

*Параметры кокиля:*

- тип – вытряхной с песчаными стержнями;
- материал – чугун СЧ15;
- толщина рабочей стенки – 40 мм;
- теплозащитное покрытие – краска на жидком стекле;
- охлаждение – естественное на воздухе без обдува;
- температура нагрева перед заливкой – 150–200 °С;
- стойкость – более 100 заливок.

*Параметры литья:*

- тип литниковой системы – верхняя;
- соотношение площадей сечений питателей, литникового хода и стояка – 1:1, 1:1,2;
- температура заливки – 1540–1560 °С;
- продолжительность заливки – 20–30 с;
- скорость подъема жидкого металла в кокиле –  $12 \pm 2$  мм/с.

**С. В. Рабинович, М. Д. Харчук,  
В. И. Черменский, И. В. Кончаковский,  
М. Ю. Русин, А. С. Хамицаев**

## **ЛИТЕЙНЫЙ ИНВАРНЫЙ СПЛАВ З1НКМЛ**

Прецизионный литейный сплав, обладающий низким тепловым расширением при повышенных температурах, разработан с целью использования в летательных аппаратах, оптоэлектронной, лазерной технике, прецизионном приборостроении и в других областях, в частности для изготовления деталей, работающих в контакте с неметаллами, например кварцем, кремнием, карбидом кремния.

Известные прецизионные сплавы на основе железа, обладающие низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) в температурных интервалах 20–400, 20–500 °С, являются не литейными, а деформируемыми, и из них нельзя из-за низкой трещиностойчивости изготавливать фасонные отливки.

Созданные ранее прецизионные литейные сплавы, обладающие достаточной трещиностойчивостью для изготовления сложных фасонных отли-

вок, имеют сравнительно высокий средний ТКЛР в указанных интервалах температур 20–400, 20–500 °С и не могут быть использованы в целом ряде ответственных изделий. К предпринятой разработке ближе всего находится литейный сплав 32НКМБЛ [2] (табл. 1), содержащий, масс. %: никель – 31,5–33,0; кобальт – 8,1–9,3; ниобий – 0,25–0,5; молибден – 0,15–0,3; редкоземельные элементы (РЗМ): церий, лантан, празеодим, неодим – в сумме 0,04–0,25; железо – остальное. Средний ТКЛР этого сплава в предшествующих интервалах 20–300 и 20–350 °С составляет не более  $3,2 \cdot 10^{-6}$  и  $4,2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{К}^{-1}$  соответственно. Недостаточно же низкий ТКЛР при высоких температурах (табл. 2) объясняется потерей инвариности из-за низкого значения точки Кюри, что, в свою очередь, обусловлено неадекватностью состава по содержанию кобальта и никеля.

Таблица 1

Химический состав сплавов

Сплав	Содержание элементов, масс. %					
	Ni	Co	Mo	Nb	РЗМ	Fe
32НКМБЛ	31,5–33,0	8,1–9,3	0,15–0,3	0,25–0,5	0,04–0,25	Ост.
31НКМЛ	31,0–32,5	9,4–11,0	0,4–0,6	–	0,04–0,25	Ост.

*Примечание.* Примеси, масс. %: S и P ≤ 0,02; C ≤ 0,03; Si ≤ 0,15; Mn ≤ 0,4.

Таблица 2

Тепловое расширение сплавов

Сплав	Наибольшие значения среднего ТКЛР ( $10^{-6} \cdot \text{К}^{-1}$ ) в интервалах температур, °С				
	20–300	20–350	20–400	20–450	20–500
32НКМБЛ	3,2	4,2	5,4	6,5	7,6
31НКМЛ	4,6	4,5	4,4	5,5	6,6

В связи с изложенным задача разработки нового сплава заключалась в снижении ТКЛР в интервалах температур 20–400, 20–450 и 20–500 °С у взятого в качестве базового сплава 32НКМБЛ при сохранении гомогенности структуры, определяющей стабильность эксплуатационных характеристик и сохранение уровня трещиностойчивости. В итоге был получен сплав 31НКМЛ, имеющий следующее соотношение компонентов, масс. %: никель – 31,0–32,5; кобальт – 9,4–11,0; молибден – 0,4–0,6; редкоземельные элементы (церий, лантан, празеодим, неодим) – в сумме 0,04–0,25; железо – остальное (см. табл. 1).

В новом сплаве по сравнению с исходным увеличено содержания кобальта до 9,4–11,0% при одновременном снижении содержания никеля до 31,0–32,5%, что обеспечивает снижение ТКЛР в заданных температурных интервалах 20–400, 20–450, 20–500 °С. Увеличено содержания молибдена с 0,15–0,3 до 0,4–0,6%, и исключен из состава ниобий. Это связано с необходимостью обеспечения однофазной (гомогенной) структуры сплава при отрицательных климатических температурах (до -60 °С). При таких температурах в железо-никель-кобальтовых инварах и суперинварах может выделяться  $\alpha$ -фаза (мартенсит), ТКЛР которой более чем на порядок (до  $11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ ) выше ТКЛР  $\gamma$ -фазы, из которой состоят исследуемые сплавы, и вследствие этого ухудшается главная характеристика – низкий ТКЛР.

Соотношение содержания основных компонентов Fe, Ni, Co и легирующих элементов определяет величину ТКЛР и температуру выделения мартенсита (Мн). Для обеспечения наиболее низкого ТКЛР при повышении содержания кобальта до 9,4–11,0% необходимо понизить содержание никеля. Однако при этом повышается Мн. Добавка 0,6% молибдена понижает точку Мн на 60 °С, а добавка 0,6% ниобия – только на 40 °С [1]. Таким образом, увеличение содержания молибдена до 0,4–0,6% при исключении ниобия позволяет уменьшить нижний и верхний пределы содержания никеля с 31,5–33,0% до оптимального уровня 31,0–32,5% и тем самым уменьшить ТКЛР сплава.

