоутворенням графіту [5].

Ідея створення сплаву, проміжного між звичайним ковким чавуном та високоміцним з кулястим графітом з'явилася давно.

Розроблені та впроваджені у виробництво сплави [6, 7]. Ці сплави у литому стані мають структуру білого (чи половинчатого чавуну, але з дрібними глобулями графіту і з ледебуритною матрицею), тому від виливків легко відбиваються живильники тощо.

Потім короткий графітизувальний відпал трансформує структуру металу – ледебуритний цементит зникає, перетворюється у аустеніт та графіт. Внаслідок вмісту у металі магнію графіт отримує кулясту форму, випадаючи на численних зародках, що завжди присутні у великій кількості у сплавах з підвищеним вмістом кремнію, або нашаровуючись на дрібних глобулях.

Отже, відбілювальний вплив магнію на структуру чавуну з негативного фактора перетворюється у фактор позитивний. У нашій роботі така роль магнію перенесена на сірку, що, як і магній, спочатку сприяє відбілюванню виливків, а потім, як і магній, не перешкоджає росту графітної фази під час першої стадії графітизувального відпалу

в кулястій формі (у сплавах Jamabex та Jamag) чи в компактній формі (у сірчистих вибілених чавунах, які розглядаються).

Розбіжність починається при проведенні другої стадії графітизувального відпалу. У сплавах Jamabex і Jamag магній не продовжує цю стадію, і тому ці сплави звичайно мають в'язку феритну матрицю. У сірчистих ЧДКГ сірка гальмує другу стадію графітизації. Тому її доцільно застосовувати у виливках з перлітною чи перлітно-феритною мікроструктурою металеві матриці. Це обмежує «ареал» використання ЧДКГ. Однак і ця ситуація має свої плюси, ЧКГ і ЧВГ можна замінити ЧДКГ тільки в обмеженій номенклатурі виливків триботехнічного призначення і тому чавунний брухт в Україні й інших країнах не буде збагачуватися сіркою.

Для металургів України ця проблема актуальна, тому що український кокс – високосірчистий (він містить до 3 % і більше сірки).

Сплави Jamabex і Jamag вимагають для виплавки підвищену чистоту шихтових матеріалів по сірці, у зв'язку з цим впровадження ЧДКГ на Україні перспективне. Результати досліджень ковкого чавуну з кулястим графітом (типу Jamabex і Jamag) наведені у роботі [8], у ній рекомендовано такі межі вмістів вуглецю і кремнію в цих сплавах: 2,8...3,2 % C та 1,9...2,1 % Si. У ЧДКГ вміст кремнію може бути збільшеним до 2,8 % (в окремих випадках навіть до 3,0 %), вміст же вуглецю може бути знижений до 2,0 % (зокрема з метою стабілізації відбілу в литому стані металу виливків) і нижче (тут ми переходимо в область графітизованих сталей, що ще більш перспективні, ніж ЧДКГ).

Вплив елементів Va і VIa підгруп таблиці Менделєєва на властивості чавуну, що кристалізується, у тому числі на його схильність до графітизації як при кристалізації виливків, так і у процесі його термообробки, має велике наукове та практичне значення.

Ще в роботах А. Мура було цілком виразно показано, що десульфатація сірого чавуну привела до зниження багатьох позитивних характеристик цього сплаву [9]. Так, виплавка на КАМАЗі низькосірчистого чавуну призвела до зменшення його придатності до інокулюючого модифікування [10]. На розчинність сірки у твердому залізі вміст

вуглецю практично не чинить ніякого впливу, а добавка сірки зменшує розчинність вуглецю у рідкому залізі [11].

Гіпотеза (потребує перевірки), про те, що деяка частина атомів вуглецю у цементиті може бути замінена сіркою [12], та це приводить до стабілізації цементиту. Отримані в роботі [13] експериментальні дані підтверджують гіпотезу відповідно до якої, у випадку низького відношення  $S : Mn$ , дифузія вуглецю до зростаючих включень графіту призводить до того, що вони стають розгалуженими. При підвищеному вмісті сірки в розчині (високе співвідношення  $S : Mn$ ) цей поверхнево-активний елемент адсорбується на границях зерен і блоків, перекриваючи шляхи прискореної та нерівномірної доставки вуглецю до зародків графіту. У умовах рівномірного надходження вуглецю з усіх сторін графіт стає компактним.

Сірка у розплавленому залізі присутня у вигляді негативно заряджених іонів, а у чавунах також у вигляді «оторочки» на периферії графітоїдних комплексів. Сірка і її аналоги впливають на характер графітизації чавунних розплавів. Будучи поверхнево-активною, сірка адсорбується (за механізмом хемосорбції) на центрах графітизації і є регулятором масоперенесення вуглецю до центра графітизації [14].

При вмісті в звичайному сірому чавуні 0,1...0,2 % S шар адсорбованих атомів (іонів) сірки на зародках графіту гальмує масоперенесення вуглецю від центрів графітизації і тим самим перешкоджає розчиненню зародків графіту у розплаві. Ми тоді спостерігаємо явище тривалої консервації зародків. Попередження поверхнево активними елементами, зокрема сіркою, передчасного розчинення центрів графітизації у рідкому металі особливо важливе при інокуляційному модифікуванні сірого чавуну. Непрямим підтвердженням здатності консервувати зародки графіту поверхнево-активними елементами може також слугувати і те, що у звичайному чавуні з низьким вмістом сірки (менше 0,05...0,03 % ) графітизувальне модифікування чавуну не ефективне [15]. Для підвищення ефективності та продовження часу дії інокуляційних модифікативів застосовують технологічний варіант комплексної обробки розплаву графітизувальними та відбілювальними (поверхнево-активними) присадками [10, 16]. При високому вмісті сірки у рідкому чавуні (0,3 % і вище) масоперенесення вуглецю до

центра графітизації утруднене і розплав затвердіє білим [17], але консервовані зародки графіту зберігаються, що пояснює схильність такого чавуну до графітизації під час відпалу [18, 19]. Практичне значення мають також чавуни з 0,5...1,0 % сірки, які мають високі триботехнічні властивості та є повноправними заміниками антифрикційних бронз та зносостійких чавунів [20, 21].

При розчиненні сірки властивості рідкого заліза змінюються, зокрема, сильно зменшується поверхневий натяг  $\sigma$ , особливо у високовуглецевих сплавів. Значне зменшення  $\sigma$  спостерігається при збільшенні вмісту сірки до 0,4 %, такий вплив пояснюється тим, що у розплаві заліза сірка є поверхово-активним елементом, її концентрація у поверхневому шарі (товщиною порядком декількох міжатомних відстаней) значно більша середньої концентрації [22].

Великий вплив на розчинність сірки робить наявність третього елемента. Згідно з [23] за впливом на розчинність сірки у розплаві заліза елементи можна розділити на три групи:

*перша*: елементи в яких спорідненість до сірки менша, ніж у заліза (Cu, Co, Ni, W), не впливають на розчинність сірки;

*друга*: вуглець, кремній і фосфор утворюють з залізом хімічні сполуки, у результаті чого зменшується розчинність сірки;

*третья*: елементи з великою спорідненістю до сірки (Ca, Zr, Ti, V, Cr, Mn), які утворюють більш стійкі сульфідні, ніж Fe та зменшують розчинність сірки у залізі.

Згідно з [24], формування та укрупнення сульфідів відбувається у твердому металі у процесі його охолодження, винятковими є випадки, коли спостерігається значна міждендритна ліквідація сірки та марганцю, а також виділення сульфідів у результаті адсорбції сірки на поверхні оксидних фаз. Ця думка спростовується у роботах М. Хіллета та Я. Н. Маліночки [22], які показали, що у чавунах, а також у більшості сталей, сульфідні виділяються або як надлишкова фаза на початковій стадії затвердіння (і тоді вони часто мають форму дендритів), або в складі подвійних та потрійних евтектик.

Вплив сірки на графітизацію чавуну залежить від складу та форми сульфідів. Коли вона у вигляді евтектики знаходиться у розчині, вона гальмує первинну графітизацію при затвердінні чавунів. Підвищення

стійкості карбіду заліза під впливом сірки очевидно пов'язане з тим, що карбід заліза у твердому стані при підвищених температурах здатний розчиняти невелику кількість сірки [25].

