

УДК 621.74:681.

DOI: 10.30987/article\_5c652633961a58.10645526

В.Г. Солдатов, Д.А. Илюшкин, О.В. Петраков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ БЕЛОГО ЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА

Представлены результаты исследования влияния химического состава белого легированного чугуна на его пластичность при горячей деформации. Получена математическая модель, определяющая величину деформации при сжатии заготовки из белого легированного чугуна в зависимости от

содержания углерода, хрома, никеля, марганца, молибдена, титана и бора.

**Ключевые слова:** белый легированный чугун, пластичность, пластическая деформация чугуна.

V.G. Soldatov, D.A. Pyushkin, O.V. Petrakov

## INVESTIGATION OF WHITE ALLOYED CAST IRON DUCTILITY

It is shown that during hot plastic deformation of cast iron a decisive role is played by its ductility at temperatures of deformation. There is used a method of active experiment mathematic planning to reveal dependences between a chemical composition of white alloyed cast iron and its ductility. It is defined that at

the adopted intervals of variation carbon, nickel, manganese, titanium and boron contribute to ductility increase, and chromium and molybdenum promote to its decrease.

**Key words:** white alloyed cast iron, ductility, cast iron plastic deformation.

### Введение

Непрерывно развивающееся машиностроение нуждается в применении более качественных материалов для изделий, работающих в тяжелых условиях и требующих высокой эксплуатационной стойкости. Одним из наиболее широко и давно применяемых материалов для деталей с высокой износостойкостью является белый легированный чугун (БЧ). С повышением требований к надежности и долговечности деталей из этого материала необходимо рассматривать возможности технологического управления его структурой и свойствами. Традиционно детали из БЧ изготавливаются литьем. Классические методы управления структурой и свойствами литых заготовок (выплавка, модифицирование, режимы кристаллизации и охлаждения отливки в форме, термообработка) имеют определенные ограничения, в связи с чем рассматривается возможность применения более эффективных методов, обеспечивающих повышение и стабильность эксплуатационных свойств. К их числу относится метод горячего пластического деформирования. Несмотря на то что белый чугун достаточно хрупкий материал, в определенном структурном состоя-

нии он вполне способен к деформации практически всеми способами, используемыми в машиностроении.

БЧ, прошедший деформационную обработку, обладает свойствами, существенно отличающимися от свойств в литом состоянии: более высокой прочностью и пластичностью, вязкостью, износостойкостью, демпфирующей способностью, коррозионной стойкостью, низкой чувствительностью к концентраторам напряжений. Применение пластической деформации позволяет в значительной мере обеспечить равномерную структуру и диспергировать ее, избежать наличия дефектов усадочного происхождения, что позволяет существенно повысить эксплуатационную стойкость изделий. По ряду этих свойств деформируемый чугун превосходит не только литой чугун, но и низколегированную сталь. В связи с этим область применения БЧ, подверженного пластической деформации, может быть весьма широкой [1]. Одним из перспективных направлений горячего деформирования является метод прокатки непрерывнолитых заготовок для изготовления мелющих

тел, используемых в горно-обогательном оборудовании [2].

При горячей пластической деформации БЧ решающую роль играет его пластичность при температурах деформирования. Пластичность определяется химическим составом чугуна и его структурой. Низкая пластичность белого чугуна вызвана наличием в его структуре аустенитно-карбидной эвтектики (ледебурита). Пластичная составляющая (аустенит) расположена в хрупком малопластичном цементите или заключена в оболочку из выде-

ляющегося в междендритных пространствах ледебурита. Легирование чугуна карбидообразующими элементами оказывает существенное влияние на свойства цементита. Легированный цементит упрочняется и разупрочняется подобно твердым растворам замещения, что позволяет проводить горячую пластическую деформацию чугуна [3].

В данной работе приведены результаты исследования пластичности белого легированного чугуна в зависимости от его химического состава.

