

УДК 669:539.4(075.8)

Е. Г. Афтандилианц, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: aftyev@hotmail.com

О. А. Пеликан, науч. сотр., e-mail: otmlp@ptima.kiev.ua

Л. М. Клименко, ведущ. инженер

М. И. Голубчик, ведущ. инженер

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ТВЕРДОСТЬ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК

Приведены результаты исследования влияния структуры на твердость биметаллических отливок. Представлены основные факторы, определяющие твердость биметаллических отливок. Установлены количественные закономерности влияния структуры на распределение твердости в металлической основе, переходном и рабочем слое биметаллических отливок. Показано, что наиболее эффективное влияние на твердость металла-основы оказывает объемная доля и размер зерен перлита. При этом их эффективность в 2,1 раза выше, чем действие феррита, а изменение размера зерна перлита в 3,5 раза эффективнее повышает твердость металла-основы, чем феррита. Влияние размера ферритной зоны на изменение отношения микротвердости переходного слоя к расстоянию от металла-основы составляет порядка 30, а перлитной – 60 %. Установлено, что дисперсность карбидов оказывает более существенное влияние (в 2,3 раза) на твердость рабочего слоя, чем их количество. В случае мартенсита наблюдается обратный эффект – количество мартенсита гораздо эффективнее (в 5,1 раза) повышает твердость рабочего слоя, чем размер его пакетов. Количество и размер зерна аустенита оказывают равнозначное влияние на твердость рабочего слоя.

Ключевые слова: биметаллические отливки, твердость, структура, металлическая основа, переходной и рабочий слой, феррит, перлит, карбид, мартенсит, аустенит.

Наведено результати дослідження впливу структури на твердість біметалевих виливків. Представлено основні фактори, що визначають твердість біметалевих виливків. Встановлено кількісні закономірності впливу структури на розподіл твердості в металевій основі, перехідному і робочому шарі біметалевих виливків. Показано, що найбільш ефективний вплив на твердість металу-основи здійснює об'ємна частка і розмір зерен перліту. При цьому їх ефективність в 2,1 рази вище, ніж дія фериту, а зміна розміру зерна перліту в 3,5 рази ефективніше підвищує твердість металу-основи, ніж фериту. Вплив розміру феритної зони на зміну відношення мікротвердості перехідного шару до відстані від металу-основи становить близько 30, а перлітної – 60 %. Встановлено, що дисперсність карбідів здійснює більш істотний вплив (в 2,3 рази) на твердість робочого шару, ніж їх кількість. У разі мартенситу спостерігається зворотний ефект – кількість мартенситу набагато ефективніше (в 5,1 рази) підвищує твердість робочого шару, ніж розмір його пакетів. Кількість і розмір зерна аустеніту надають рівнозначний вплив на твердість робочого шару.

Ключові слова: біметалеві виливки, твердість, структура, металева основа, перехідний і робочий шар, ферит, перліт, карбід, мартенсит, аустеніт.

The results are of the study of structure influence on the hardness of bimetallic castings. The main factors are defined that determine the hardness of bimetallic castings. Quantitative laws are established of structure influence on the hardness distribution in basis, transition and working layer of bimetallic castings. The volume fraction and pearlite grain size have the most effective influence on the base metal hardness (in 2.1 times) than ferrite. Pearlite grains size changing increases the base metal strength in 3.5 times more efficient than ferrite. Effect of the ferrite zone size, to change ratio of the transition layer microhardness to the distance from the base metal is about 30, and a pearlite –60%. Dispersibility carbides has a more significant influence (in 2.3 times) on the working layer hardness than their quantity. In martensite case opposite effect is observed - martensite quantity is much more efficient (in 5.1 times) increases the hardness of the working layer than the martensite packet sizes. The austenite quantity and grain size have equal influence on the working layer hardness.

Keywords: bimetallic castings, hardness, structure, metal base, transition and working layer, ferrite, pearlite, carbide, martensite, austenite.

По своему функциональному назначению биметаллические отливки должны сочетать высокую твердость и износостойкость рабочего слоя с конструкционной прочностью, ударной вязкостью и пластичностью материала основы. Для обеспечения высокой твердости рабочих поверхностей биметаллические отливки должны иметь определенное сочетание структурных характеристик и свойств, среди которых основными являются:

- высокая степень легирования и гомогенизации твердого раствора и равномерное распределение в нем вторичных фаз;
- стабильность структуры в процессе эксплуатации;
- минимальное отличие коэффициентов теплового расширения структурных составляющих;
- высокая и равномерная твердость при отсутствии хрупкости, а также высокое сопротивление сжатию, изгибу, сдвигу, срезу, смятию и коррозии.

