

Е. Г. Афтандилянц, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,

e-mail: aftyev@hotmail.com

В. П. Лихошва*, д-р техн. наук, проф., зав. отделом,

e-mail: plazer_v@mail.ru

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев

*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК

На основе анализа процесса формирования соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя биметаллических отливок установлено, что качественное соединение при заливке жидкого чугуна на твердую стальную основу, расположенную в литейной форме, происходит в случае, когда температура заливки чугуна меньше температуры солидус стали. Учитывая, что температуры заливки чугуна и солидус стали зависят от их химического состава, установили количественные закономерности влияния химического состава на эти характеристики. В качестве интегрального параметра химического состава стали и чугуна использовали их углеродный эквивалент. Установлены количественные закономерности влияния углеродного эквивалента на температуры солидус стали и ликвидус чугуна, а также заливки чугуна. Приведены условия получения качественного диффузионного соединения чугунного рабочего слоя и стальной основы и пример определения оптимальных химических составов стальной основы и чугунного рабочего слоя при изготовлении биметаллических молотков. Показано, что при оптимизации химических составов биметаллических отливок прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя увеличивается в 1,8–2,4 раза по сравнению с неоптимизированными по химическому составу биметаллическими отливками.

Ключевые слова: биметаллические отливки, основа, рабочий слой, сталь, чугун, углеродный эквивалент, температура, солидус, ликвидус, заливка, прочность.

Проблема экономии высоколегированных сталей и сплавов, увеличение ресурса работы машин и межремонтных сроков работы, непрерывно действующих комплексов оборудования, работающих в условиях абразивного износа и ударных нагрузок, всегда актуальна. В условиях дефицита в стране хрома, молибдена, ванадия, никеля и других металлических элементов литье в конструкциях машин является практически единственным решением при создании изделий с комплексом дифференцированных и специальных свойств. Оптимизация химических составов основы и рабочего слоя биметаллических отливок имеет большое значение для производства экономно легированных высококачественных деталей оборудования, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания и ударных нагрузок.

Из многочисленных способов получения биметаллических отливок наиболее распространенными в практике литейного производства является одновременная или последовательная заливка жидких сплавов в литейную форму с перегородкой; последовательная заливка в форму жидких сплавов; намораживание металла из расплава на твердую заготовку; заливка жидкого металла на твердую заготовку, предварительно расположенную в литейной форме и другие [1].

Из перечисленных способов наиболее технологичным и распространенным методом является заливка жидкого металла на твердую основу, расположенную в литейной форме. В качестве основы, как правило, используют углеродистую или низколегированную сталь, а в качестве рабочего слоя – высоколегированный износостойкий чугун. Однако при таком методе производства соотношение между химическим составом и температурой затвердевания стали и заливки износостойкого легированного чугуна не регламентированы.

Это не дает возможность гарантировать качество биметаллических отливок, поскольку в случае, когда температура заливки износостойкого легированного чугуна превышает температуру затвердевания стали, происходит ее расплавление и контактная зона формируется в условиях перемешивания расплавов в плоскости их контакта. При затвердевании такого контакта образуются усадочные дефекты (поры, рыхлость, раковины и трещины), что снижает прочность соединения основания и рабочего слоя и, как следствие, ресурс биметаллических отливок, например, рабочих органов дробилок. Кроме того, в результате несбалансированного соотношения химического состава стали и чугуна увеличивается расход дефицитных и дорогих материалов.

Поэтому представляет интерес исследовать возможность оптимизации химических составов основы и рабочего слоя биметаллических отливок при заливке жидкого металла на твердую основу.

Качественное диффузионное соединение стальной основы и чугунного рабочего слоя (взаимное проникновение, в результате диффузии, атомов материала основы и рабочего слоя друг в друга) биметаллических отливок происходит в результате контакта затвердевшей, после заливки, стальной основы с чугунным рабочим слоем в процессе его формирования после заливки. При этом прочность диффузионного слоя, которая определяется межатомными силами связи материала, образовавшегося в результате диффузии, должна быть изотропной по поверхности контакта, что повышает надежность работы биметаллических отливок.