### Методика проведения исследований

С целью выявления зависимости между химическим составом и пластичностью чугуна в горячем состоянии применен метод математического планирования активного многофакторного эксперимента. В качестве независимых факторов принято содержание в чугуне углерода, марганца,

никеля, хрома, молибдена, титана, бора. Ввиду большого числа переменных принят план дробного факторного эксперимента ДФЭ  $2^{7-4}$ . План и матрица планирования многофакторного эксперимента приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

План ДФЭ  $2^{7-4}$  для исследования пластичности белого легированного чугуна

Факторы плана	Химический состав чугуна, %						
	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Ti	B
Основной уровень ( $X_0$ )	3,1	8,0	2,3	3,25	0,55	0,355	0,255
Интервал варьирования ( $\Delta X$ )	0,5	2,0	2,2	2,75	0,45	0,345	0,245
Верхний уровень (+1)	3,6	10	4,5	6,0	1,0	0,7	0,5
Нижний уровень (-1)	2,6	6,0	0,1	0,5	0,1	0,01	0,01
Код фактора (X)	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$

Таблица 2

Матрица планирования ДФЭ  $2^{7-4}$  для исследования пластичности белого легированного чугуна

№	Уровни переменных факторов плана в кодированном виде (%)						
	$X_1$ C	$X_2$ Cr	$X_3$ Ni	$X_4$ Mn	$X_5$ Mo	$X_6$ Ti	$X_7$ B
1	-1(2,6)	-1(6)	-1(0,1)	+1(6,0)	+1(1,0)	+1(0,7)	-1(0,01)
2	+1(3,6)	-1(6)	-1(0,1)	-1(0,5)	-1(0,1)	+1(0,7)	+1(0,5)
3	-1(2,6)	+1(10)	-1(0,1)	-1(0,5)	+1(1,0)	-1(0,01)	+1(0,5)
4	+1(3,6)	+1(10)	-1(0,1)	+1(6,0)	-1(0,1)	-1(0,01)	-1(0,01)
5	-1(2,6)	-1(6)	+1(4,5)	+1(6,0)	-1(0,1)	-1(0,01)	+1(0,5)
6	+1(3,6)	-1(6)	+1(4,5)	-1(0,5)	+1(1,0)	-1(0,01)	-1(0,01)
7	-1(2,6)	+1(10)	+1(4,5)	-1(0,5)	-1(0,1)	+1(0,7)	-1(0,01)
8	+1(3,6)	+1(10)	+1(4,5)	+1(6,0)	+1(1,0)	+1(0,7)	+1(0,5)

При проведении плавки стремились поддерживать на одном уровне такие факторы, как качественный состав шихты, время плавки, температура заливки, ско-

рость охлаждения металла в форме, количественный состав шихты. Содержание серы и фосфора в опытных плавках было примерно одинаково – 0,01 и 0,02 % соот-

ветственно. Плавки проводили в индукционной тигельной печи с кислой футеровкой емкостью 60 кг.

Исследования проводили на заготовках цилиндрической формы диаметром 40 мм. Заготовки нагревали в электрической нагревательной печи до температуры 850 °С с последующей выдержкой в течение 30 минут. Сжатие образцов производили на

разрывной машине Р20. Ко всем образцам была приложена одинаковая нагрузка – 20 тонн. Степень деформирования оценивали по уменьшению высоты заготовки до и после прессования.

Результаты опытов приведены в табл. 3. При обработке экспериментальных данных были учтены ошибки в уровнях факторов [4].

### Результаты исследований

По результатам опытов была построена математическая модель, устанавливающая совместное влияние структурообра-

зующих химических элементов белого легированного чугуна на сжатие заготовки при температурах деформации:

$$\hat{Y} = 1,365 + 0,278C - 0,156Cr + 0,089Ni + 0,122Mn - 1,022Mo + 1,661Ti + 1,406B \text{ (мм)}.$$

В уравнении регрессии элементы химического состава представлены в натуральном масштабе. Сравнительный анализ коэффициентов модели показывает следующее.

