

**В. Б. Бубликов**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом,  
e-mail: otdel.vch@gmail.com

**Ю. Д. Бачинский**, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: 909\_bach@ukr.net

**А. А. Ясинский**, науч. сотр., e-mail: alexyasinskyi@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ С ПОВЫШЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом признан в мире уникальным многофункциональным материалом для изделий самого ответственного назначения во многих отраслях промышленности. Он имеет благоприятное сочетание прочностных показателей и обладает высокими литейными свойствами (высокая жидкотекучесть, низкие усадка и склонность к образованию трещин), которые позволяют изготавливать любые по геометрической сложности и массе отливки. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на дальнейшее повышение технологических, механических и эксплуатационных свойств высокопрочного чугуна и качества производимых литых изделий. Для повышения прочностных показателей и придания специальных свойств (износостойкости, ударостойкости, сопротивления усталостному разрушению и др.) высокопрочный чугун легируют. Широко применяется легирование никелем и медью – элементами, упрочняющими твердый раствор, способствующими перлитизации металлической основы и в то же время не образующими карбидов в чугуне. Для повышения пластичности проводят гомогенизирующий отжиг. В статье приводятся данные об изменении механических свойств нелегированного и легированных никелем или медью высокопрочных чугунов в зависимости от температуры выгрузки отливок из термической печи для охлаждения на воздухе после гомогенизирующего отжига. Определен и проанализирован характер изменения временного сопротивления при разрыве, условного предела текучести и относительного удлинения высокопрочного чугуна в отливках. Более высокие показатели прочности получены при температурах выгрузки отливок от 770 до 810 °С. В результате проведенных исследований установлены технологические параметры получения высокопрочного чугуна с повышенным комплексом механических свойств.

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, шаровидный графит, комплексный модификатор, легирование, медь, никель, гомогенизирующий отжиг, перлит, временное сопротивление при разрыве, относительное удлинение.

Для изготовления ряда деталей современной техники требуются высокопрочные чугуны с временным сопротивлением при разрыве  $\sigma_B = 550\text{--}600$  МПа и относительным удлинением  $\delta = 10\text{--}15$  %. Поэтому возникает необходимость разработки специальных марок со значительно более высокими показателями прочности и пластичности, по сравнению с ВЧ450-5 или ВЧ500-7 (ДСТУ3925-99) с ферритно-перлитной металлической основой, занимающих по показателям механических свойств промежуточное положение между регламентируемыми стандартом марками высокопрочных чугунов ферритного и перлитного классов [1, 2]. Указанные более высокие механические свойства могут быть достигнуты при металлической основе, состоящей из находящихся в определенном соотношении количеств феррита и перлита, или при ферритной металлической основе, упрочненной легированием [3–6].

Получение высокопрочного чугуна с заданным соотношением феррит/перлит в литом состоянии затруднено даже в случае однотипных отливок, кристаллизация которых проходит при небольшом температурном градиенте. Вследствие высокой

степени неоднородности структуры, а также влияния ряда других факторов, величина относительного удлинения высокопрочного чугуна в литом состоянии рассеивается в широком диапазоне и далеко не всегда достигает требуемого уровня 10–15 %. Эффективное повышение прочности ферритного высокопрочного чугуна может быть достигнуто путем упрочнения пластичной матрицы легированием медью, никелем и другими элементами. Повысить пластичность за счет уменьшения неоднородности структуры в микрообъемах позволяет гомогенизирующий отжиг.

*Целью настоящей работы* являлось определение перспективных технологических решений, обеспечивающих получение высокопрочного чугуна с  $\sigma_B = 550\text{--}600$  МПа и  $\delta = 10\text{--}15$  %.