Стабілізуюча дія сірки використовується для одержання вибіленого чавуну. У кількості до 1,0 % вона порівняно добре розчинна в рідкому чавуні, але дуже погано у твердих  $\gamma$ - та  $\alpha$ -фазах та майже не розчинна в цементиті нижче температури евтектики.

Тому під час кристалізації чавуну сірка випадає у вигляді сульфідів заліза та марганцю, практично перестає впливати на термодинаміку графітизації. На кінетику графітизації у твердому стані ці сульфіди (особливо типу MnS, FeS) можуть робити дуже істотний вплив [26].

Один з механізмів цього впливу може полягати у такому. Відомо, що між коефіцієнтами лінійного термічного розширення (к. т. р.) речовин та модулем пружності Юнга (E) є певна кореляція [27]. Чим нижче E, тим вище к.т.р. У сульфідів типу MnS та особливо типу FeS, модуль E істотно нижчий, ніж у аустеніту або фериту. Отже, у них вищий к. т. р., аналогічна залежність існує між плавкістю та к. т. р. [28].

При охолодженні чавунних виливків сульфідні включення зменшуються у розмірах швидше, ніж металева матриця, вони відриваються місцями від неї. Сульфідні фази здатні робити зародкову дію на графіт, утворювати «щілини» між підкладкою та металом, сприяти виділенню у них графіту в умовах часткового вакууму. У звичайних же умовах виділення графіту в локальних мікрообсягах супроводжується, як правило, підвищенням тиску через низьку щільність графітної фази. Виникнення тиску завжди гальмує процес графітизації [29].

Автори [30] вважають, що колоїдний характер розчину чавуну відіграє виняткову роль у процесі зародкоутворення тому, що містить ідеальні підкладки для кристалізації графіту. При цьому вказується, що неметалічні включення в чавуні (окисли, сульфіди, нітриди тощо) не роблять ніякого впливу на процес зародкоутворення графіту. Виявлені скупчення окислів та графітних включень нібито не є серйозним доказом кристалізації графіту на ізоморфній підкладці.

Професор А. О. Жуков та д. т. н. Р. Л. Снежной протягом десятиліть категорично заперечували «колоїдну» теорію будови рідкого ча-



вуну. Останній розглядався ними як однофазний, але різко неідеальний, іррегулярний розчин, що містить атомні угруповання (у тому числі і графітоїдного типу) та заму́тнений неметалічними включеннями, що відіграють дуже важливу роль у зародженні твердих фаз під час кристалізації.

В даний час існує велика кількість моделей компактної (кулястої та вермикулярної) графітизації, але жодна з них не може пояснити усі випадки графітизації, що спостерігаються на практиці. Це особливо помітно під час розгляду аномальних випадків графітизації у чавунах (без застосування сфероїдизуючих модифікаторів, зі вмістом сірки понад критичний рівень, а також ефекту перемодифікування) [31, 32].

Школи Б. Маринчека, К. Ортса та інших дослідників велику увагу приділяють гетерогенній нуклеації графіту в чавуні на нерозчинних домішках. Особливу увагу приділяють поверхнево-активним сульфідам типу MnS. Висока розчинність у металі (сульфідів типу FeS) викликає стабілізацію цементиту іонами сірки, що є акцепторами валентних електронів [33].

Активність нерозчинних домішок як підкладки залежить від їх розмірів та тензоактивних властивостей. У роботах [34, 35] встановлено, що при високому співвідношенні  $S/Mn = (0,8 \dots 1,2)$  забезпечується одержання своєрідного міцного чавуну з кулястим графітом та перлітною матрицею. Така структура утвориться через пригнічення сіркою другої стадії графітизації, ці чавуни мають високі властивості міцності:  $\sigma_T = 700\text{--}800$  МПа при  $\delta = 6\%$ .

На думку авторів робіт [35, 36] сірка відноситься до елементів, які гальмують графітизацію та заважають виділенню графіту з розплаву за рахунок гальмування росту на ступенях гвинтових дислокацій зародків графіту.

Основну роль у процесі зародкоутворення графіту відіграють неметалічні включення [37], причому у рідкому чавуні відбувається їхня активація за рахунок комплексів графіту. Визначальним у процесі активації є «злипання» сторонньої частки та графітного комплексу. Аналізуючи характер впливу різних домішкових елементів на процес коагуляції графітних комплексів та умов їх «налипання» на неметалічні включення, автор роботи [37] розділяє їх на графітизувальні та не-

графітизувальні, що підтверджено значними експериментальними матеріалами.

Відповідно до досліджень [38], графіт кулястої форми кристалізується тоді, коли міжфазний натяг та міжфазна енергія базисної грані графіту у контакті з розплавом менша, ніж міжфазна енергія призматичної грані при одночасному високому поверхневому натягу чавуну. При розчиненні сірки у рідкому залізі виділяється значна кількість тепла  $\Delta G = -132,1 + 0,0218T$  кДж/моль [39], що свідчить про виникнення великих сил зв'язку типу Fe.

Під час відпалювання чавуну при  $S/Mn \geq 1$  сірка дещо локалізується в графітній фазі, що обумовлює компактність включень графіту відпалу. При  $S/Mn \leq 1$  сірка зосереджується у сульфідних включеннях типу MnS, що практично не впливає на сфероїдизацію графіту відпалу [40...42]. Аналогічні висновки можуть бути зроблені з робіт [43...45].

Можна сказати, що можливою додатковою причиною кристалізації графіту на сульфідах є утворення мікропорожнин на границях розділу сульфід–матриця, як наслідок різних коефіцієнтів розширення сульфідів та матриці [46].

## **1.2 Фактори впливу на механічні, технологічні та експлуатаційні властивості високовуглецевих сплавів із дрібнозернистими компактними включеннями графіту**

Чавуни є високотехнологічними залізовуглецевими сплавами, що обумовило їх широке поширення, у першу чергу, як конструкційного матеріалу.

Чавуни з дрібнозернистим компактным графітом займають проміжне положення між сірими та високоміцними чавунами. Пропонована технологія їх виробництва відрізняється стабільністю, що практично мало залежить від коливання складу шихти, умов плавки та інших параметрів.

Сірка в більшості випадків не погіршує ливарні властивості нових чавунів. Прийнято вважати, що зі збільшенням вмісту сірки у чавуні знижується його рідкотекучість та різко зростає схильність до утворення гарячих тріщин. Однак зниження рідкотекучості звичайних чавунів відбувається в результаті утворення у розплаві підвищеної кіль-

кості сульфідів марганцю. Підвищення вмісту сірки у низькомаргацевистих чавунах збільшує кількість евтектики [47], знижує температуру евтектики, зменшує в'язкість розплаву та, відповідно, поліпшується рідкотекучість (сірка у цьому випадку служить аналогом фосфору).

Схильність до утворення гарячих тріщин у сталі та чавуні, що зростає зі збільшенням вмісту сірки, обумовлена наявністю на міждендритних ділянках рідкої фази, що часто зберігається до низьких температур у результаті дендритної ліквідації.

Разом з тим збільшення кількості евтектики при підвищеній концентрації сірки у досліджуваних чавунах сприяє заліковуванню несучільностей, що можуть виникати під час затвердінні виливка. Сульфідна фаза розподілена однорідно, а не у вигляді прошарків і при цьому гарячеламкість зменшується. При кристалізації чавуну утвориться фаза зі зниженою щільністю – сульфіди, що зменшує лінійну та об'ємну усадку [48].

Визначальним фактором утворення графіту для чавуну будь-якого складу [49–51] є не співвідношення S/Mn чи Mn/S, а надлишок не зв'язаної з марганцем сірки, тобто вміст вільної сірки ( $\Delta S$ ), обрахований за формулою:

$$\Delta S = [S] - [Mn] / 1,7. \quad (1.1)$$

Критичні значення  $\Delta S$ , коли весь графіт кристалізується в компактній формі, складає 0,08...0,10 %, у той час як відношення Mn/S коливається в широких межах від 0,75 до 1,13 %.