Карбидообразующие элементы (хром, марганец, молибден, титан) способствуют формированию инвертированной структуры эвтектики: в вязкой аустенитной матрице выделяются изолированные твердые включения карбидов. В результате пластичность чугуна повышается. С дру-

гой стороны, цементит заменяется на более твердые карбиды типа  $Me_7C_3$ ,  $Me_{23}C_6$ , таким образом, влияние хрома и молибдена приводит к снижению пластичности (рис. 1). Бор сужает температурный интервал между ликвидусом и солидусом, вследствие чего состав чугуна приближается к эвтектическому, количество избыточного цементита уменьшается, пластичность заготовок увеличивается. Никель повышает количество аустенита в чугуне, тем самым увеличивая его пластичность.

Таблица 3

Результаты реализации плана ДФЭ 2<sup>7-4</sup> для исследования пластичности белого легированного чугуна

№	Химический состав чугуна, %							Сжатие заготовки, мм
	X <sub>1</sub> С	X <sub>2</sub> Cr	X <sub>3</sub> Ni	X <sub>4</sub> Mn	X <sub>5</sub> Mo	X <sub>6</sub> Ti	X <sub>7</sub> В	
1	2,70	6,21	0,1	5,6	1,06	0,62	0,01	1,93
2	3,62	6,07	0,1	0,54	0,14	0,71	0,5	3,07
3	2,63	11,0	0,1	0,5	0,98	0,01	0,43	0,20
4	3,58	10,1	0,1	6,1	0,1	0,01	0,01	1,60
5	2,68	6,04	4,59	5,57	0,11	0,01	0,49	2,70
6	3,70	6,2	4,3	0,5	1,0	0,01	0,01	0,83
7	2,59	10,31	4,48	0,5	0,1	0,71	0,01	2,10
8	3,61	10,1	4,4	5,9	1,01	0,69	0,49	2,60
01	3,1	8,13	2,06	3,28	0,52	0,35	0,25	1,40
02	3,0	7,84	2,46	3,22	0,58	0,34	0,23	1,42
03	3,0	8,0	2,3	3,2	0,54	0,33	0,25	1,39

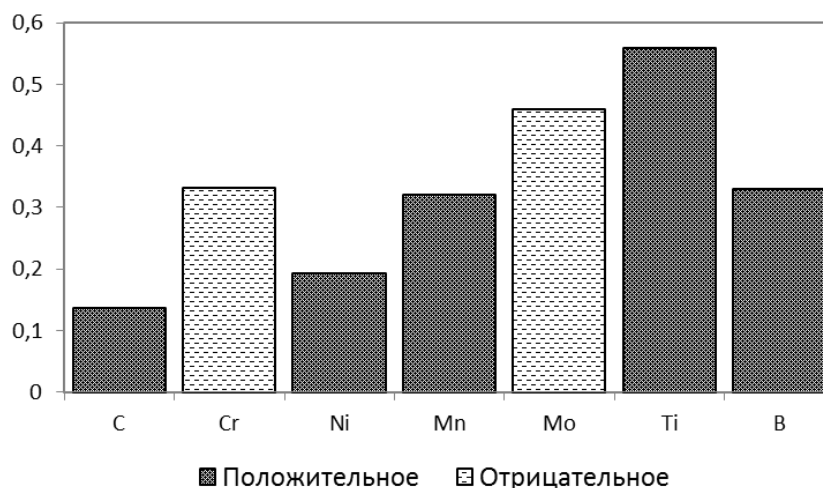


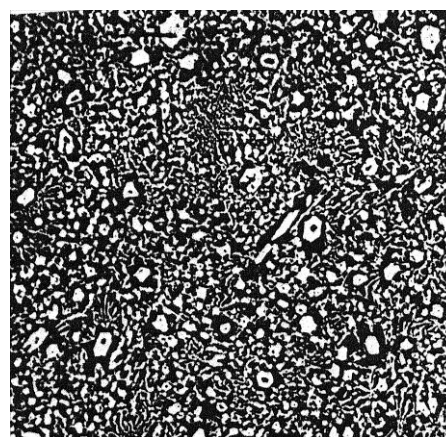
Рис. 1. Относительная сила влияния элементов химического состава на пластичность белого легированного чугуна