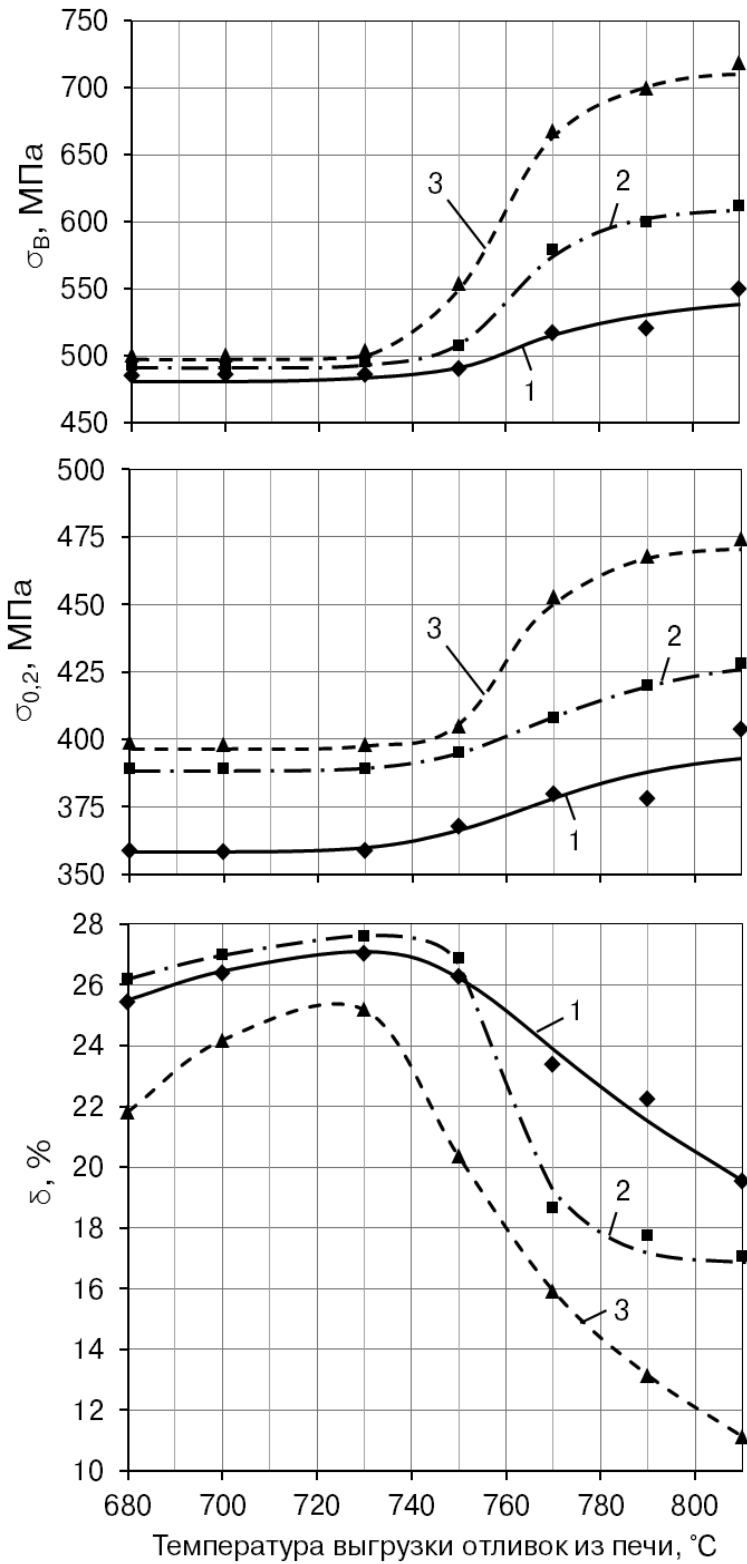
Чугун выплавляли в электропечи ИСТ-0,16 из шихты, состоящей из чушкового литого чугуна марки ЛР6, рафинированного продувкой магнием, с содержанием 0,011–0,014 % серы и 0,060–0,072 % фосфора. Модифицирование проводили комплексным модификатором ЖКМК-4РБа в количестве 2,2 %. Для изучения влияния режимов термической обработки на механические свойства высокопрочного чугуна были отлиты три комплекта клиновидных проб толщиной у основания 15 мм и массой 4,85 кг каждая. Каждый комплект состоял из 8 одинаковых проб, расположенных последовательно в один ряд в литейной форме.

