

Установлено, что вследствие вибрационного воздействия в 3–4 раза снижается размер аустенитного зерна (с одновременным снижением разнo-зернистости), заметно улучшается распределение карбидов, а в микро-структуре полностью исчезает нежелательная область столбчатых кристаллов, исключаются дефекты, связанные с усадкой металла и недостаточным питанием отливки из прибыльной части. Применение вибрации существенно улучшает работу прибыли, что позволяет снизить расход металла и отказаться от многоразовой подпитки отливки. При этом усадочная раковина приобретает форму открытой чаши или воронки.

Следует отметить, что на виброобработанных отливках не было зарегистрировано ни одного случая образования горячих трещин, в то время как на сравнительных отливках текущего производства этот вид брака появляется достаточно часто и не подлежит исправлению. Указанный факт свидетельствует о том, что при определенных параметрах вибровоздействия возможно снижение уровня и рассредоточенных опасных напряжений, даже в случае склонных к трещинообразованию заэвтектоидных сталей.

Определение твердости по сечению отливок показало, во-первых, значительное снижение анизотропии по этому показателю, а во-вторых, увеличение его уровня на 25–30 % по отношению к сравнительным отливкам бандажей. Этот факт позволяет говорить о резерве износостойкости и работоспособности бандажей, подвергнутых виброобработке в процессе их кристаллизации.

Эксплуатационные испытания показали, что опытные бандажки имеют равномерный износ и по стойкости в среднем на 25 % превосходят бандажки, отлитые без воздействия вибрации.

**В.И. Черменский, Е.В. Максимова,  
Т.В. Дмитриева, М.Н. Вершинин**

## **РАЗРАБОТКА УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ИНВАРНЫХ СПЛАВОВ С ЗАДАНЫМ ТЕПЛОМЫМ РАСШИРЕНИЕМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Интерес к углеродистым инварным сплавам Fe-Ni-C и Fe-Ni-Co-C вызван возможностью реализации в них повышенных литейных свойств, что с точки зрения производства сложных по конфигурации и крупногабаритных

деталей особо высокой точности делает эти сплавы наиболее предпочтительными среди всех литейных инваров и суперинваров. Однако углерод в этих сплавах приводит не только к существенному улучшению технологичности, но и может затруднить достижение нужного уровня термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР).

Рассматриваемые литейные сплавы по содержанию углерода удобно разделить на углеродистые и высокоуглеродистые. К первым следует отнести сплавы, в которых углерода содержится более 0,1 %, и в их первичной структуре не образуется эвтектика с графитом или карбидами. Верхний предел концентрации углерода в этих инварах можно оценить приблизительно на уровне 1,0 %, основываясь на данных о его растворимости в сплавах системы Fe-Ni и имеющихся в литературе фрагментах диаграммы Fe-Ni-C. Высокоуглеродистые сплавы после кристаллизации имеют структуру с графитной или карбидной эвтектикой. В этом случае содержание углерода должно превышать 1,5 %, такие сплавы можно называть инварными чугунами.

Важным является то обстоятельство, что углеродистые сплавы могут быть однофазными (весь углерод растворен в инварном аустените) и двухфазными (часть углерода выделяется в виде графитных включений). Высокоуглеродистые сплавы содержат не менее двух фаз. В изготавливаемых отливках конструкционного назначения матричная фаза представляет собой инварный или суперинварный аустенит, а второй фазой является графит.

В работах, посвященных минимизации ТКЛР при невысоких температурах, имеются экспериментальные оценки его прироста в зависимости от добавок углерода. Количественные данные этого прироста разнятся весьма существенно: от  $1,0 \cdot 10^{-6}$  до  $0,25 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  на каждые 0,1 % углерода, растворенного в аустените. Компьютерная обработка литературных данных показала, что в случае оптимизации составов инварных сплавов Fe-Ni-C по содержанию никеля минимально возможный прирост ТКЛР в области температур до 100 °С составляет  $0,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  при увеличении содержания углерода на 0,1 %. Для более высоких температур такие данные вообще неизвестны.

В инварных чугунах прирост ТКЛР вызывается еще и графитными включениями. Принято считать, что он может быть весьма большим. Нами выполнены расчеты в допущении возможности реализации и регулирования выделений углерода в виде графита, аддитивно влияющего на ТКЛР. Эти расчеты говорят о том, что вредная роль графита преувеличена. Так, при ТКЛР матрицы  $4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  прирост ТКЛР за счет графитных включений в инварном чугуне эвтектического состава должен составить не более  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ .

В литературе нет убедительных экспериментальных данных, относящихся к вопросу минимизации ТКЛР в инварных сплавах системы железо-никель-кобальт-углерод при повышенных температурах (среднее значение ТКЛР в нашем случае согласно техническому заданию одного из потенциальных потребителей должно отвечать уровню  $(4,5-5,0) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  в интервале температур 20–400 °С). В связи с этим основная цель исследования состояла в получении результатов, позволяющих сформировать свою экспериментальную базу данных по влиянию на заданный ТКЛР<sub>20-400</sub> содержания основных компонентов: Ni, Co и C.

Опыты проводили в лабораторных условиях на чистых исходных материалах: карбонильном железе ВЗ, электролитическом никеле Н1 и кобальте К0. Углерод в сплавы вводили в виде чистого чугуна (полупродукта ферросплавного производства) или раздробленного особо чистого графита марки МГ ОСЧ. Плавки вели в печи Таммана и в индукционной печи типа ИПП–0,0005. Использовали алуновы тигли емкостью 100–150 г; после выдержки расплава получали прутки вакуумным всасыванием в кварцевые трубки диаметром около 5 мм, которые резали на образцы длиной примерно 50 мм для определения ТКЛР.

Микроудлинение образцов в зависимости от температуры измеряли на программируемом высокотемпературном dilatометре, изготовленном в Институте химии силикатов РАН (Санкт-Петербург). Результаты измерений обрабатывали с помощью программы *Excel* в операционной системе *Windows*. Погрешность определения ТКЛР<sub>20-400</sub> не превышала  $0,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ .

В результате проделанной работы получена необходимая экспериментальная база количественных данных о влиянии содержания никеля, кобальта и углерода на ТКЛР литых сплавов соответственно систем Fe-Ni, Fe-Ni-Co, Fe-Ni-Co-C в области их инварных составов. Определены оптимальные содержания компонентов указанных сплавов с точки зрения достижения в них значений ТКЛР<sub>20-400</sub> на уровне  $(4,5-5,0) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ . Конкретизирован план проведения экспериментов по выяснению степени значимости другого фактора исследуемой минимизации ТКЛР-режима термической обработки инварных сплавов после их литья.