Одними из наиболее важных требований, предъявляемых к биметаллическим отливкам, является надежная диффузионная связь между сплавами, входящими в состав биметаллических пар, и высокие прочностные характеристики переходной диффузионной зоны.

Высокие требования, предъявляемые к биметаллическим отливкам, обуславливают необходимость определения влияния технологических параметров литья и структуры на твердость биметаллических отливок, которая дает возможность изучить закономерности количественного изменения прочностных и качественного изменения пластических свойств металлических материалов.

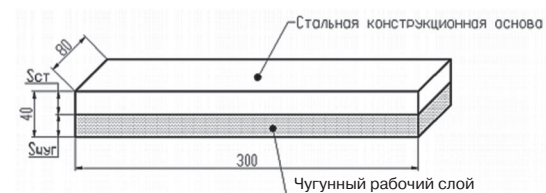


Рис. 1. Эскиз опытной биметаллической отливки

Закономерности изменения твердости и параметров структуры исследовали на биметаллических отливках размерами 300x80x40 мм (рис. 1), изготовленных последовательной заливкой расплавов в литейную форму при различных химических составах, толщинах, массах и температурах заливки слоев стали и чугуна после термической обработки (закалка с последующим отпуском).

Номера отливок, марки сплавов биметаллических пар, температура заливки, соотношение толщин ($\delta_{ст}/\delta_{чуг}$) и масс ($m_{ст}/m_{чуг}$) слоев стали и чугуна приведены в таблице.

Микроструктуру изучали на образцах размером 20x20x10 мм, вырезанных из биметаллических отливок в зоне диффузионного соединения стальной основы и рабочего слоя. Исследование микроструктуры проводили на оптическом (МИМ-10) и электронном (JEOJ JSM-35CF) микроскопах. Химический состав твердых растворов

Номера отливок, марки сплавов, температура заливки, соотношение толщин ($\delta_{ст}/\delta_{чуг}$) и масс ($m_{ст}/m_{чуг}$) слоев стали и чугуна исследуемых биметаллических отливок

Номер отливки	Марка сплава	Масса отливки, кг	Соотношение толщин слоев $\delta_{ст}/\delta_{чуг}$, мм/мм	Соотношение масс слоев $m_{ст}/m_{чуг}$, кг/кг	Температура заливки, °С	
					стали	чугуна
1	Сталь 25Л – Чугун 300Х12Г5	4,86	50/50	2,46 /2,40	1653	1386
2		3,64		1,84/1,80		
3		2,43		1,23/1,20		
4		1,22		0,62/0,60		
5		4,93	25/75	1,23/3,70	1611	1409
6		3,69		0,92/2,77		
7		2,47		0,62/1,85		
8		1,22		0,30/0,92		
9		4,93	75/25	3,70/1,23	1615	1424
10		3,69		2,77/0,92		
11		2,47		1,85/0,62		
12		1,22		0,92/0,30		
22	Чугун 300Х12Г5 – Сталь 25Л	3,69	75/25	2,77/0,92	1644	1386
25	Сталь 70ГЛ – Чугун ЧХ22	4,86	50/50	2,46 /2,40	1590	1414
26		3,64		1,84/1,80		
27		2,43		1,23/1,20		
29		4,93	25/75	1,23/3,70	1571	1419
30		3,69		0,92/2,77		
31		2,47		0,62/1,85		
32		1,22		0,30/0,92		
33		4,93	75/25	3,70/1,23	1580	1429
34		3,69		2,77/0,92		
35		2,47		1,85/0,62		

и карбидов определяли на электронном растровом микроанализаторе РЭММА-102 и электронном микроскопе JEOJ JSM-35CF с дисперсионным энергоанализатором INCA Energy 350.

Параметры структуры исследуемых биметаллических отливок и закономерности их изменения приведены в работе [1].

Микротвердость структурных составляющих измеряли на приборе ПМТ-3М с автоматической записью показаний при нагрузке 0,5Н. Среднее значение микротвердости для каждой точки определяли на основании 5–6 измерений.

Значения твердости стальной основы, переходного и рабочего слоев исследуемых биметаллических отливок приведены на рис. 2.