Висока відбілювальна здатність сірки [52], поряд зі сфероїдизацією графіту, створює умови для значного підвищення вуглецю та кремнію у складі ковкого чавуну без побоювання одержання пластинчастого графіту, а також для прискорення процесу графітізуювального відпалу. За рахунок відбілювального впливу сірки, що підсилюється при литті у кокіль, вдалося підвищити вміст вуглецю до 3,5...3,7 %, а Si до 1,9...2,8 %, що забезпечило графітізацію чавуну при 1223 °К за 0,5...1,5 години.

Наявність сульфідної фази і сорбітоподібна форма перліту дозволили використовувати сірчистий чавун, що має гарні протизадирні та антифрикційні властивості, при виробництві поршневих кілець [53, 54]. Заготовки,

відлиті з чавуну з таким складом: 3,4 % C, 1,9 % Si,  $\leq 0,3$  % Mn, 0,4 % S відпалювались за 3 години при 1253 °K, отримуючи перлітну структуру з рівномірно розташованими включеннями графіту компактної форми [43].

Висока зносостійкість сірчистих чавунів знайшла застосування для виготовлення довідного інструменту [55, 56].

Встановлено, що сульфідна фаза співкристалізується з графітом [43,44]. У чавунах з високим вмістом Mn, сульфідна фаза складається тільки з твердого розчину (Mn, Fe)S на базі сполуки Mn. У чавунах з низьким вмістом Mn виявлені складні включення сульфідів, центральну частину яких займають кристали фази  $\alpha$ -заліза. При повільному охолодженні сульфідна фаза кристалізується у вигляді довгих включень «евтектичних дендритів».

Останнім часом за кордоном відновлений інтерес до сірки, як легувального елемента у ковкому чавуні [57–60]. Досліджували вплив сірки і марганцю на кристалізацію та графітизацію ковкого чавуну. При 0,2...0,4 % S процес графітизації при затвердінні чавуну пригальмовується. У феритному ковкому чавуні необхідно обмежити вміст S до 0,1 % та Mn до 0,55 %. Наявність включень Mn, що служать підкладками для графітної фази чавуну, сприяє кристалізації чавуну з вкрапленнями сірого чавуну [57]. У роботах [58, 59] відзначається, що при введенні 0,015 % Al компактна форма графіту зберігається при надлишку S, що дорівнює 0,25...0,30 %. Дифузія атомів сірки до графітних включень вирівнює їх швидкість росту у різних напрямках. При недостатці надлишку сірки (близько 0,1...0,12 %), графітні включення за рахунок збільшення швидкості росту у напрямку цементиту, що розпадається, приймають неправильну форму.

Присадка FeS<sub>2</sub> при виплавці ковкого чавуну забезпечує одержання кулястого графіту при вмісті S > 0,30 % [60].

При вмісті сірки від 0,129 % до 0,533 % структура чавуну змінювалась від феритної (при 0,128 % S) до феритно-перлітної (при 0,233 % S) і перлітної (при 1,382 % та 0,533 %S). Ступінь сфероїдизації графіту підвищувалася з ростом надлишкового вмісту сірки. Механічні властивості змінилися у таких межах:

$$\sigma_B = 351 \dots 501 \text{ МПа}, \text{ НВ} = 1300 \dots 2340 \text{ МПа}, \delta = 12,8 \dots 4,9 \text{ \%}.$$

## ЛІТЕРАТУРА

1. Жуков А. А. Литая графитизированная сталь. / А. А. Жуков, В. М. Жураковский // Литейное производство.– 1993. – № 1 – С. 10.
2. Zhukov A. A. East – West technology transfer. / A. A. Zhukov, A. B. Yanchenko // Cast Metals. – 1992. – Vol. 5. – № 1. – P. 57.
3. Жуков А. А. Графитизированная сталь, как заменитель высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. / А. А. Жуков, А. Б. Янченко // Антифрикционные и износостойкие чугуны : Материалы Международной научной конференции. – К. : Изд. АЛУ Украины. – 1992. – С. 71.
4. Influence of silicon, copper and sulphur on the response to heat treatment of cast iron – carbon alloys with Compact – Graphite. / A. A. Zhukov, A. K. Chakrabarti, S. C. Panigrahi [та ін.] // Trans of Indian Institute of Foundrymen. – 1994. – Vol. 4. – P. 109–116.
5. Неижко И. Г. Графитизация и свойства чугуна / И. Г. Неижко – К. : – Наукова думка. 1989. – 208 с.
6. Cojocarui-Filipiuc V. Hypotheses on the production of metallic materials based on the chemical equilibrium tendency – Applications for Cast Iron Inoculation. / V. Cojocarui-Filipiuc // Jasi. : – Editura Politehnicum. – 2011. – 432 p.
7. Riposan I. Recomandari pentru realizarea fontei cu grafit nodular de inalta plasticitate si tenacitate /I. Riposan// Metalurgia – 2002. – № 1. – P. 14–15.
8. Eutectic cell wall morphology and tensile embrittlement in ferrites spheroidal graphite cast iron / F. T. Shiao, T. S. Lui, L. H. Chen, S. F. Chen// Metallurgical and Materials Transaction A.– 1999. V. 30, № 7 – P. 1775–1784.
9. Жуков А. А. Новое в теории графитизации. Инокулирующее модифицирование чугуна / И. В. Дыбенко, Э. В. Абдуллаев, А. В. Афонаскин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 2 – С. 11–18.
10. О влиянии серы в модифицировании чугуна с пластинчатым графитом /И. В. Дыбенко, Г. И. Клецкин, Э. Х. Тухин, А. А. Жуков // Литейное производство. – 1979. – № 7.– С. 4–6.

11. Stefanescu D. M. Modeling of Cast Iron Solidification / D. M. Stefanescu//The Defining Moments Metallurgical and Materials Transactions. A. Volume 38 A. – July 2007. – P. 1433–1447.
12. Давыдов С. В. Технология наномодифицирования чугуна на основе поверхностно-активных элементов. Ч.1 / С. В. Давыдов // Вестник БГТУ. – 2004. – № 3. – С 98–106.
13. Давыдов С. В. Технология наномодифицирования чугуна на основе поверхностно-активных элементов. Ч. 2 / С. В. Давыдов // Вестник БГТУ. – 2004. – № 4. – С 34–49.
14. О взаимодействии тензоактивных элементов на графитизацию чугунов/ А. А. Жуков, С. В. Давыдов, Р. А. Снежной, С. М. Иваненко // Новое в теории и практике производства и применения высокопрочного чугуна : сб. науч. раб.: – К. : ИПЛ АН УССР. – 1985. – С.89.
15. Влияние марганца и серы на эффект модифицирования чугуна с пластинчатым графитом / И. В. Дыбенко, Г. И. Клецкин, А. А. Жуков, Э. В. Тухин // Плавление и кристаллизация сплавов: труды МИСиС. – М. : Metallurgia. – 1980. – Вып. 123. – С. 68–75.
16. Жуков А. А. Модифицирования серого чугуна с повышенным углеродным эквивалентом / А. А. Жуков, С. В. Давыдов, Г. Н. Бейзер // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1982. – № 7. – С. 157–158.
17. О комплексном модифицировании серого чугуна / А. А. Жуков, С. В. Давыдов, Р. А. Снежной, С. М. Иваненко // Литейное производство. – 1985. – № 3. – С. 9.
18. Палаткина Л. В. Совершенствование дендритной структуры серого чугуна с целью повышения его прочности ; автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Палаткина Любовь Владимировна; НТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 2011. – 20 с.
19. Сернистые чугуны с компактным графитом / А. А. Жуков, С. В. Давыдов, В. В. Фролов, Н. В. Карпов // Литейное производство. – 1983. – № 3. – С. 5–6.
20. Высокопрочные сернистые чугуны с компактным графитом / А. А. Жуков, А. М. Поплавский, В. А. Карасева и др. // Вестник машиностроения. – 1982. – № 4. – С. 57.
21. А. с. № 115158 СССР, Б.И. Чугун антифрикционный / А. А. Жуков, С. В. Давыдов. Оpubл. – 1985. – № 15. – С.76.
22. Малиночка Я. Н. Сульфиды в сталях и чугунах / Я. Н. Малиночка, Г. З. Ковальчук. – М. : Metallurgia, 1988. – 248 с.