Первый комплект проб отливали из нелегированного высокопрочного чугуна, а второй и третий – из того же чугуна, но легированного 0,5 % меди или 0,5 % никеля, соответственно. Каждый комплект отливок загружали в термическую печь отдельным рядом. Термообработку проводили по следующему режиму: нагрев в печи до 860 °С, выдержка 2 часа, охлаждение с печью при средней скорости 27 °С/час. Начиная с 810 °С, по мере снижения температуры, через каждые 20 °С производили выдержку в течение 45 мин и затем выгрузку из печи для охлаждения на воздухе по одной клиновидной пробе от каждого из трех исследуемых вариантов состава высокопрочного чугуна.

Особенность проведенного исследования заключалась в том, что в результате переплава рафинированного чушкового чугуна марки ЛР6 и модифицирования комплексным модификатором, содержащим наряду с магнием и кремнием дополнительные высокоэффективные модифицирующие элементы (кальций, РЗМ, барий), получен высококачественный высокопрочный чугун с низким содержанием серы и других вредных примесей. Структура металлической основы нелегированного и легированного никелем высокопрочных чугунов в литом состоянии была практически ферритной. А в высокопрочном чугуне, легированном медью, количество перлита составляло ~20 %. Это обусловило благоприятное соотношение прочностных и пластических свойств исследуемых чугунов уже в литом состоянии (см. таблицу). В литом состоянии легирование 0,5 % Ni незначительно повысило прочностные показатели ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) и несколько снизило относительное удлинение ( $\delta$ ). Значительно эффективнее проявляется легирование 0,5 % Cu, в результате которого  $\sigma_B$  высокопрочного чугуна увеличивается с 500 до 595 МПа,  $\sigma_{0,2}$  – с 365 до 420 МПа при снижении  $\delta$  с 23,4 до 17,0 %.

### Количество перлита в металлической основе и механические свойства исследованных высокопрочных чугунов в литом состоянии

| Вид высокопрочного чугуна | Количество перлита, % | Механические свойства |                      |              |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
|                           |                       | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| Нелегированный            | 3                     | 500                   | 365                  | 23,4         |
| Легированный 0,5 % никеля | 6                     | 505                   | 376                  | 20,5         |
| Легированный 0,5 % меди   | 20                    | 595                   | 420                  | 17,2         |



Влияние температуры выгрузки отливок из печи после отжига на механические свойства нелегированного (1) и легированного 0,5 % Ni (2) или 0,5 % Cu (3) высокопрочного чугуна

Количество образовавшегося перлита, степень его дисперсности и некоторые другие особенности структуры исследованных чугунов определили наблюдаемый характер изменения механических свойств от температуры выгрузки отливок из термической печи для охлаждения на воздухе в интервале температур от 810 до 730 °С. Прочностные показатели ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) снижаются, а относительное удлинение увеличивается (см. рисунок).

При охлаждении с температур ниже критических, когда металлическая основа становится ферритной, значения прочностных показателей исследованных чугунов отличаются незначительно. Относительное удлинение по мере снижения температуры выгрузки из печи увеличивается, достигая максимума при 730 °С, и в дальнейшем несколько снижается.

Значительное повышение прочностных показателей достигается при выгрузке отливок из термической печи в интервале температур от 810 до 770 °С. Механические свойства легированного никелем высокопрочного чугуна находятся в пределах:  $\sigma_B = 580\text{--}610$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 410\text{--}435$  МПа,  $\delta = 17\text{--}19$  %. В легированном медью высокопрочном чугуне прочностные показатели значительно выше ( $\sigma_B = 670\text{--}720$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 450\text{--}475$  МПа при  $\delta = 11\text{--}16$  %), что с учетом значительно меньшей стоимости меди, по сравнению с никелем, позволяет рекомендовать ее для упрочняющего легирования высокопрочного чугуна.

В результате проведенного исследования установлены закономерности изменения механических свойств нелегированного и легированных (0,5 % Ni или 0,5 % Cu) высокопрочных чугунов в зависимости от температуры выгрузки отливок из термической печи для охлаждения на воздухе после проведения гомогенизирующего отжига.