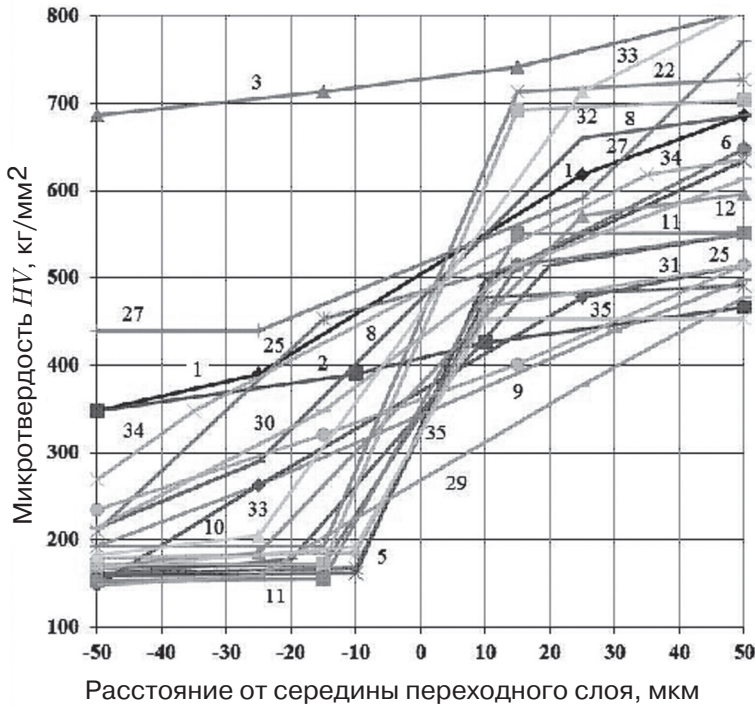
Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 2, показывает, что при переходе от стальной основы к рабочему слою происходит увеличение твердости материала в 3,7–7,2 раза (рис. 3).

В пределах переходного слоя микротвердость изменяется в 1,1–4,7 раза (рис. 4). При этом скорость изменения микротвердости увеличивается от 0,1 до 2,0 НВ/мкм (рис. 5).

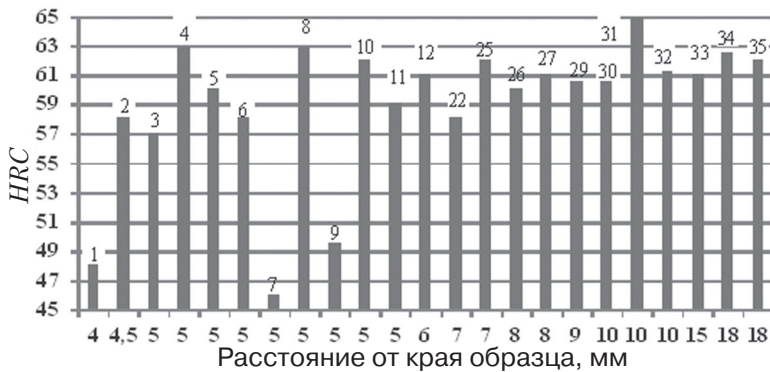
Анализ данных, приведенных на рис. 2, показывает, что корреляция между расстоянием от поверхности биметаллической отливки и твердостью отсутствует. Это указывает на то, что твердость биметаллической отливки определяется, в основном, структурными параметрами.



а



б



в

Рис. 2. Твердость стальной основы (а), переходного (б) и рабочего (в) слоев исследуемых биметаллических отливок: цифры на графиках означают номер биметаллической отливки

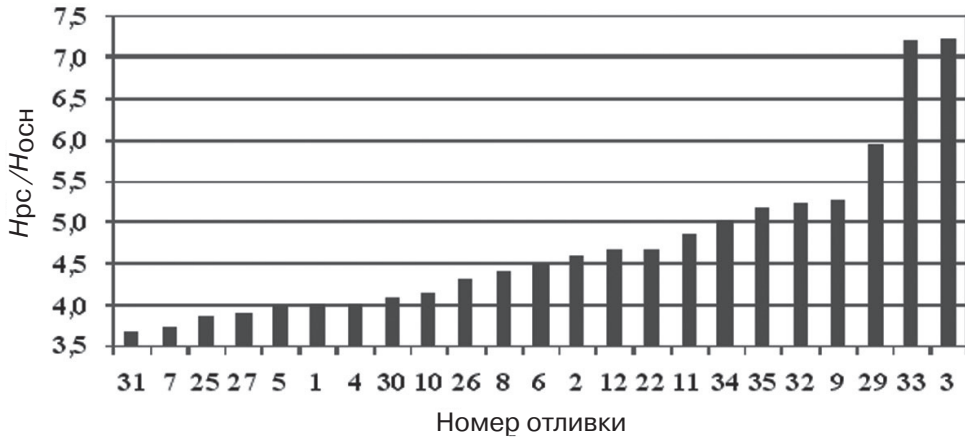


Рис. 3. Отношение твердости рабочего слоя (H_{rc}) и стальной основы ($H_{осн}$) биметаллических отливок