23. Лунев В. В. Сера и фосфор в стали / В. В. Лунев, В. В. Аверин. – М. : Металлургия, 1988. – 257 с.
24. Молотилов Б. В. Сера в электротехнических сталях. – М. : Металлургия, 1973. – 176 с.
25. Пивоварский Эуген. Высококачественный чугун. – (пер. с нем.). – М. : Металлургия. 1965. – Т. 1. – 650 с., Т. 2. – 523 с.
26. Жуков А. А. О графитизирующем воздействии сульфидных включений в стабильно-половинном чугуне / А. А. Жуков, Г. И. Сильман, С. В. Давыдов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1983. – № 4. – С. 36–37.
27. Жуков А. А. Электронное строение металлов и сплавов и термодинамика структурообразования / А. А. Жуков // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1978. – № 8. – С. 31–36.
28. Савуляк В. І. Побудова та аналіз моделей металевих сплавів: монографія / В. І. Савуляк, А. О. Жуков, Г. О. Чорна. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, – 1999. – 200 с.
29. Жуков А. А. Геометрическая термодинамика сплавов железа / А. А. Жуков. – М. : Металлургия, 1971. – 272с.
30. Островский О. И. Свойства металлических расплавов / О. И. Островский, В. А. Григорян, А. Ф. Вишкарев. – М. : Металлургия, – 1988. – 304 с.
31. Сезонов О. А. Синергетическая модель компактной графитизации / О. А. Сезонов // *Проблемы литейного металловедения чугуна : межвузовский сборник*. – Набережные Челны : Кампи. –1991. – С. 29–37.
32. Hughes I.C.H. The importance and practice of inoculation in iron castings production // *Solidification Technology in the Foundry and Casthouse* / I.C.H. Hughes // London. Metals society – 1983. – p. 223–231.
33. Жуков А. А. Новое в теории графитизации. Часть 2. – Электронное строение компонентов графитизирующихся систем / А. А. Жуков // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1987 – № 7. – С. 7–14.
34. Давыдов С. В. Как получить высокопрочный чугун из сернистого ваграночного чугуна / С. В. Давыдов // *Литейное производство*. – 2002. – № 11. – С. 27–28.
35. Тодоров Р. П.. Графитизированные железоуглеродистые сплавы / Р. П. Тодоров. – М. : Металлургия, 1981. – 320 с.

36. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович // М. : Машиностроение, 1996. – 562с.
37. Худокормов Л. Н. Роль примесей в процессе графитизации чугунов. – Минск : Наука и техника. – 1968. – 154 с.
38. Неижко И. Г. Некоторые проблемные вопросы графитизированных чугунов / И. Г. Неижко // Процессы литья. – 2000. – № 4. – С. 30–31.
39. Явойский В. И. Теория процессов производства стали. / В. И. Явойский. – М. : Metallurgizdat. – 1963. – 820 с.
40. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М. Е. Гарбер – М. : Машиностроение, 2010. – 280 с.
41. Кульбовский И. К. Получение чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом без применения магнийсодержащих модификаторов / И. К. Кульбовский, А. Н. Поддубный, Р. А. Богданов // Литейное производство. – 2007. № 2. – С. 7–9.
42. Кульбовский И. К. Роль микропримесей в формировании структуры графита в чугуне / И. К. Кульбовский, Р. А. Богданов // Литейщик России. – 2006. – № 12. – С. 31–34.
43. Жуков А. А. Синтез высокосернистых конструкционных чугунов / А. А. Жуков, В. А. Карасева, В. Л. Абаскалов // Увеличение прочности отливок в автомобилестроении. – М. : Наука, 1981, – С. 79–87.
44. Жуков А. А. Сульфидная фаза в высокосернистых чугунах / А. А. Жуков, А. Н. Борисова, В. А. Карасева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1977. – № 5. – С. 32–35.
45. Волощенко М. В. Высокосернистый чугун – конструкционный материал, имеющий перспективу / М. В. Волощенко, А. К. Шурин // Повышение физико-механических и служебных свойств чугуна в отливках путем их легирования, модифицирования, термической и высокоэнергетической обработки : К.: ИПЛ НАН Украины, – 1995. – С. 17.
46. Каверин В. В. Особенности выделения неметаллических включений при охлаждении стали / В. В. Каверин, С. М. Полянская, В. П. Песчаная // Металлы. – 1981. – № 5. – С. 11–14.
47. Жуков А. А. О влиянии элементов V и VI групп на активность углерода при ледебуритном превращении / А. А. Жуков, А. П. Яременко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1973. – № 5. – С. 145–149.



48. Высокосернистый чугун повышенной прочности / А. А. Жуков, В. А. Шалашов, А. Г. Османцев, В. А. Карасева // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1975. – № 5. – С. 39–43.
49. Марукович Е. И. Механизм формообразования графита при кристаллизации чугуна / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // *Литейное производство.* – 2000. – № 11. – С. 18–19.
50. Гиршович Н. Г. Роль серы в графитизации ковкого чугуна / Н. Г. Гиршович, П. Т. Шевчук // *Литейное производство.* – 1967. – № 7. – С. 29–30.
51. Широков В. В., Фосфористые чугуны – дешево и износостойко / В. В. Широков, Л. А. Арендар, А. В. Широков // *Оборудование и инструмент.* – 2010. – № 1. – С. 60–63.
52. Todorov R. P. Factorii care determina cristalizarea structurilor obisnuite si Widmannstatten. / R. P. Todorov, H. G. Hristov // *Revista de Turnatoie.* – № 11, 12. – 2003. – P. 13–16.
53. Жуков А. А. Свойства сплавов в отливках / А. А. Жуков, В. А. Шалашов, В. А. Карасева // *Труды 17 совещания по теории литейных процессов.* – М. : Наука. – 1975. – С. 45–49.
54. Оптимизация химического состава чугуна поршневых колец с повышенным содержанием серы / В. А. Карасева, А. А. Жуков, Б. Л. Ханин и др. // *Литейное производство.* – 1978. – № 11. – С. 28–29.
55. Пат. №2156809, Россия, С21С1/10,С22С37/04. Способ получения высокопрочного чугуна. Кавицкий И. М.; Рушаник Б. А.; Крамской В. Н.; Поляков В. В.; Зенкин Н. Н.; Рубин З. Е.; Лужнов Ю. И.; Бродский М. Л. – Оpubл. 27. 09. 2000.
56. Патент России, №2172782, С21С1/10. Модификатор чугуна и способ получения модификатора чугуна. / Скаланн Торбьерн (NO). – Оpubл. 07.08.2001.
57. Amende W. Вceinflussen des Getüges von Tempergub mit Schweferl und Mangan / W. Amende // *Maschinenmarkt.* – 1978. – V. 84, – № 82. – P. 1601–1604.
58. Graphite nucleants (microinclusions) characterization in Ca/Sr inoculated grey irons / I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, T. Skaland // *SPCI 7 (Science and Processing of Cast Iron International Conference), Barcelona, Spain.* – 2002. – P. 345–357.