### Выводы

Применение высококачественного расплава и модифицирование его комплексным модификатором, содержащим наряду с магнием и кремнием такие высокоэффективные модифицирующие элементы как кальций, барий, РЗМ, позволяет непосредственно в литом состоянии получать высокопрочный чугун ферритного класса с высокими показателями прочности и пластичности. Дополнительное повышение прочностных характеристик в литом состоянии обеспечивает легирование медью. Влияние легирующих элементов на повышение прочностных характеристик усиливается в результате проведения гомогенизирующего отжига с выгрузкой отливок из печи в интервале температур 770–810 °С. Легирование 0,5 % никеля может обеспечить получение высокопрочного чугуна с временным сопротивлением при разрыве  $\sigma_B = 550\text{--}600$  МПа и относительным удлинением  $\delta \geq 15$  %. А легирование 0,5 % меди может обеспечить получение более высокой прочности ( $\sigma_B = 650\text{--}700$  МПа) при относительном удлинении  $\delta \geq 10$  %.

### Список литературы

1. *Wolfram Stets, Herbert Löblich, Gert Gassner, Peter Schumacher.* Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application // International Journal of Metalcasting. – April 2014: Vol. 8. – Issue 2. – pp. 35–40.
2. *Schoenborn S., Kaufmann H., Sonsino C. M., Heim R.* Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 101. – pp. 440–449.
3. *Gonzaga R. A.* Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons // Materials Science & Engineering A. – 2013. – Vol. 567. – pp. 1–8.
4. *Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сыропоршнев Л. Н., Бачинский Ю. Д., Козак Д. С.* Медь в высокопрочном чугуне // Процессы литья. – 2010. – № 3. – С. 46–57.
5. *Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сыропоршнев Л. Н., Берчук Д. Н., Киришун И. В.* Влияние никеля на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна // Процессы литья. – 2011. – № 2. – С. 24–34.
6. *Glavas Z., Strkalj A., Stojakovic A.* The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons // Metallurgija. – 2016. – Vol. 55. – № 3. – pp. 293–296.

Поступила 14.02.2019

## References

1. *Wolfram Stets, Herbert Löblich, Gert Gassner, Peter Schumacher* (2014) Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application. *International Journal of Metal-casting*, April, Vol. 8, Issue 2, pp. 35–40 [in English].
2. *Schoenborn, S., Kaufmann, H., Sonsino, C. M., Heim, R.* (2015) Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications. *Procedia Engineering*, Vol. 101, pp. 440–449 [in English].
3. *Gonzaga, R. A.* (2013) Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Materials Science & Engineering A*, vol. 567, pp. 1–8 [in English].
4. *Bublikov, V. B. et al.* (2010) Copper in high-strength cast iron. *Protsessy litya*, no. 3, pp. 46–57 [in Russian].
5. *Bublikov, V. B. et al.* (2011) Influence of nickel on the structure and mechanical properties of castings made of high-strength cast iron. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 24–34 [in Russian].
6. *Glavas, Z., Strkalj, A., Stojakovic, A.* (2016) The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons. *Metalurgija*, vol. 55, no. 3, pp. 293–296 [in English].

Received 14.02.2019

**В. Б. Бубликов**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,  
e-mail: [otdel.vch@gmail.com](mailto:otdel.vch@gmail.com)

**Ю. Д. Бачинський**, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: [909\\_bach@ukr.net](mailto:909_bach@ukr.net)

**О. О. Ясинський**, наук. співр., e-mail: [alexyasinskyi@gmail.com](mailto:alexyasinskyi@gmail.com)

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

## СПЕЦІАЛЬНІ ВИСОКОМІЦНІ ЧАВУНИ З ПІДВИЩЕНИМ КОМПЛЕКСОМ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Високоміцний чавун з кулястим графітом визнаний в світі унікальним багатофункціональним матеріалом для виробів найвідповідальнішого призначення в багатьох галузях промисловості. Він має сприятливе поєднання показників міцності і володіє високими ливарними властивостями (висока рідкоплинність, низькі усадка і схильність до утворення тріщин), які дозволяють виготовляти виливки будь-якої геометричної складності і маси. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на подальше підвищення технологічних, механічних і експлуатаційних властивостей високоміцного чавуну і якості виготовлених литих виробів. Для підвищення показників міцності і надання спеціальних властивостей (зносостійкості, ударостійкості, опору втомному руйнуванню і ін.) високоміцний чавун легують. Широко застосовується легування нікелем і міддю – елементами, які зміцнюють твердий розчин, сприяють перлітизації металевої основи і в той же час не утворюють карбідів в чавуні. Для підвищення пластичності проводять гомогенізуючий відпал. В статті наведені дані про зміну механічних властивостей нелегованого і легованих нікелем або міддю високоміцних чавунів в залежності від температури вивантаження виливків з термічної печі для охолодження на повітрі після гомогенізуючого відпалу. Визначено і проаналізовано характер зміни тимчасового опору при розтягуванні, умовної границі плинності і відносного подовження високоміцного чавуну у виливках. Більш високі показники міцності отримані при температурах вивантаження виливків від 770 до 810 °С. В результаті проведених досліджень встановлені технологічні параметри отримання високоміцного чавуну з підвищеним комплексом механічних властивостей.