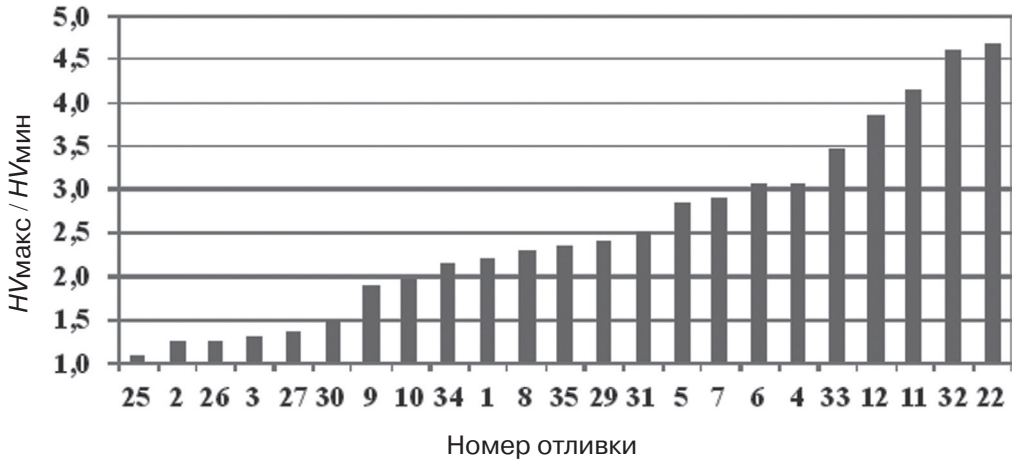


Рис. 4. Отношение максимальной (HV_{max}) и минимальной (HV_{min}) микротвердости в переходном слое биметаллических отливок

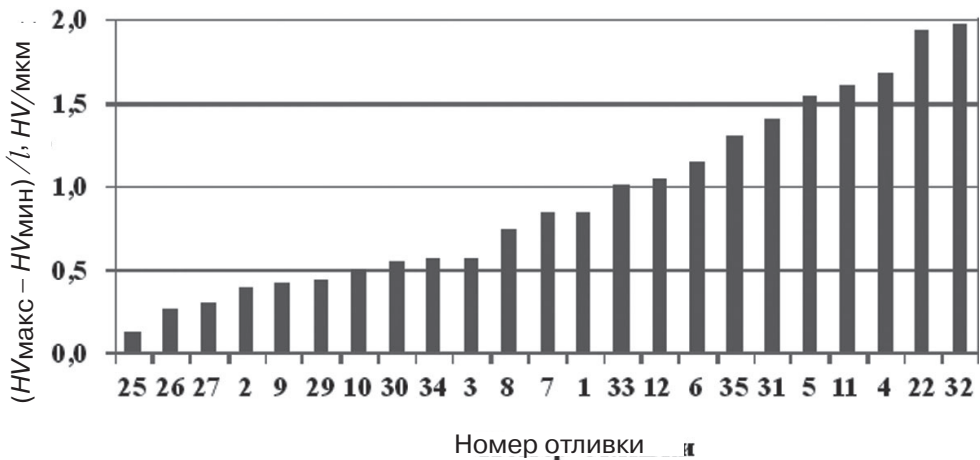


Рис. 5. Скорость изменения микротвердости в переходном слое биметаллических отливок

При разработке модели формирования твердости биметаллических отливок после термической обработки за исходные факторы принимали объемную долю и размер зерен феррита ($\Phi_{\text{фстТО}}, D_{\text{фстТО}}$) и перлита ($\Pi_{\text{пстТО}}, D_{\text{пстТО}}$) в металлической основе, ширину ферритного ($B_{\text{фпзТО}}$) и перлитного ($B_{\text{ппзТО}}$) слоя в переходной зоне, количество ($K_{\text{чТО}}, M_{\text{чТО}}, A_{\text{чТО}}$) и размер ($D_{\text{кчТО}}, D_{\text{мчТО}}, D_{\text{ачТО}}$), соответственно, карбидов, мартенсита и аустенита в рабочем слое, а также расстояние от поверхности металла-основы ($I_{\text{м-о}}$) и рабочего слоя ($I_{\text{рс}}$).

Параметры структуры биметаллических отливок определяли по моделям, приведенным в работе [1].

В качестве функций отклика модели принимали твердость металла-основы ($HRB_{\text{м-о}}$), рабочего слоя ($HRC_{\text{рс}}$), а также скорость изменения твердости в переходной зоне ($\Delta HV / I_{\text{пс}}$).

Количественные закономерности влияния исходных факторов на функции отклика определяли методами парного и множественного корреляционного анализа при 95 % вероятности. Оценку значимости влияния факторов проводили по критерию Стьюдента, а адекватность уравнений – по значениям парного (r) или множественного (R) коэффициента корреляции и средней относительной погрешности аппроксимации (δ , %).

Результаты математического анализа показывают, что функции отклика моделей с вероятностью 95 % описываются следующими формулами:

$$\begin{aligned} HRB_{\text{м-о}} = & 55,423 - 1,268 \cdot D_{\text{фстТО}} + 5,83 \cdot D_{\text{пстТО}} + 0,36 \cdot I_{\text{м-о}} - \\ & - 0,018 \cdot \Phi_{\text{фстТО}} \cdot D_{\text{фстТО}} + 0,022 \cdot D_{\text{фстТО}} \cdot D_{\text{пстТО}} - 0,036 \cdot \Pi_{\text{пстТО}} \cdot D_{\text{пстТО}} + \\ & + 0,002 \cdot (\Phi_{\text{фстТО}})^2 + 0,004 \cdot (\Pi_{\text{пстТО}})^2 + 0,035 \cdot (D_{\text{фстТО}})^2 - 0,147 \cdot (D_{\text{пстТО}})^2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$R = 0,831$$

$$\begin{aligned} \Delta HV / I_{\text{пс}} = & 0,44 - 0,60 \cdot B_{\text{фпзТО}} + 0,35 \cdot B_{\text{ппзТО}} + 0,17 \cdot (B_{\text{фпзТО}})^2 - \\ & - 0,02 \cdot (B_{\text{ппзТО}})^2 - 0,03 \cdot B_{\text{фпзТО}} \cdot B_{\text{ппзТО}}, \end{aligned} \quad R = 0,836 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} HRC_{\text{рс}} = & 0,844 - 5,75 + 0,17 \cdot K_{\text{чТО}} + 0,09 \cdot D_{\text{кчТО}} + 0,85 \cdot M_{\text{чТО}} - \\ & - 0,09 \cdot D_{\text{мчТО}} - 0,46 \cdot A_{\text{чТО}} + 0,28 \cdot D_{\text{ачТО}} + 1,25 \cdot I_{\text{рс}}, \end{aligned} \quad R = 0,836 \quad (3)$$

Оценка влияния исходных факторов на твердость биметаллических отливок показывает, что наиболее эффективное влияние на твердость металла-основы оказывает объемная доля и размер зерен перлита. При этом их эффективность в 2,1 раза выше, чем действие феррита. Сравнение влияния размера зерен показывает, что изменение размера зерна перлита в 3,5 раза эффективнее повышает твердость металла-основы, чем феррита.

Аналогичная закономерность наблюдается при анализе скорости изменения твердости в переходной зоне. При этом влияние размера ферритной зоны составляет порядка 30, а перлитной – 60 %.

Изучение влияния структурных факторов на твердость рабочего слоя показало, что дисперсность карбидов оказывает более существенное влияние (в 2,3 раза) на твердость рабочего слоя, чем их количество. В случае мартенсита наблюдается обратный эффект – количество мартенсита гораздо эффективнее (в 5,1 раза) повышает твердость рабочего слоя, чем размер его пакетов. Анализ влияния параметров аустенитной структуры показывает, что как количество, так и размер зерна оказывают равнозначное влияние на твердость рабочего слоя.

Выводы

Исследование процесса формирования твердости биметаллических отливок после термической обработки показало, что твердость металла-основы с коэффициентом корреляции 0,831 определяется объемной долей и размером зерен феррита и перлита; скорость изменения твердости в переходной зоне с коэффициентом корреляции 0,836 – шириной ферритного и перлитного слоя в переходной зоне; твердость рабочего слоя с коэффициентом корреляции 0,836 – количеством и размерами карбидов, мартенсита и аустенита в рабочем слое, а также расстоянием от поверхности рабочего слоя.



Список литературы

1. Афтандиянц Е. Г. Формирование структуры биметаллических отливок / Е. Г. Афтандиянц, О. А. Пеликан, Л. М. Клименко, Д. Г. Костенко // Метал и литье Украины. – 2014. – № 8. – С. 29–35.



References

1. Aftandilyants, Ye. G., Pelikan, O. A., Klymenko, L. M., Kostenko, D. G. (2014) Formirovanie struktury bimetallicheskikh otlivok [*Structure formation of bimetallic castings*]. Metal i lite Ukrainy, no. 8, pp. 29–35 [in Russian].

Поступила 14.09.2017