Однако надежное соединение рабочего слоя и основы с помощью диффузионного слоя является необходимым, но недостаточным условием для получения высококачественных биметаллических отливок, поскольку существенное влияние на их работоспособность оказывает материал основы и рабочего слоя.

По своему функциональному назначению биметаллические отливки, например, рабочие органы дробилок, должны сочетать высокую твердость, износостойкость, теплостойкость рабочих слоев с конструкционной прочностью, ударной вязкостью, пластичностью материала основы. Для обеспечения высокой износостойкости и прочности материалы основы и рабочего слоя должны иметь высокий уровень теплопроводности, сопротивления сжатию, изгибу, сдвигу, срезу, смятию, устойчивости к коррозии, а также высокую и равномерную твердость при отсутствии хрупкости, небольшое отличие коэффициентов теплового расширения и стабильную макро- и микроструктуру основы и рабочего слоя.

В работах [2, 3] установлены пределы химических составов сталей и чугунов, обеспечивающих высокий уровень вышеупомянутых свойств. Содержание элементов (%мас.) в сталях должно быть в пределах от 0,2 до 0,4 углерода; 0,15–0,9 кремния; 0,25–1,4 марганца; 0,20–2,5 хрома; 0,1–1,0 никеля; до 0,025 серы; до 0,02 фосфора, а в чугунах – 2,3–3,3 углерода; 0,5–0,75 кремния; 0,5–5,0 марганца; 11,0–24,0 хрома; до 2,4 молибдена; до 0,04 серы; до 0,05 фосфора.

Интегральным показателем химического состава железоуглеродистых сплавов является углеродный эквивалент, который для вышеприведенного содержания элементов составляет для стали ($C_{\text{экв}}^{\text{ст}}$) [4] от 0,3 до 1,2 %, а для чугуна ($C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$) [5] от 3,0 до 4,6 %.

Высококачественное диффузное соединение чугунного рабочего слоя и стальной основы, то есть формирование диффузного переходного слоя без пор, трещин усадочных и других дефектов происходит в том случае, когда жидкий чугун заливается на твердую основу при температуре ($t_{\text{зал}}^{\text{чуг}}$) ниже температуры окончания твердения стальной основы, то есть температуры солидус стали ($t_{\text{сол}}^{\text{ст}}$):

$$t_{\text{сол}}^{\text{ст}} > t_{\text{зал}}^{\text{чуг}}. \quad (1)$$

Результаты исследований показали, что зависимости температуры солидус стали ($t_{\text{сол}}^{\text{ст}}$) и ликвидус чугуна ($t_{\text{ликв}}^{\text{чуг}}$) от углеродного эквивалента имеют следующий вид:

$$t_{\text{сол}}^{\text{ст}} = 1498 - 55,96 \cdot C_{\text{экв}}^{\text{ст}}, \text{ } ^\circ\text{C}; r = 0,909; \quad (2)$$

$$t_{\text{ликв}}^{\text{чуг}} = 1462 - 47,94 \cdot C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}, \text{ } ^\circ\text{C}; r = 0,987; \quad (3)$$

где r – коэффициент корреляции; $C_{\text{экв}}^{\text{ст}}$ и $C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$ – углеродные эквиваленты стали и чугуна, соответственно.

Согласно результатам работы [6], оптимальная температура заливки легированных чугунов в литейной формы должна быть на 140–160 °С больше его температуры ликвидус, а максимальный перегрев расплава чугуна, при заливке в литейные формы, должен быть не более 160 °С.

С учетом уравнения (3), определили, что зависимость оптимальной температуры заливки чугуна рабочего слоя ($t_{\text{зал}}^{\text{чуг}}$) от его химического состава имеет следующий вид.

$$t_{\text{зал}}^{\text{чуг}} = 1622 - 47,94 \cdot C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4)$$

С учетом формул 1–4 определили, что для качественного диффузионного соединения чугунного рабочего слоя и стальной основы необходимо выполнение следующего соотношения:

$$C_{\text{экв}}^{\text{чуг}} > 2,59 + 1,17 \cdot C_{\text{экв}}^{\text{ст}}. \quad (5)$$

Соотношение (5) дает возможность при известном значении температуры солидус стальной основы ($t_{\text{сол}}^{\text{ст}}$) путем варьирования значениями углеродного эквивалента чугуна ($C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$) и температурой заливки чугуна ($t_{\text{зал}}^{\text{чуг}}$) определить их оптимальные параметры для получения качественного диффузионного соединения чугунного рабочего слоя и стальной основы биметаллических отливок.