59. Меднев А. Е. Относно графитизацията и механичните свойства на высокосернисти чугуни, модифицирани с алюминий/ А. Е. Меднев // Ръце : – 1979. – Сер. 4, № 21. – С. 277–281.
60. Tabor A. Zeliwo ciagliwe z kulkowym gratitem zarzenia / A. Tabor // Przegląd Odlewnictwa. – 1980. – № 7. – S. 210–213.
61. Nobutoro K. Effect of the control of carburizing time and sulfur content on chill decrease in induction furnace melting of cast iron / K. Nobutoro, S. Katasumi, K. Kazuo // Rept. Cast. Res. Lab. – 1979. – № 30. – P. 69–77.
62. Мамраеу I. Е. The manganese – sulphur ratio in grey iron / I. Е. Мамраеу // Fonderie Belge. – 1981. – № 1. – P. 11–15.
63. Nobutaro K. Influence of sulfur on dissolving behaviour of graphite in molten cast iron / K. Nobutaro, S. Katsumi // Rept. Cast. Res. Lab. – 1979. – № 30. – P. 61–67.
64. Кузнецов Б. Л. Экономическая и технологическая целесообразность плавки чугуна в дуговых печах / Б. Л. Кузнецов, Ю. П. Поручиков // Литейное производство. – 1976. – № 10. – С. 4–5.
65. Савуляк В. І. Енерго- та ресурсозбережні технології забезпечення якості корпусів вакуумних насосів доїльного устаткування / В. І. Савуляк, О. Б. Янченко // Збірник наукових праць ВНАУ. – Вінниця. – 2012. – Вип. 11, т. 1(65).– С. 195–200.
66. Жуков А. А. Влияние сульфидных включений в чугунах на их антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием / А. А. Жуков, А. Б. Янченко, И. О. Пахнючий // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах : тезисы докладов VI республиканской научно-техн. конф. – Запорожье : ЗМИ. – 1991. – С. 128.
67. Шульте Г. Ю. Неметаллические включения в ковком чугуне / Г. Ю. Шульте // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах : тезисы докладов VI республиканской научно-техн. конф. – Запорожье : – ЗМИ. – 1976. – С.17–18.
68. Лунев В. В. Неметаллические включения в сталях, чугунах и феросплавах / В. В. Лунев, В. П. Пирожкова, С. Г. Грищенко. – Запорожье : Днепропетровский металлург, 2006. – 384 с.
69. Бобро Ю. Г. Изотермическая закалка чугуна / Ю. Г. Бобро, Б. Н. Пивоваров. – Харьков : Прапор, – 1976. – 112 с.
70. Жуков А. А. Производство чугуна с шаровидным графитом на Рижском дизелестроительном заводе / А. А. Жуков, В. А. Альбинский,

Н. И. Ключнев // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1978. – № 1. – С. 61–62.

71. Zhukov A. A. Some peculiarities and new trends in ADI technology / A. A. Zhukov, O. B. Yanchenko // *Indian Foundry Journal.* – 1992. – № 8. – P. 17–22.

72. Zhukov A. A. Certain topics of the present state of the theory of graphitization of cast iron / A. A. Zhukov // *Giessereiforschung.* – 1992. – № 3. – P. 106–112.

73. Неижко И. Г. Термическая обработка чугуна / И. Г. Неижко // К. : Наукова думка. – 1992. – 208 с.

74. Kovacs B. V. The effect of alloying elements on their segregation in ADI / B.V. Kovacs // *World Conference on ADI.* – Indian Lakes, 1991.

75. Nili Ahmadabadi M. Effects of successive – stage austempering on the structure and impact strength of high – Mn ductile iron / Nili Ahmadabadi M., T. Ohide, E. Niyama // *Cast Metals.* – 1992. – V. 5, № 2. – P. 62–72.

76. Ключнев Н. И. Литейные свойства чугуна / Н. И. Ключнев. – М. : Машиностроение, 1968. – 132 с.

77. Савуляк В. И. Стабильные технологии получения высокоуглеродистых износостойких сплавов с компактным графитом / В. И. Савуляк, А. Б. Янченко // *Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювані технології : матеріали Міжнародної наук.-пр. конф.:* – Маріуполь : ПДТУ. – 2012. – С. 48–49.

78. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.

79. Скворлов А. И. Демпфирующие свойства графитизированных сталей с ферритокарбидной матрицей / А. И. Скворлов, В. М. Кондратов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1980. – № 8. – С. 45–48.

80. Гарост А. И. Железоуглеродистые сплавы: структура и свойства / А. И. Гарост – Минск : Беларуснавука. – 2010. – 252 с.

81. Жураковский В. М. Организация трансформирующей структуры и обеспечение заданных свойств графитосодержащей стали : дис. ... док. техн. наук : 05.02.01. / Жураковский В. М. – Минск, 1985. – 551 с.

82. Жуков А. А. Графитизированная сталь / А. А. Жуков, В. К. Григорович // *Материалы в машиностроении : Справочник / под ред. И. В. Кудрявцева,* – М. : Машиностроение, – 1968. – Т. 3. – С. 78–383.

83. Жуков А. А. Основы расчета состава, структуры и прочности серого чугуна / А. А. Жуков // Вопросы теории литейных процессов : сб. науч. тр. – М. : Машгиз, – 1960. – С.163–252.

84. Улучшение отжигаемости высокопрочного чугуна легированного серой / А. А. Жуков, В. А. Карасева, В. И. Иванов, В. А. Шалашов // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. – 1979. – № 9. – С. 56–59.

85. Новый высокосернистый чугун повышенной обрабатываемости резанием / А. А. Жуков, А. М. Заречный, И. О. Пахнючий и др. // Трение и износ. – 1989. – № 6. – С. 1104–1107.

86. Тодоров Р. П. Графитизированные железоуглеродистые сплавы / Р. П. Тодоров, Я. Б. Арсов // М. : Металлургия. – 1981. – 320с.

87. Шалашов В. А. К вопросу об остаточных карбидах в хромистом ковком чугуне / В. А. Шалашов, А. А. Жуков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1964. – № 2. – С. 483–485.

88. Анализ процесса графитизации при отжиге чугуна отбеленных кокильных отливок методом высокотемпературной металлографии / А. В. Афонаскин, О. Д. Опалихина, А. А. Жуков и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 9. – С. 89–91.

89. Яковлев А. Ю. Влияние меди на структуру и свойства графитизированной стали / А. Ю. Яковлев, И. П. Волчок // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. – 2008. – № 1. – С. 44–46.

90. Повышение конструктивной прочности графитизированных сталей / И. В. Акимов, И. П. Волчок // Вестник двигателестроения: Научно-технический журнал. – 2008. – № 2. – С. 194–197.

91. Волчок И. П. Термостойкость графитизированных сталей / И. П. Волчок, И. В. Акимов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 1. – С. 56–59.

92. Жураковский В. М. Влияние бора и кальция на графитизацию заэвтектоидной кремнистой стали / В. М. Жураковский, Э. Н. Погребной, Б. В. Самелик // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 4. – С. 119–121.

93. Некоторые закономерности геометрической термодинамики графитизации. В. А. Ильинский, А. А. Жуков, Л. В. Костылева и др. // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. – 1986. – С. 26–29.

94. Янченко О. Б. Графітізація литої сталі / О. Б. Янченко, В. І. Солоненко // Матеріали міжнародної науково-практичної конф.

Структурна релаксація у твердих тілах : Вінниця : ВДПУ ім. М. Коцюбинського, 2009. – С. 30–31.

95. Жураковский В. М. Влияние модифицирования на графитизацию заэвтектоидной кремнистой стали / В. М. Жураковский, В. Я. Садчиков, А. Г. Мелах и др. // Прогрессивная технология литейного производства в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении : межвузовский сб. – Ростов н/д. : РИСХМ, – 1979. – С. 30–41.

96. Жураковский В. М. Влияние РЗМ на структурообразование литой графитизированной стали / В. М. Жураковский, В. Я. Садчиков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 3. – С. 114–116.

97. Акімов І. В. Підвищення фізико-механічних властивостей графітованих сталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / І. В. Акімов ; Запорізь. нац. техн. ун-т. – Запоріжжя, 2004. – 26 с.

98. Волчок И. П. Разрушение графитизированных сталей при циклических нагрузках / И. П. Волчок, И. В. Акимов, И. М. Андрейко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобуд. – 2007. – № 2. С. 9–13.

99. Akimov I. V., Volchok I. P. Pidvyshchennia vysoko-temperaturnoi vytryvalosti hrafityzovanykh stalei [Increase of high-temperature endurance of graphitized steels]/ I. V. Akimov, I. P. Volchok // FIDES. International Forum for the Development of Education and Science Proceedings. – Norway, 2010. – P. 61.

100. Горев К. В. Влияние модификации алюминия на графитизацию кремнистой стали / К. В. Горев, Л. А. Шевчук, В. И. Гуринович // Изв. АН БССР. Серия физико-технических наук. – 1972. – № 2. – С. 24–27.

101. Формирование оптимальной структуры графитизированной стали / В. М. Жураковский, Б. В. Самелик, В. Я. Садчиков и др. // Технология и орг. пр-ва. – 1986. – № 4. – С. 35–36.

102. Жураковский В. М. Исследование структурного состояния графитизированной стали с помощью динамических эффектов доменной структуры / В. М. Жураковский, А. В. Попов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2007. – № 1. – С. 40–43.

103. Кузін О. А. Роль структури в процесах зношування феритоперлітних сталей / О. А. Кузін, Т. М. Мещерякова, М. О. Кузін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 224–229.

104. Савуляк В. І. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів, монографія / В. І. Савуляк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 161 с.
105. Zhukov A. A. Litaya grafitizirovannaya stal [Cast graphitized steel]. Liteynoye proizvodstvo/ A. A. Zhukov, V. M. Zhurakovskiy // Foundry Production. – 1993. – № 10. – P. 13–15.
106. Жуков А. А. Геометрическая термодинамика железоуглеродистых сплавов, легированных графитизирующими элементами / А. А. Жуков // – Изд. АН СССР. Металлы. – 1978. – № 5. – С. 210–218.
107. Жуков А. А. Электронное строение металлов и сплавов и термодинамика структурообразования / А. А. Жуков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1978. – № 4. – С. 86–90.
108. Жуков А. А. К вопросу о полной нерастворимости компонентов бинарных и тройных систем/ А. А. Жуков // Известия вузов. Машиностроение. – 1966. – № 1. – С. 146–149.
109. Изменение состава, структуры и твердости цементита при закалке / А. А. Жуков, В. А. Шалашов, В. К. Томас, Б. А. Ульянова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1970. – № 1. – С. 18–21.
110. Жуков А. А. О диаграмме состояния сплавов системы Fe–C / А. А. Жуков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1988. – № 4. – С. 2–9.
111. Жуков А. А. Изменение активности компонентов двухфазных систем под влиянием дополнительного легирования / А. А. Жуков, Э. В. Абдуллаев, Т. Ф. Архипова // Изд. АН СССР. Металлы. – 1990. – С. 200–201.
112. Жуков А. А. Диаграмма состояния железо–цементит–алмаз с линиями изоактивности углерода / А. А. Жуков // Изд. АН СССР. Металлы. – 1976. – № 4. – С. 172–175.
113. Жуков А. А. О факторе плотности линий изоактивности компонентов на диаграммах состояния / А. А. Жуков, Р. Л. Снежной // Журнал физической химии. – 1969. – № 8. – С. 2122–2124.
114. Hillert M. Recent Research of Cast Iron/ M. Hillert // Detroit : Gordon and Breach. – 1968. – P. 101–114.
115. Hillert M. Phase Equilibria, Phase Diagrams and Phase Transformations: A Thermodynamic Basis / M. Hillert. Cambridge : Cambridge Univ. Press – 1998. – 596 p.

116. Жуков А. А. Новое в теории графитизации. Часть 1. / А. А. Жуков // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1984. – № 11. – С. 52–58.
117. Жуков А. А. О влиянии серы на температуру эвтектических превращений в системе железо–углерод–сера / А. А. Жуков, А. П. Яременко // *Журнал физической химии.* – 1974. – № 9. – С. 2351–2352.
118. Жуков А. А. Некоторые вопросы геометрии диаграмм состояния сплавов железо–углерод–сера / А. А. Жуков, В. В. Зволинская // *Журнал физической химии.* – 1964. – № 2. – С. 483–485.
119. Жуков А. А. О диаграмме состояния эвтектических сплавов / А. А. Жуков // *Журнал физической химии.* – 1961. – № 9. – С. 2137–2141.
120. Savulyak V. I. Cellular precipitation of excessive phase during the start of bainitic transformation / V. I. Savulyak, A. A. Zhukov, T. F. Arkhipova // *The Bulletin of Polytechnic Institute of Jassy.* – 2000. – Vol. 46, № 3–4. – P. 113–119.
121. Жуков А. А. Некоторые вопросы геометрии диаграммы состояния сплавов железо–углерод и железо–углерод–кремний / А. А. Жуков // *Журнал физической химии.* – 1962. – № 6. – С. 1371–1375.
122. Жуков А. А. Дальнейшее развитие метода Хиллберта в расчетах активностей компонентов тройных систем в двухфазных областях / А. А. Жуков, Э. В. Абдуллаев, Т. Ф. Архипова // *Журнал физической химии.* – 1989. – № 5. – С. 1375–1376.
123. Жуков А. А. Диаграммы состояния Fe–C сплавов / А. А. Жуков, Г. И. Сильман // *Справочник по чугуному литью* / под ред. Н. Г. Гиршовича. – 3-е изд. – Л. : Машиностроение. – 1978. – С. 7–18.
124. Zhukov A. A. New computation methods in the analysis of the Fe – C – Ca and Fe – C – Mn systems in the eutectic range / A. A. Zhukov, E. P. Shilina, T. F. Arkhipola // *CALPHAD.* – 1989. – № 1. – P. 23–32.
125. Воробьев А. П. Влияние серы на графитизацию чугуна / А. П. Воробьев, Н. В. Игнатенко, Л. Я. Козлов // *Проблемы литейного металловедения чугуна : межвузовский сборник – Набережные Челны.* : Изд. КамПИ. – 1992. – С. 12–16.
126. Влияние серы на графитизацию чугуна / А. А. Жуков, С. М. Иваненко, А. М. Заречный, С. Ф. Гуртовая // *Изд. АН СССР. Металлы.* – 1988. – № 6. – С. 103–105.

127. О сокристаллизации графита и сульфидов в сером чугуна / А. А. Жуков, С. М. Иваненко, В. А. Кузьменко, А. Б. Янченко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 11. – С. 77–78.

128. Активность, дезактивация и реактивация неметаллических включений как центров графитизации в чугуна/ Г. Ю. Шульте, Р. Л. Снежной, А. А. Жуков, А. Б. Янченко // Литейное производство. – 1992. – № 11. – С.3–6.

129. Жуков А. А. Технологически стабильные процессы получения чугунных отливок увеличенной прочности и пластичности / А. А. Жуков, А. Б. Янченко, С. В. Давыдов // Литейное производство. – 1992. – № 1. – С.12–14.

130. Новый высокосернистый чугун повышенной обрабатываемостью резанием / А. А. Жуков, И. О. Пахнющий, В. А. Кузьменко, С. В. Давыдов // Трение и износ. – 1989. – № 6. – С. 1104–1107.

131. Жуков А. А. О влиянии нерастворимых в цементите элементов на активность углерода в нем и на склонность чугуна к графитизации/ А. А. Жуков, Г. Ю. Шульте, А. Б. Янченко // Изв. АН РФ Металлы. – 1994. – № 1. – С.106–112.

132. Жуков А. А. О влиянии кремния и серы на активность углерода в цементите  $Fe_3C$  / А. А. Жуков, Г. Ю. Шульте, А. Б. Янченко // Журнал физической химии. – 1993. Т. 67. – № 12. – С. 2480–2482.

133. Вайгард У. Введение в физику кристаллизации металлов / У. Вайгард. – М. : Мир. 1967. – 170 с.

134. Чалмерс Б. Теория затвердевания/ Б.Чалмерс // М : Металлургия. – 1968. – 213с.

135. Скаланд Т. Механизмы зарождениеобразования в высокопрочном чугуна / Т. Скаланд.// Foundry Products.– 2006. – С. 5–24.

136. Особенности эвтектических процессов в комплекснолегированных белых чугунах / Г. Е. Белай, Н. В. Дворникова, М. О. Матвеева. // Эвтектика V. Тр. международной конф. – Днепропетровск : Изд ДНМАУ, 2000.– С.230–234.

137. Гольдштейн Я. Е. Инокулирование железоуглеродистых расплавов / Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М. : Металлургия, 1993. – 416 с.

138. Андреев В. В. Роль активных элементов в повышении эффективности графитизирующих железокремниевых лигатур / В. В. Андреев, Л. С. Капустина // Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей : сб. докладов Литейного



консилиума № 1. – Челябинск : – Челябинский Дом печати, 2006. – С. 34.

139. Solberg J. K. Nuclei for heterogeneous formation of graphite spheroids in ductile cast iron / J. K. Solberg, M. Onsoien // *Material Science and Technology*. – 2001. – V. 17. – P. 1238.

140. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. – М. : Машиностроение, 1966. – 562 с.

141. Тиллер У. Затвердевание / У. Тиллер // *Физическое металловедение*. – сб. – М. : Мир, 1968. – Вып.2. – С. 155–168.

142. Салли И. В. Кристаллизация при сверхбольших скоростях охлаждения / И. В. Салли. – К. – Наукова думка. – 1972. – 15 с.

143. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение / Ван Флек Л. – М. : Атомиздат, 1975. – 472 с.

144. Данилов В. И. Строение и кристаллизация жидкостей / В. И. Данилов // – К. : Изд-во АН СССР. – 1956. – 202 с.

145. Давыдов С. В. Влияние термокинетических факторов на структурообразование в графитизированных чугунах: автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.02.01; 05.16.01 / Давыдов С. В. ; Московский государственный индустриальный университет. – М., 2003. – 50 с.

146. Patterson W. Beitrag zur Kristallisation des lamellaren Eisen-Graphit-Entektikume in Gusseisen / W. Patterson, D. Amman // *Giesserei Techn.* – Wiss. Beih. – 1959. – № 23. – S. 1245–1247.

147. Вертман А. А. Свойства расплавов железа / А. А. Вертман, А. М. Самарин // М. : Наука, 1969. – 182 с.

148. Сильман Г. И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях / Г. И. Сильман. – Брянск : БГИТА – 2004. – 328 с.

149. Severin D. Steigerung der Lebensdauer von Bremscheiben / D. Severin, U. Franke, M. Lampic // *ATZ*. – 2002. – № 11. – S. 1016–1023.

150. Савуляк В. І. Технологія стабільного забезпечення структури і експлуатаційних властивостей антифрикційних високовуглецевих сплавів зустрічним модифікуванням / В. І. Савуляк, О. Б. Янченко // *Металургія та матеріалознавство : міжвузівський збірник*. – Луцьк : ЛНТУ, Вип. 31. 2011. – С.318–322.

151. Бунин К. П. Отбеленный чугун / К. П. Бунин // М. : Металургиздат, 1947. – 92 с.

152. Zhukov A. A. New viewpoints and technologies in field of austempering of Fe-C alloys / A. A. Zhukov, A. Basak, A. V. Yancheiko // *Materials science and Technology*. – 1997. – № 5. – P. 401–407.
153. Ващенко К. И. Магниевый чугун / К. И. Ващенко, Л. Софрони. – К. : Машгиз, 1960. – 487 с.
154. Богачев И. Н. Металлография чугуна / И. Н. Богачев. – М. : Машгиз, 1952. – 368 с.
155. Снежной Р. Л. Теории образования шаровидного графита в чугуне / Р. Л. Снежной // *Литейное производство*. – 1974. – № 5. – С. 12–17.
156. Жуков А. А. О образовании Fe – C – комплексов аренового типа в железоуглеродистых сплавах / А. А. Жуков, Р. Л. Снежной // *Термодинамика и физическая кинетика структурообразования в стали и чугуне* : Изд. ОНТИ ВНИИЛТЕКМАШ, 1967. – Вып 3. – С.175–178.
157. Кинетика и термодинамика взаимодействия газов с жидкими металлами: сб. АН СССР под ред. И. В. Агеева – М. : Наука. – 1974. – 207 с.
158. Surface properties are extremely thin graphite lamellae/ Н. Р. Boehm, А. Claus, G. Fischer, U. Hoffman // *Proceedings 5<sup>th</sup> Conference on carbon*. – 1961. – P. 233.
159. Снежной Р. Л. Некоторые вопросы термодинамики и кинетики процесса графитизации / Р. Л. Снежной // *Высокопрочный чугун* : сб.: – К. : Госиздат Тех. лит. УССР, 1964. – С. 27–37.
160. Физико-химическая модель графитизирующего эффекта от кремниевых лигатур и ее реализация на Клинцовском заводе поршневых колец / Н. И. Бестужев, А. Н. Бестужев, В. Л. Трибушевский и др. // *Литейное производство*. – 2007. – № 6. – С. 7–12.
161. Cojocarú-Filipiuc, V. Remanent graphite and its implication in modification process of iron / V. Cojocarú-Filipiuc // *Metalurgia International*. – 2010. – V. XV, No. 5. – P. 57–62.
162. Рипоза И. Центры кристаллизации графита в серых чугунах / И. Рипоза, М. Чизамера, Т. Скаланд, М. И. Онсойен // *Elkem ASA, Foundry Products*. – 2006. – С. 24–37.
163. Коровин В. А. Комплексная обработка расплава стали и чугуна : монография / В. А. Коровин, Р. Н. Палавин.– Нижний Новгород. : Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – 2009. – 101 с.
164. Кульбовский И. К. Получение чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом без применения магнийсодержащих модификато-

ров / И. К. Кульбовский, А. Н. Поддубный, Р. А. Богданов // Литейное производство.– 2007. – № 2. – С. 7–9.

165. Высокосернистый антифрикционный чугун / А. А. Жуков, С. В. Давыдов, С. М. Иваненко, А. А. Вдовиченко // Литейное производство.– 1986. – № 6.– С. 27–29.

166. Shezhoy R. L. Factors affecting shape of graphite in cast iron / R. L. Shezhoy, A. A. Zhukov // The Metallurgies of Cast Iron (Proceedings of the Geneva international symposium). – Geneva : Georgipubl Go. St Saphorin Switzerland, 1975. – P. 13–29.

167. Влияние серы на фазовые превращения в чугунах, получаемых по новым ресурсосберегающим технологиям / А. А. Жуков, А. Б. Янченко, Г. Ю. Шульте и др. // Процессы литья. – 1994.– № 2. – С. 112–117.

168. Жуков А. А. Ступенчатые режимы закалки чугунов на бейнитную структуру / А. А. Жуков, А. Б. Янченко, П. М. Котляров // Антифрикционные и износостойкие чугуны : материалы научно-практической конференции. – Винница. : Изд. ассоциации литейщиков Украины, 1992. – С. 69–71.

169. Кульбовский И. К. Роль микропримесей в формировании структуры графита в чугуне / И. К. Кульбовский, Р. А. Богданов // Литейщик России. – 2006. – № 12. – С. 31–34.

170. Жуков А. А. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов / А. А. Жуков, Г. И. Сильман, М. С. Фрольцов. – М. : Машиностроение, 1984. – 104 с.

171. Перспективы использования отходов медноникелевого производства для легирования чугуна / А. А. Жуков, В. А. Шалашов, А. Н. Квятковский, С. В. Давыдов // Технология, организация и экономика машиностроительного производства. – 1982. – № 4. – С. 1–3.

172. Новые методы получения чугуна с шаровидным и компактным графитом / А. А. Жуков, В. С. Чуркин, А. Н. Крикун и др. Полифосфатные холоднотвердеющие смеси и отливки из высокопрочного чугуна : тезисы докладов Советско–Чехословацкой научно-практической конф. – Липецк, 1989. – Ч. 2. – С. 202–203.

173. Жуков А. А. Интенсификация кристаллизации чугунных отливок с целью их отбела и получения в них термически обработанного дисперсного компактного графита при перлитной или ферритной матрице / А. А. Жуков, А. Б. Янченко, А. Н. Семенов // Научно-

практическая конференция посвященная 40-летию НПО НИИСЛ : тезисы докладов. – Одесса, 1991. – С. 42.

174. Жуков А. А. Антифрикционные теплостойкие чугуны с композиционной структурой / А. А. Жуков, В. П. Половинчук, А. Б. Янченко // Проблемы литейного металловедения чугуна: Межвузовский сборник. – Набережные челны. – Изд. Камский политехнический институт, 1992. – С. 21–28.

175. Жуков, А. А. Износостойкие антифрикционные хромо-медистые чугуны / А. А. Жуков, В. П. Половинчук, В. С. Чуркин // Изв. высш. учебных заведений. Черная металлургия. – 1993. – № 4. – С. 30–31.