В результате деформирования и охлаждения аустенитно-карбидная эвтектика разрушается, включения аустенита и

цементита измельчаются и равномерно распределяются в металлической основе (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура сплава № 4 (табл. 3) в литом (а) и деформированном (б) состоянии

### Заключение

Из изложенного следует, что влияние легирующих элементов на пластичность белого чугуна в горячем состоянии неравнозначно. Для достижения служебных и технологических свойств, необходимых при производстве и эксплуатации изделий из БЧ, следует выбирать конкретный химический состав чугуна, обеспечивающий

оптимальное сочетание требуемых свойств для определенной конфигурации детали и условий ее эксплуатации.

В части обеспечения технологичности задача может быть решена с использованием предложенной математической модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покровский, А.И. Горячая пластическая деформация чугуна. Структура, свойства, технологические основы: монография / А.И. Покровский. – Минск: Белорусская наука, 2010. – 256 с.
2. Поддубный, А.Н. Технологические и теоретические основы производства мелющих тел из чугунов: монография / А.Н. Поддубный. – Брянск:

БГТУ, 1997. – 96 с.

3. Пирогова, Е.В. Влияние легирующих добавок на деформируемость ледобурита и повышение эксплуатационных свойств белых деформируемых чугунов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Пирогова. – Днепропетровск, 1995. – 18 с.
4. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов техноло-

гии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машино-

1. Pokrovsky, A.I. Hot plastic deformation of cast iron. Structure, properties, technological fundamentals: monograph / A.I. Pokrovsky. – Minsk: *Belorussian Science*, 2010. – pp. 256.
2. Poddubny, A.N. *Technological and Theoretical Fundamentals of Cast Iron Grinding Bodies Manufacturing*: monograph / A.N. Poddubny. – Bryansk: BSTU, 1997. – pp. 96.
3. Pirogova, E.V. Alloying additions impact upon

строение, 1980. – 304 с.

- deleburite deformability and increase of operating properties of white deformable cast iron: *Author's Abstract for the Can. Sc. Tech. Degree Thesis* /E.V. Pirogova. – Dnepropetrovsk, 1995. – pp. 18.
4. Novik, F.S. *Optimization of Metal Technology Processes by Methods of Experiment Planning* / F.S. Novik, Ya.B. Arsov. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 304.

*Статья поступила в редакцию 23.11.18.*

*Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технологического университета*

*Камынин В.В.*

*Статья принята к публикации 25.01.19.*

### Сведения об авторах:

**Солдатов Валерий Геннадьевич**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: [soldat-tu@bk.ru](mailto:soldat-tu@bk.ru).

**Илюшкин Дмитрий Алексеевич**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение»

**Soldatov Valery Gennadievich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: [soldat-tu@bk.ru](mailto:soldat-tu@bk.ru).

**Ilyushkin Dmitry Alexeevich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and

Брянского государственного технического университета, e-mail: [shirke@mail.ru](mailto:shirke@mail.ru).

**Петраков Олег Викторович**, к.т.н., зав. кафедрой «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: [typeofpeople@mail.ru](mailto:typeofpeople@mail.ru).

Material Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: [shirke@mail.ru](mailto:shirke@mail.ru).

**Petrakov Oleg Victorovich**, Can. Sc. Tech., Head of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: [typeofpeople@mail.ru](mailto:typeofpeople@mail.ru).