Для проверки вышеприведенных положений изготовили отливки биметаллических молотков дробилок и определили прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя. Внешний вид и размеры отливок показаны на рис. 1. Прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя определяли как усилие разрушения при растяжении отливок, с нанесенными на их переходной диффузионный слой двусторонних надрезов длиной 20 мм, радиусом 1 мм, на разрывной машине ЦДМУ-30Т.

В индукционной печи ИСТ-016 выплавляли сталь и перед заливкой определяли ее химический состав. Сталь содержала (в %мас.) 0,33 углерода; 0,65 кремния; 0,9 марганца; 1,3 хрома; 0,5 никеля; 0,025 серы; 0,02 фосфора.

По формуле, приведенной в работе [4], рассчитывали углеродный эквивалент стали ($C_{\text{экв}}^{\text{ст}} = 0,78 \%$), а по формуле (2) – температуру солидус стали $t_{\text{сол}}^{\text{ст}} = 1454 \text{ } ^\circ\text{C}$.

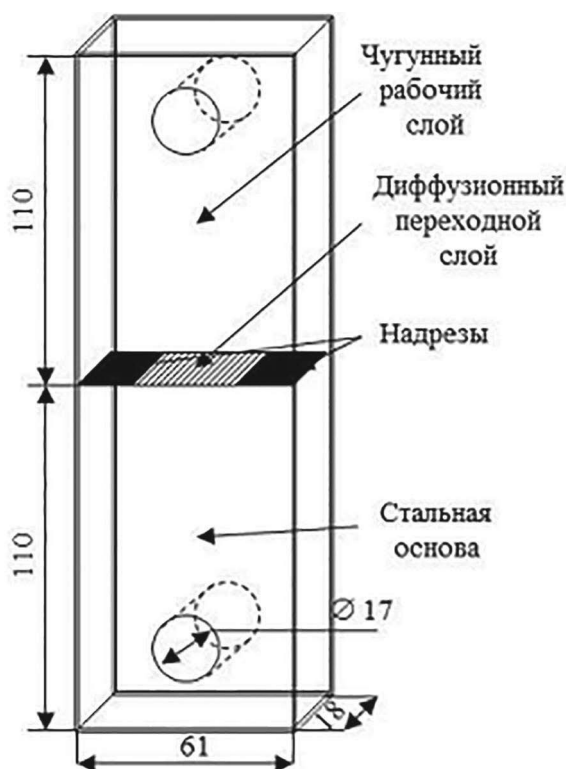


Рис. 1. Размеры биметаллических молотков дробилок для испытаний на прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя

Новые литые материалы

Температура 1454 °С является максимальной температурой заливки чугуно-го рабочего слоя, в данном случае, согласно которой максимальный углеродный эквивалент чугуна ($C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$), рассчитанный по формуле (4), равен 3,5 %. То есть все химические составы легированных износостойких чугунов, для которых значение углеродных эквивалентов будут в пределах от 3,5 до 4,6 %, могут применяться в качестве материала рабочего слоя (рис. 2).

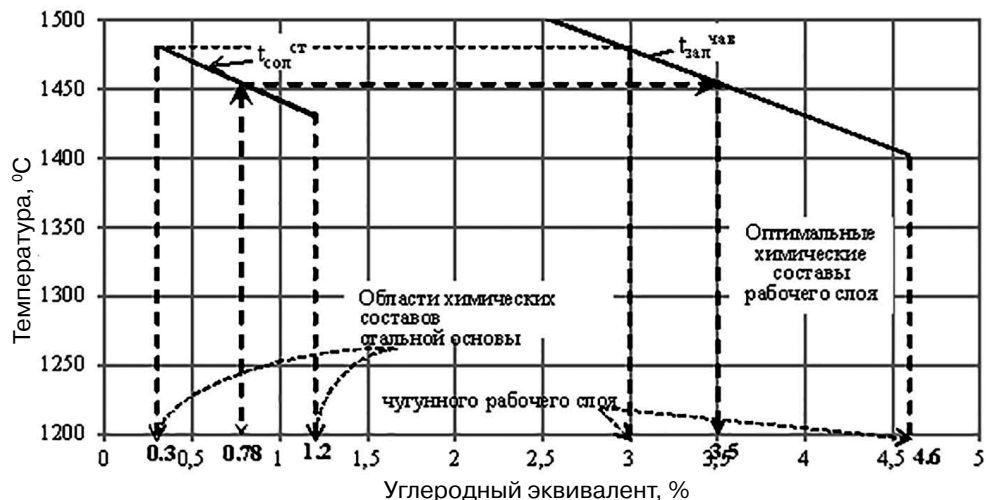


Рис. 2. Области химических составов стальной основы и чугуна рабочего слоя, которые используются при изготовлении биметаллических отливок и пример определения оптимальных химических составов чугуна рабочего слоя при заданном химическом составе стальной основы ($C_{\text{экв}}^{\text{ст}} = 0,78\%$)

Химический состав чугунов, которые одновременно со сталью выплавляли в другой индукционной печи, приведен в таблице.

Химический состав и углеродные эквиваленты $C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$ чугунов, температура их заливки $t_{\text{звл}}^{\text{чуг}}$ и усилия разрушения (P) биметаллических молотков

Номер состава	Содержание элементов, %мас.							$C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$ %	$t_{\text{звл}}^{\text{чуг}}$, °С	P , кг
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mo			
1	3,2	0,7	3,9	15	0,03	0,05	0,8	4,07	1427	3924
2	3	0,7	5,2	18	0,03	0,05	0	3,98	1431	3764
3	3	0,7	5	15	0,03	0,05	0,4	3,84	1438	3816
4	2,4	1	1	19	0,025	0,05	0	3,65	1447	3326
5	2,6	0,4	0,5	11	0,03	0,05	1,4	3,28	1465	1875
6	2,4	0,4	4,8	12	0,03	0,05	0,2	3,00	1478	1647

После заливки стали в литейную форму, на открытую поверхность стальной основы подавали флюс, на который заливали чугун, выплавленный в другой индукционной печи. Испытания биметаллических молотков на растяжение проводили после термической обработки.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что при оптимизации химических составов биметаллических отливок (чугуны № 1–4) прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя увеличивается в 1,8–2,4 раза по сравнению с неоптимизированными по химическому составу биметаллическими отливками (чугуны № 5, 6).

Выводы

Результаты выполненных исследований показали, что при изготовлении биметаллических отливок путем заливки жидкого металла на твердую основу, оптимизация химического состава стальной основы и чугунного рабочего слоя является существенным резервом повышения их качества. Установлено, что высококачественное соединение чугунного рабочего слоя и стальной основы происходит в случае, когда жидкий чугун заливается на твердую основу при температуре ниже температуры солидус стали. Оптимизация химического состава стальной основы и чугунного рабочего слоя приводит к увеличению прочности соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя в 1,8–2,4 раза по сравнению с прочностью неоптимизированных по химическому составу биметаллических отливок.

Список литературы

1. Костенко Г. Д. Основы процессов получения биметаллических отливок. – К.: Знание, 1990. – 19 с.
2. Афтандилянц Е. Г. Термокинетические параметры формирования структуры биметаллических отливок / Е. Г. Афтандилянц, О. А. Пеликан, В. П. Лихошва, Л. М. Клименко // Процессы литья. – 2011. – № 6. – С. 40–49.
3. Афтандилянц Е. Г. Закономерности формирования абразивной износостойкости биметаллических отливок / Е. Г. Афтандилянц, О. А. Пеликан, В. П. Лихошва, В. В. Ширяев, Д. В. Глушков, Л. М. Клименко // Металл и литье Украины. – 2012. – № 7. – С. 34–37.
4. ГОСТ 27772-88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия: ГОСТ 27772-88. [Введен в действие от 1989-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 56 с. – (Государственный стандарт Союза ССР)
5. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. – М., Л.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
6. Справочник по чугуному литью / Под ред. Н. Гиршовича. – Ленинград : Машиностроение, 1978. – 758 с.

Поступила 27.12.2018

References

1. Kostenko, G. D. (1990) Process basics of obtaining bimetallic castings. Kiev: Znanie [in Russian].
2. Aftandiliants, E. G., Pelikan, O. A., Lihoshva, V. P., & Klimenko, L. M. (2011) The thermokinetic parameters of structure forming of the bimetallic castings. *Processy lit'ia*, no. 6, pp. 40–49 [in Russian]
3. Aftandiliants, E. G., Pelikan, O. A., Lihoshva, V. P., Shirjaev, V. V., Glushkov, D. V., & Klimenko, L. M. (2012) Regularities of Formation of Abrasive Wear Resistance of the Bimetallic Castings. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7, pp. 34–37 [in Russian].
4. Structural steel structure rolled products. General specifications. (1988) HOST 27772-88 from 01 January 1989. Moscow: Gosudarstvennyj standart Sojuza SSR [in Russian].
5. Girshovich, N.G. (1966) Crystallization and properties of cast iron in castings. M., L.: Mashinostroenie [in Russian].
6. Girshovich, N. (Eds.) (1978) Leningrad: Mashinostroenie, 758 p.

Received 27.12.2018

Є. Г. Афтанділянц, д-р техн. наук, ст. наук. співр, e-mail: aftyev@hotmail.com

В. П. Лихошва, д-р. техн. наук, зав. відділом, e-mail: plazer_v@mail.ru

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНИХ СКЛАДІВ БІМЕТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ

На основі аналізу процесу формування з'єднання сталевोї основи та чавунного робочого шару біметалевих виливків встановлено, що якісне з'єднання при заливці рідкого чавуну на тверду сталеву основу, що розташована в ливарній формі, відбувається у випадку, коли температура заливання чавуну менше температури солідус сталі. Враховуючи, що температури заливання чавуну та солідус сталі залежать від їх хімічного складу, встановили кількісні закономірності впливу хімічного складу на ці характеристики. У якості інтегрального параметру хімічного складу сталі та чавуну використовували їх вуглецевий еквівалент. Встановлено кількісні закономірності впливу вуглецевого еквіваленту на температури солідус сталі та ліквідус чавуну, а також заливання чавуну. Наведено умови отримання якісного дифузійного з'єднання чавунного робочого шару і сталевої основи та приклад визначення оптимальних хімічних складів сталевої основи та чавунного робочого шару при виготовленні біметалевих молотків. Показано, що при оптимізації хімічних складів біметалевих виливків міцність з'єднання сталевої основи та чавунного робочого шару збільшується в 1,8–2,4 рази в порівнянні з неоптимізованими за хімічним складом біметалевими виливками.

Ключові слова: біметалеві виливки, основа, робочий шар, сталь, чавун, вуглецевий еквівалент, температура, солідус, ліквідус, заливання, міцність.

Y.G. Aftandilyants, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher,
e-mail: aftyev@hotmail.com

V.P. Lihoshva, Doctor of Engineering Sciences, Head of Department,
e-mail: plazer_v@mail.ru

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

OPTIMIZATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF BIMETALLIC CASTINGS

Based on the analysis of the formation of the compound of the steel base and the cast-iron working layer of bimetallic castings, it has been established that a high-quality compound, when liquid iron is poured on solid steel base located in the mold, occurs when cast iron temperature is less than the temperature of steel solidification. Taking into account that the cast iron pouring and steel solidus temperatures are depended from their chemical composition, quantitative regularities of the chemical composition influence on these characteristics are established. Carbon equivalent was taken as integral parameter of the steel and cast iron chemical composition. Quantitative regularities are established of influence of the carbon equivalent on the temperatures of solidus steel and liquidus cast iron, as well as pouring of cast iron. The conditions are given of obtaining a qualitative diffusion compound of a cast-iron working layer and a steel base and an example of determining the optimal chemical compositions of a steel base and a cast-iron working layer in the manufacture of bimetallic hammer. It is shown that strength of the connection between the steel base and the cast iron working layer increases in 1.8–2.4 times for optimizing the chemical compositions of bimetallic castings, in comparison with the bimetallic castings with not optimized chemical composition.

Key words: bimetallic castings, base, working layer, steel, cast iron, carbon equivalent, temperature, solidus, liquidus, pouring, strength.