176. А. с. 1793001 СССР, МКИ С 22 С 38/34. Графитизированная сталь / И. П. Волчок, О. Б. Колотилкин, С. А. Уваров (СССР). – № 4910094; заявл. 11.02.91 ; опубл. 07.02.93, Бюл. № 5. – 2 с.

177. Савуляк В. И. Высокосернистые и серно-медистые антифрикционные чугуны улучшенной обрабатываемости резанием / В. И. Савуляк, А. А. Жуков, И. О. Пахнющий // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1998. – № 3. – С. 3.

178. Жуков А. А. Экспресс-метод определения обработки чугуна резанием / А. А. Жуков, И. О. Пахнющий // Современные методы и приборы для определения качественных параметров чугуна во время плавки. – Волгоград. – Изд. НПО «ВНИИТИАМ». – 1985. – С. 17–20.

179. Пахнющий И. О. Ускоренный метод определения обработки металлов резанием / И. О. Пахнющий, В. А. Кузьменко // Повышение эффективности и надежности машин и процессов : Сб. науч. трудов – К. : УМПВО, 1989. – С. 121–125.

180. Жураковский В. М. Закаливание графитизированной стали при индукционном нагреве / В. М. Жураковский, В. М. Жданов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1979. – № 9. – С. 15.

181. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д. : Маковецкий, 2008. – 196 с.

182. Pat. US5830285, C21D1/26; C21D1/84, C21D8/06, C22C38/12, C22C38/60. Fine Graphite uniform dispersion steel excellent in gold Machinability, Cuttability and Hardenbility, 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.

183. 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.

184. Изготовление литых валков из графитизированной стали / Е. Н. Вишнякова, В. В. Коробейник, В. П. Приходько, В. Т. Козлов // Литейное производство. – 1992. – № 2. – С. 12–13.

185. Ильинский В. А. Закономерности микроликвации в железоуглеродистых сплавах и новые возможности литейной технологии / В. А. Ильинский, А. А. Жуков, Л. В. Костылева // Обменный доклад 55-го Международного конгресса литейщиков. – М. : ВНИИТЭМР, 1988. – С. 125–137.

186. P'inskii V. A. Mechanism of microsegregation in iron – carbon alloys and new possibilities in foundry technology/ V.A. P'inskii, A. A. Zhukov, L. V. Kostyleva // Cast Metals. – 1990. – V. 3, № 1. – P. 42–48.

187. Взаимодействие и массоперенос в жидком чугуна / А. А. Жуков, В. А. Ильинский, Ю. Ю. Жигуц, Л. В. Костылева // Литейное производство. – 1986. – № 2. – С. 7–9.

188. Ильинский В. А. О существовании в системе Fe–C–Si группы неликвирующих сплавов с постоянными температурами затвердевания / В. А. Ильинский, Л. В. Костылева, М. Н. Литвиненко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1992. – № 2. – С. 3–8.

189. Оптимизация материалов пары трения «тормозной диск–колодка» / Д. А. Болдырев, М. М. Криштал, В. И. Полуниин, Н. Б. Цалина // Материалы в автомобилестроении. Ч. 1. Металлические материалы. – Сборник докладов II международной научно-практической конференции 10–11 июля 2003 г. – Тольятти : ОАО «АВТОВАЗ». – 2003. – С. 158–164.

190. Влияние меди и фосфора на обрабатываемость чугуна резанием и износостойкость / А. А. Жуков, И. О. Пахнющий, О. Д. Опалихина, А. Б. Янченко // Антифрикционные и износостойкие чугуны : материалы международной конференции. – Винница : АЛУ. – 1992. – С. 53–54.

191. Жуков А. А. Формирование высокоуглеродистых поверхностных слоев на стали и чугуна / А. А. Жуков, Е. П. Шилина // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1997. – № 12. – С. 21.

192. Спиртус Г. А. Использование ковкого чугуна с зернистым перлитом для ударонагружаемых деталей / Г. А. Спиртус, А. А. Жуков, Л. В. Перегудов. – М. : ЦНИИЕЭИ тракторосельхозмаш. – 1981. – 40 с.
193. Флемингс Ч. Процессы затвердевания (Solidification Processing) – М. : Мир. – 1977. – 423 с.
194. Чугун: справочник / под. ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. – М. : Metallurgia. – 1991. – 576 с.
195. Polovinchuk V. P. Wear-resistant stable-molted cast iron used in conditions involving thermal cycling / V. P. Polovinchuk // Cast Metals. – 1991. – V. 4, – № 1. – P. 20 – 24.
196. Жуков А. А. Термодинамика субмикрорегетерогенного строения жидкого чугуна / А. А. Жуков, Р. Л. Снежной // Свойства расплавленных металлов. – М. : Наука. – 1974. – С. 15–21.
197. Zhukov A. A. Soviet research work on the liquid state of cast iron / A. A. Zhukov, R. L. Snezhnoy, N. G. Girshovitch // International cast Metals Journal. – 1976. – V. 1, № 1. – P. 11–16.
198. О субмикрорегетерогенном строении жидкого чугуна / А. А. Жуков, Р. Л. Снежной, Н. Г. Гиршович, С. В. Давыдов // Литейное производство. – 1980. – № 6. – С. 3–4.
199. Жуков А. А. О роли сэндвичевых комплексов «металл – углерод» в массопереносе при графитизации чугуна и синтезе алмаза / А. А. Жуков, Р. Л. Снежной, С. В. Давыдов // Литейное производство. – 1983. – № 1. – С. 5–6.
200. Жуков А. А. Новые рубежи в науке о литых металлах / А. А. Жуков // Литейное производство. – 1992. – № 11. – С. 10–13.
201. Zhukov A. A. Particularities of the centrifuge of the molten sulfur / A. A. Zhukov, S. V. Davydov, N. V. Karpov // Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui. – 1981. – № 4. – P. 47–50.
202. Zhukov A. A. High silicon and sculpture malleable cast iron / A. A. Zhukov, S. V. Davydov // The Bulletin of the Bismuth Institute. – 1984. – № 43, P. 1–3.
203. Закирничная М. М. Образование фуллеренов в углеродистых сталях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Закирничная М. М. ; УГНТУ. – Уфа, 2001. – 48 с.
204. Васильев Е. А. Отливки из ковкого чугуна / Е. А. Васильев. – М. : Машиностроение, – 1976. – 239 с.

205. О увеличении содержания серы в ковком чугуна/ Г. Ю. Шульте, Н. А. Гендревич, А. Б. Янченко, А. А. Жуков // Литейное производство. – 1993. – № 11. – С. 11–12.
206. Жуков А. А. Ступенчатые режимы закалки чугунов на бейнитную структуру /А. А. Жуков, А. Б. Янченко, П. М. Котляров // Антифрикционные и износостойкие чугуны: тезисы докладов научно-практической конф. :– Винница : Ассоциация литейщиков Украины. – 1992. – С. 69–71.
207. Zhukov A. A. Step-by-step schedules of bainitic quenching of cast irons / A. A. Zhukov, A. B. Yanchenko and P. M. Kotliarov // Indian Foundry Journal. – 1994. – № 3. – P. 25–26.
208. Жуков А. А. Новые методы бейнитной закалки износостойких чугунов / А. А. Жуков, А. Б. Янченко // Износостойкость машин : тезисы международной конференции. Брянск : Международная инженерная академия, – 1994. – Т. 2. С. 52–53.
209. AWARDEE: A. A. Zhukov and A. B. Yanchenko. – Indian Foundry Journal. – 1994.– № 2.
210. Неижко И. Г. Некоторые проблемные вопросы графитизированных чугунов / И. Г. Неижко // Процессы литья. – 2000. – № 4. – С. 30–31.
211. Radhakrishnan R. Low cast alternatives to austempered ductile iron / R. Radhakrishnan, S. S. Mahamed Naziruden, S. S. Radhakrishnan // INDIAN Foundry Journal. – 1992. – № 8.– P. 30–33.

*Наукове видання*

**Савуляк Валерій Іванович  
Янченко Олександр Борисович**

**ЕКОНОМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИСОКОМІЦНИХ  
ГРАФІТИЗОВАНИХ СПЛАВІВ ЗАЛІЗА**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Савуляком

Підписано до друку 17.11.2014 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 9,24  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014-57

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.