Кроме того, как нами установлено, при содержании молибдена до 0,6% отсутствует его ликвация к границам зерен, что гарантирует гомогенность структуры сплава. Наличие молибдена в центре зерен устраняет опасность выделения мартенсита и повышения ТКЛР, а отсутствие молибдена на границах структурных элементов в виде второй фазы обеспечивает при изготовлении сложных фасонных отливок их трещиностойчивость не ниже, чем в исходном сплаве. При содержании молибдена ниже 0,4% ухудшается трещиностойчивость сплава. При содержании молибдена более 0,6% наблюдается ликвация его к границам зерен, в районе которых появляется вторая фаза, что отрицательно влияет на трещиностойчивость.

Механизм влияния редкоземельных элементов на обеспечение достаточной трещиностойчивости сплава аналогичен реализуемому в базовом сплаве [2].

Плавки емкостью до 160 кг проводили в индукционной печи марки ИСТ-016 с кислой футеровкой. Шихтовые материалы (низкоуглеродистое

железо) подвергались дробеструйной обработке. Литейные отходы в плавках не использовали. Раскисление сплавов производили в печи ферромарганцем, ферросилицием, алюминием, РЗМ в виде мишметалла вводили в ковше. Отливки изготавливали литьем в кокиль с песчаными стержнями и центробежным способом на машине с горизонтальной осью вращения.

ТКЛР сплавов определяли на 2–3 образцах для каждой плавки на кварцевом высокотемпературном dilatометре. Образцы для определения ТКЛР получали всасыванием расплава из ковша в кварцевые трубки. Образцы для определения второй фазы вырезали из отливки. Обработку образцов холодом производили в спирте, охлажденном жидким азотом.

Термическую обработку образцов сплава 31НКМЛ проводили по режиму: выдержка при температуре 850 °С в течение 1 ч и охлаждение на воздухе. Это было применено и к образцам исходного сплава 32НКМБЛ, хотя при его разработке термическая обработка осуществлялась иначе: выдержка при 850 °С в течение 1 ч и закалка в воде. Режим с закалкой дает снижение ТКЛР сплава по сравнению с отжигом на  $(0,3 \cdot 0,5) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ , но для сплавов, изделия из которых работают при нагреве выше 300–350 °С, закалка недопустима, так как ее эффект снимается. Поэтому все сравниваемые по ТКЛР образцы подвергались только отжигу.

Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что средние значения ТКЛР нового сплава в интервалах температур 20–400, 20–450, 20–500 °С существенно ниже значений ТКЛР исходного сплава в тех же температурных интервалах. В интервалах меньших температур (20–300 и 20–350 °С) преимущества имеет базовый сплав, что обусловлено другим соотношением элементов в его составе. Это обстоятельство следует особо отметить, поскольку оно говорит о важности адресного подхода к вопросам разработки и применения данных сплавов для разных температурных интервалов эксплуатации.

Данные по трещиностойкости (горячеломкости) нового сплава, приведенные в табл. 3, показывают, что она достаточна для изготовления сложных, крупногабаритных деталей методами фасонного литья.

Наличие вторых фаз в структуре сплава определяли с помощью рентгеноспектрального и оптического микроанализа. Результаты определения мартенсита свидетельствуют, что в структуре нового сплава после обработки образцов холодом при –60 °С мартенситная фаза отсутствует. Однако при содержании никеля в сплаве 30,6% (менее 31,0%), а молибдена

0,2% (менее 0,4%) в структуре наблюдается  $\alpha$ -фаза. То же происходит при содержании никеля 31,5%, а молибдена – 0,15%.

Таблица 3

Трещиноустойчивость сплавов

Сплав	Характеристика отливки, способ литья	Количество залитых деталей, ед.	Температура заливки, °С	Результат
32НКМБЛ	Корпус, габаритные размеры 430×430×300 мм. Масса отливки с прибылью – 62 кг. Литье в кокиль с использованием песчаных стержней	28	1560–1570	Трещин не обнаружено
31НКМЛ	То же	36	1560–1570	То же
32НКМБЛ	Кольцо, размеры 230×180×450 мм. Масса отливки – 60 кг. Центробежное литье	15	1540–1550	»
31НКМЛ	То же	17	1540–1550	»

Данные о наличии второй фазы на границах структурных элементов, полученные на рентгеновском микроанализаторе Superprobe-733 JCXA (Япония), показывают, что химический состав сплава 31НКМЛ в литом состоянии обеспечивает чистоту границ зерен и, следовательно, гомогенность структуры.

Таким образом, разработан прецизионный литейный сплав инварного класса с низким ТКЛР, предназначенный для работы в интервалах температур 20–400, 20–450 и 20–500 °С.

Библиографический список

1. Захаров А. И., Перепелкина А. М., Ширяева А. Н. Влияние легирования на тепловое расширение сплава суперинвар // Металловедение и термич. обработка металлов. 1972. № 6. С. 62–64.

2. Пат. RU 2243281, С1 МПК<sup>7</sup> С 22 С 38/12. Литейный сплав на основе железа / Рабинович С. В., Харчук М. Д., Черменский В. И. и др. (РФ). Заявл. 29.12.2003, опубл. 27.12.2004, Бюл. № 36.