**Ключові слова:** високоміцний чавун, кулястий графіт, комплексний модифікатор, легування, мідь, нікель, гомогенізуючий відпал, перліт, тимчасовий опір при розтягуванні, відносне подовження.

**V. B. Bublikov**, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Department Chair, e-mail: [otdel.vch@gmail.com](mailto:otdel.vch@gmail.com)

**Yu. D. Bachynskyi**, Candidate of Technical Sciences, Research Fellow, e-mail: [909\\_bach@ukr.net](mailto:909_bach@ukr.net)

**O. O. Yasytskyi**, Research Fellow, e-mail: [alexyasinskyi@gmail.com](mailto:alexyasinskyi@gmail.com)

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv

**SPECIAL DUCTILE CAST IRONS WITH INCREASED COMPLEX OF MECHANICAL PROPERTIES**

Ductile cast iron with spheroidal graphite is acknowledged in the world as a unique multifunctional material for products of the most important purpose in many industries. It has a favorable combination of strength characteristics and high casting properties (high fluidity, low shrinkage and crack formation tendency), which allow to produce castings of any geometric complexity and weight. Therefore, research aimed at further improving of ductile cast iron technological, mechanical and operational properties and quality of cast products made of it is relevant. For increasing of strength characteristics and giving of special properties (wear resistance, impact resistance, resistance to fatigue failure, etc.) ductile cast iron is subjected for alloying. Widely used is alloying with nickel and copper which are elements that strengthen the solid solution, promote perlite formation in the metal base and at the same time do not form carbides in cast iron. Homogenizing annealing is carried out for plasticity increasing. Data about mechanical properties change of unalloyed and alloyed with nickel or copper ductile cast irons depending on castings discharge temperature from a thermal furnace for air cooling after homogenizing annealing is presented in the article. The nature of ductile irons tensile strength, yield strength and elongation changes in the castings are identified and analyzed. Higher strength values were obtained at casting discharge temperatures from 770 to 810 °C. As a result of the research, the technological parameters of ductile cast iron obtaining with increased complex of mechanical properties were established.

**Keywords:** ductile cast iron, spheroidal graphite, complex modifier, alloying, copper, nickel, homogenizing annealing, pearlite, tensile strength, elongation.

**ВНИМАНИЕ!**

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 10,000 грн.

**Расценки на размещение рекламы  
(цены приведены в гривнах)**

| Размещение                                       | Рекламная площадь | Стоимость, грн. |
|--|-------------------|-----------------|
| <b>Рекламные блоки в текстовой части журнала</b> |                   |                 |
| Цветные  | 1/2 страницы      | 900             |
|  | 1/3 страницы      | 600             |
|  | 1/4 страницы      | 300             |
| Черно-белые                                      | 1/2 страницы      | 550             |
|  | 1/3 страницы      | 380             |
|  | 1/4 страницы      | 200             |
| <b>Цветная реклама на обложке</b>                |                   |                 |
| Третья страница обложки                          | 1 страница        | 2800            |
|  | 1/2 страницы      | 1400            |
|  | 1/4 страницы      | 700             |
| Четвертая страница обложки                       | 1 страница        | 3100            |
|  | 1/2 страницы      | 1550            |
|  | 1/3 страницы      | 1000            |

**При повторном размещении рекламы - скидка 15 %**

Наш адрес: **Украина, 03142, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1**  
 Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины  
**телефоны: (044) 424-04-10, 424-12-50**  
**факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua**