

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

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

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА В ОТЛИВКАХ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЬЕМ В ОБОЛОЧКОВЫЕ ФОРМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ «IN-MOLD» ПРОЦЕССА**

*Приведены данные о структурообразовании и показателях механических свойств высокопрочного чугуна в отливках, получаемых в оболочковых формах с применением внутриформенного модифицирования. Определен и проанализирован характер распределения количества феррита, твердости, временного сопротивления при разрыве, условного предела текучести и относительного удлинения отливок из высокопрочного чугуна. Полученные результаты исследований свидетельствуют о высокой стабильности показателей качества отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием.*

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, внутриформенное модифицирование, оболочковая форма, феррит, временное сопротивление при разрыве, твердость, относительное удлинение, эмпирическое распределение, кривая Гаусса.

Одним из эволюционных этапов развития технологии высокопрочного чугуна стало создание метода модифицирования расплава в полости литейной формы («in-mold» процесс), который, по сравнению с ковшовыми методами, обеспечивает более высокий уровень модифицирующего воздействия при меньшем в 2–3 раза расходе модификатора. Процесс обработки расплава магнийсодержащими лигатурами в литейной форме протекает без пироэффекта и дыма, устраняется присущая ковшовой обработке проблема потери эффекта модифицирования при транспортировке и заливке металла в формы. В результате минимизации интервала времени между модифицированием и началом кристаллизации расплава значительно увеличивается количество включений шаровидного графита, интенсифицируется графитизация структуры, что способствует снижению склонности к образованию отбела, уменьшению усадки и улучшению обрабатываемости резанием. Полученная в отливках диспергированная структура высокопрочного чугуна способствует повышению механических свойств [1, 2, 3]. С учетом вышеизложенного, очевидна актуальность исследования методами статистического анализа особенностей структурообразования и механических свойств отливок из высокопрочного чугуна, получаемого модифицированием в литейных формах в условиях промышленного производства.

*Цель работы* – исследование закономерностей распределения по плавкам химического состава, показателей структуры и механических свойств высокопрочного чугуна в отливках, получаемых литьем в оболочковые формы с применением внутриформенного модифицирования.

Методами статистического анализа [4, 5] определены закономерности распределения химического состава, структуры и механических свойств отливок в выборке из 150 плавков высокопрочного чугуна, получаемого методом внутриформенного модифицирования. Разработанная технология предусматривает расплавление в индукционных электропечах ИЧТ-6 шихты, состоящей из 50 % чушкового передельного чугуна ПВКЗ, 47 % возврата высокопрочного чугуна и ~3 % ферросилиция ФС75, что

## Кристаллизация и структурообразование сплавов

обеспечивает получение исходного расплава с содержанием  $S \leq 0,015\%$  и  $P \leq 0,08\%$ . Модифицирование проводится ферросилиций-магниевого лигатурой в проточных реакторах, расположенных в литниковых системах. Технология применяется для получения в песчано-смоляных оболочковых формах корпусных отливок с толщиной стенок от 4 до 15 мм. Химический состав, микроструктура и механические свойства высокопрочного чугуна определяются на образцах металла из стенки толщиной 10 мм отливок, отобранных для контроля из каждой плавки.

Отливки анализируемой выборки плавков по химическому составу, структуре, твердости, механическим свойствам соответствовали требованиям действующей на предприятии нормативно-технической документации. Показатели, характеризующие распределение химических элементов в отливках плавков высокопрочного чугуна, представлены в таблице.

### Распределение компонентов химического состава отливок в плавках высокопрочного чугуна

Показатель	Химический состав, %мас.							
	C	Si	Mn	Mg	Cu	Ni	P	S
Диапазон варьирования содержания	3,2–3,9	2,4–3,2	0,15–0,55	0,04–0,07	0,05–0,25	0,1–0,3	0,03–0,09	0,009–0,015
Расчетное среднее содержание	3,60	2,73	0,29	0,052	0,09	0,19	0,06	0,011

Структура отливок (рис. 1) состояла из графита шаровидной формы ШГФ4, ШГФ5 и ферритно-перлитной металлической основы. Плотность распределения включений шаровидного графита в структуре находилась в пределах 430–610 шт/мм<sup>2</sup>, что в 4–5 раз больше, по сравнению с вариантом ковшового модифицирования. Вследствие этого при распаде аустенита значительно сокращаются пути диффузии углерода к графитным включениям, что обеспечивает повышение степени ферритизации металлической основы высокопрочного чугуна в отливках примерно в 2 раза.

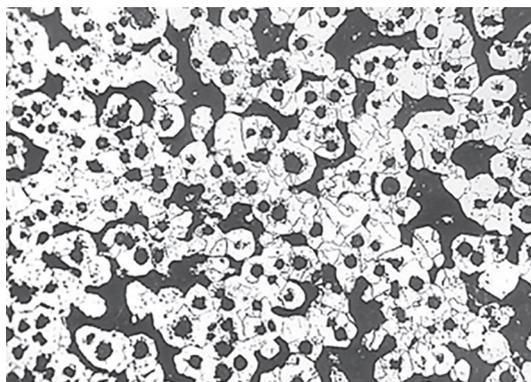


Рис. 1. Микроструктура высокопрочного чугуна в отливке, полученной в оболочковой форме с применением внутриформенного модифицирования, ( $\times 100$ )

В связи с тем, что металлическая основа состояла из двух структурных составляющих, рассматривали только распределение преобладающей из них – феррита. В данной выборке в 26,4 % плавков получено 55–68,8 % феррита в структуре металлической основы, в остальных 73,6 % плавков количество феррита составляет 70,7–94,0 %. Распределение количества феррита по плавкам соответствует закону нормального распределения (рис. 2).

Характер распределения твердости подобен распределению феррита. Твердость *HB* отливок варьируется в пределах 160–210 ед. Расчетное среднее значение составляет 185 *HB*. Гистограмма эмпирического распределения твердости (рис. 3) имеет специфический вид – 70 % значений попадают в интервал 180–190 *HB*, что свидетельствует о высокой степени однородности литой структуры.

Значения временного сопротивления при разрыве  $\sigma_b$  высокопрочного чугуна в

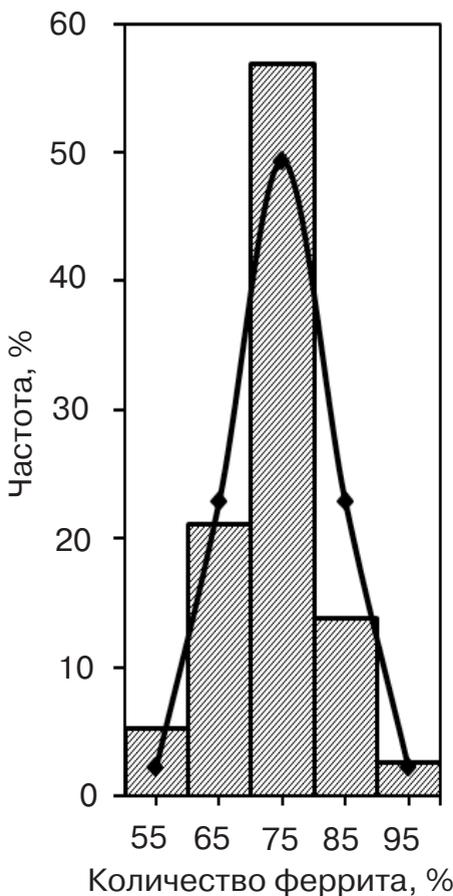


Рис. 2. Гистограмма и кривая нормального распределения количества феррита в микроструктуре металлической основы отливок из высокопрочного чугуна

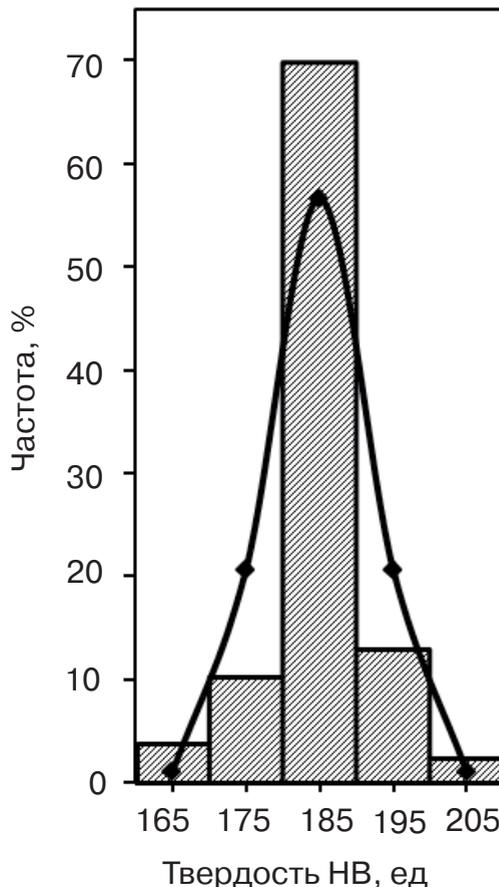


Рис. 3. Гистограмма и кривая нормального распределения твердости отливок

отливках имеют значительный разброс относительно центра гистограммы – расчетное среднее значение  $\sigma_{вср}$  для всех плавков составило 538,9 МПа при варьировании в интервале 464,8–607,5 МПа (рис. 4, а). По минимальному значению  $\sigma_B$  в 93,2 % плавков соответствует высокопрочному чугуна ВЧ500, в остальных 6,8 % – ВЧ450.

Значения условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  высокопрочного чугуна варьируются в диапазоне 342,4–457,5 МПа (рис. 4, б). Расчетное среднее значение  $\sigma_{0,2ср}$  для всех плавков составило 398,2 МПа. При этом, согласно стандарту ДСТУ 3925-99, все полученные значения предела текучести удовлетворяют требования к маркам ВЧ450-10, ВЧ450-5, ВЧ500-7. Необходимо отметить, что прочностные расчеты, как правило, проводятся по показателю  $\sigma_{0,2}$ , а не  $\sigma_B$ .

Относительное удлинение варьируется в пределах от 8,6 до 20,0 % при среднем расчетном значении 13,4 % (рис. 4, в). По минимальному значению  $\delta$  в 89 % проведенных плавков получен высокопрочный чугун марки ВЧ500-10, в остальных – ВЧ450-5. Следует отметить, что полученные значения относительного удлинения в большинстве случаев значительно превышают минимальные требования к марке высокопрочного чугуна ВЧ500.

В целом, полученные кривые нормального распределения количества феррита в металлической основе и механических свойств ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $HB$ ) имеют четко выраженный центр, вытянуты в центральной части, постепенно расширяются по мере приближения к оси абсцисс. Разница в площадях, описанных соответствующими гистограммами и кривыми нормального распределения, незначительная, что ука-

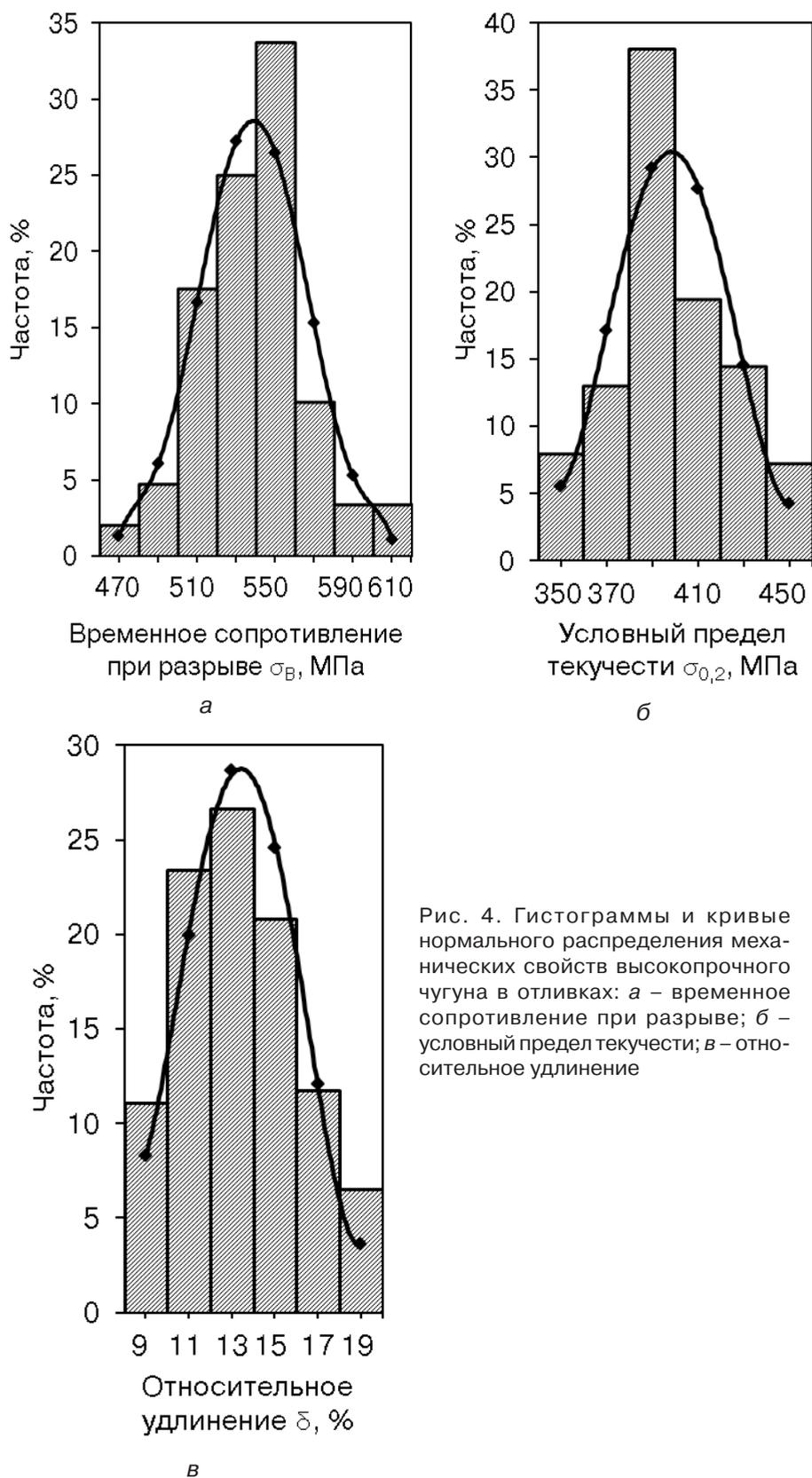


Рис. 4. Гистограммы и кривые нормального распределения механических свойств высокопрочного чугуна в отливках: а – временное сопротивление при разрыве; б – условный предел текучести; в – относительное удлинение

зывает на хорошее совпадение с эмпирическими данными и подтверждает высокую стабильность показателей качества отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием.

Установлено, что в результате внутриформенного модифицирования, по сравнению с ковшовым, повышается в 4–5 раз количество включений шаровидного графита, образующихся в структуре отливок при соответствующем уменьшении их размера. Предотвращается образование структурно-свободного цементита в отливках с минимальной толщиной стенки 4 мм. В результате измельчения структуры уменьшается межкристаллитная ликвация, увеличивается количество феррита в металлической основе, обеспечивается более оптимальное соотношение прочностных показателей ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) и относительного удлинения ( $\delta$ ). Высокая однородность структуры и снижение ее твердости *HВ* улучшают обрабатываемость отливок резанием.

Технология получения высокопрочного чугуна на основе применения внутриформенного модифицирования обеспечивает значительные преимущества, по сравнению с традиционными технологиями ковшевого модифицирования: расход магниевой лигатуры снижается в 2–2,5 раза; радикально улучшается экология в результате отсутствия пироэффекта и выделения дыма из оксида магния; ликвидируется проблема потери эффекта модифицирования; кардинально улучшаются условия получения без отбела тонкостенных отливок с минимальной толщиной стенки 3–4 мм; производимые отливки характеризуются высокой стабильностью структуры и механических свойств, выдерживают испытание на герметичность давлением 45–55 МПа, хорошо (на уровне СЧ20) обрабатываются резанием на станках-автоматах; экономия от внедрения достигается за счет снижения расхода лигатуры, повышения выхода годного, улучшения качества и снижения брака отливок, ликвидации операции энергоемкого графитизирующего отжига, повышения служебных свойств изделий.

Выявленные особенности структурообразования и закономерности распределения механических свойств высокопрочного чугуна в отливках, полученных литьем в оболочковые формы с применением «in-mold» процесса, расширяют наши представления о возможностях повышения свойств этого уникального конструкционного материала и прогрессивных направлениях дальнейшего развития технологий.

### Список литературы

1. Бубликов В. Б. Повышение модифицирующего воздействия на структурообразование чугуна // Литейное производство. – 2003. – № 8. – С. 20–22.
2. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуну – 60 // Литейное производство. – 2008. – № 11. – С. 2–8.
3. Бубликов В. Б., Бачинский Ю. Д. Высокопрочный чугун: прогресс технологий, повышение свойств // Металл и литье Украины. – 2018. – № 7–8. – С. 7–12.
4. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
5. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

Поступила 04.12.2018

### References

1. Bublikov, V. B. (2003) Increasing of modifying effect on the structure formation of cast iron. Liteynoe proizvodstvo, no. 8, pp. 20–22 [in Russian].
2. Bublikov, V. B. (2008) Ductile cast iron is 60 years. Liteynoe proizvodstvo, no. 11, pp. 2–8 [in Russian].
3. Bublikov, V. B., Bachinskiy, Yu. D. (2018) Ductile cast iron: the progress of technologies', an improvement of properties. Metall i litie Ukrainy, no. 7–8, pp. 7–12 [in Russian].

4. Smirnov, N.V., Dunin-Barkovskij, I.V. (1969) Course of probability theory and mathematical statistics for technical applications. Moscow: Nauka [in Russian].
5. Stepnov, M.N. (1985). Statistical methods of mechanical test results processing: Handbook Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

Received 04.12.2018

**В. Б. Бубликов**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,  
e-mail: ot.del.vch@gmail.com

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

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

### **ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ У ВИЛИВКАХ, ЯКІ ОДЕРЖУЮТЬ ЛИТТЯМ В ОБОЛОНКОВІ ФОРМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ «IN-MOLD» ПРОЦЕСУ**

*Наведено дані про структуроутворення та показники механічних властивостей високоміцного чавуну у виливках, які одержують в оболонкових формах із застосуванням внутрішньоформового модифікування. Визначено і проаналізовано характер розподілу кількості фериту, твердості, тимчасового опору при розтягуванні, умовної границі плинності і відносного видовження виливків з високоміцного чавуну. Отримані результати досліджень свідчать про високу стабільність показників якості виливків з високоміцного чавуну, одержуваного внутрішньоформовим модифікуванням.*

**Ключові слова:** високоміцний чавун, внутрішньоформове модифікування, оболонкова форма, ферит, тимчасовий опір при розтягуванні, твердість, відносне подовження, емпіричний розподіл, крива Гауса.

**V. B. Bublikov**, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Department Chair, e-mail: ot.del.vch@gmail.com

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

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kiev

### **FEATURES OF STRUCTURE FORMATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF DUCTILE CAST IRON IN CASTINGS OBTAINED BY CASTING IN SHELL MOLDS USING «IN-MOLD» PROCESS**

*The data on the structure formation and mechanical properties of ductile cast iron in castings obtained in shell molds with the use of «in-mold» modifying are presented. The nature of ferrite amount, hardness, tensile strength, yield strength and elongation distribution of castings made of ductile cast iron are defined and analyzed. The obtained results indicate high stability of the quality parameters of castings made of ductile cast iron obtained by «in-mold» process.*

**Keywords:** ductile cast iron, «in-mold» process, shell mold, ferrite, tensile strength, hardness, elongation, empirical distribution, Gaussian curve.