

*Рабинович С.В., Харчук М.Д., Черменский В.И.,  
Русин М.Ю.<sup>1</sup>  
ГОУ ВПО «Уральский государственный  
технический университет – УПИ»*

## ЛИТЕЙНЫЕ ИНВАРНЫЕ И СУПЕРИНВАРНЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Наиболее перспективными конструкционными материалами для изготовления сложно-профильных, крупногабаритных и согласованных по тепловому расширению с кварцевой керамикой деталей изделий наукоемкой техники являются суперинварные сплавы литейного назначения.

В Уральском государственном техническом университете (УГТУ – УПИ) на кафедре электронного машиностроения разработано более 25 новых литейных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). При разработке данных сплавов решены проблемы влияния внутрикристаллической ликвации компонентов на ТКЛР [1 – 3 и др.], устранения горячеломкости [4, 5], внедрения технологий выплавки и ряда способов литья [6 – 8].

Среди разработанных сплавов особое место по применению в изделиях высокой точности занимает суперинвар 32НКБЛ ТУ ВЗ-27-85 [7]. В последнее время совместно с Обнинским научно-производственным предприятием «Технология» выполнены исследования по усовершенствованию этого сплава с целью использования его в качестве материала некоторых уникальных деталей, работающих в условиях повышенных температур.

Современное состояние знаний по тепловому расширению инварных и суперинварных сплавов конструкционного назначения свидетельствует о невозможности их полного согласования по ТКЛР с кварцевой керамикой при температурах выше 373 К (100° С). Речь может идти лишь о приемлемом приближении к параметрам теплового расширения кварца в отдельно взятых температурных интервалах.

Одно из ключевых требований к показателям термостабильности металлических деталей, согласуемых по ТКЛР с кварцевой керамикой при температурах выше 373 К, заключается в том, чтобы материал этих деталей обладал значениями среднего ТКЛР в интервалах температур от комнатной до 573 К (300 °С) приблизительно в 1,5 – 2 раза меньшими, чем имеет суперинвар 32НКБЛ. Это соответствует получению значений ТКЛР на уровне  $1,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  в интервале температур от 20 до 200 °С и около  $3,0 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  в интервале от 20 до 300 °С.

<sup>1</sup> ФГУП «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», Киевское шоссе, 15, г. Обнинск Калужской обл., 249035, Россия; тел. (08439) 67210, E-mail: [npptechn@Kaluga.ru](mailto:npptechn@Kaluga.ru).

Понизить ТКЛР сплава 32НКБЛ в указанных интервалах температур можно путем увеличения в нем содержания кобальта до 6–8% при сохранении содержания никеля в количестве 31,5–33,0%. Однако, как нами было установлено, при таком повышении содержания кобальта снижается трещиностойкость сплава.

Увеличение содержания никеля свыше 33%, повышает ТКЛР сплава в интервалах температур 20 – 200 и 20 – 300 °С. Уменьшение содержания никеля ниже 31,5% опасно с точки зрения повышения температуры мартенситного превращения и существенного повышения ТКЛР при образовании мартенсита. Это связано со склонностью сплавов инварного класса к ликвации никеля к границам структурных элементов (ячеек, дендритов). Согласно данным наших прежних исследований [2] разность содержания никеля на границе и в центре структурных элементов сплавов в условиях реальных скоростей охлаждения отливок может достигать 5% по массе. В обедненных никелем центральных частях ячеек и дендритов могут появиться зоны, в которых при минусовых температурах выделяется  $\alpha$ -фаза (мартенсит).

Для предотвращения образования мартенсита и сохранения трещиностойкости, снижающейся при увеличении содержания кобальта, было осуществлено легирование сплава-прототипа хромом. Этот легирующий элемент уменьшает температуру мартенситного превращения [9, с. 219] и при этом, как нами установлено, повышает трещиностойкость исследованных литейных сплавов.

В разрабатываемых сплавах было изменено и содержание ниобия. В базовый сплав 32НКБЛ ниобий введен в количествах меньше предела его растворимости. Однако электронное зондирование показало, что ликвируя к границам структурных элементов ниобий может концентрироваться там в количествах, превышающих предел растворимости. Поскольку это ведет к появлению вторых фаз, содержание ниобия понизили до 0,3–0,5 % по массе.

Химические составы исследованных сплавов и значения ТКЛР приведены в описании [10]. В интервалах температур 20 – 200 и 20 – 300 °С были достигнуты средние значения ТКЛР  $(1,20 - 1,58) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  и  $(2,65 - 3,30) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  соответственно, что существенно ниже аналогичных значений ТКЛР сплава-прототипа 32НКБЛ:  $(2,0 - 2,6) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  и  $(5,1 - 6,0) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  соответственно.

На основе полученных результатов были выбраны два номинальных состава искомых сплавов. Первый – условная марка 32НКХБЛ – для использования в температурном интервале 20 – 200 °С и второй сплав – условная марка 32НКХБЛ-1, адресуемый для работы в интервале с более высокими температурами 20 – 300 °С.

В публикации [10] приведены химические составы и значения ТКЛР сплавов указанных марок. Сплав 32НКХБЛ-1 отличается по составу от сплава 32НКХБЛ лишь повышенным содержанием кобальта, что и обеспечивает сдвиг верхней границы температурного интервала инварности в область более высоких температур.

Были проведены испытания необходимых физико-механических и технологических, прежде всего, литейных свойств разработанных сплавов.

По физико-механическим свойствам новые сплавы в целом подобны базовому суперинвару 32НКБЛ [7]. Однако они имеют необходимое преимущество в отношении среднего ТКЛР в интервалах температур 20 – 200 °С (сплав 32НКХБЛ) и 20 – 300 °С (сплав 32НКХБЛ-1). Это свидетельствует о достижении поставленной цели исследования – разработать сплавы со средними значениями ТКЛР при повышенных температурах в 1,5 – 2 раза меньшими, чем имеет суперинвар 32НКБЛ.

Полученные сплавы применены для изготовления согласованных по ТКЛР с кварцевой керамикой деталей летательных аппаратов. При этом были разработаны режимы выплавки, литья и термообработки, обеспечившие необходимое сочетание ТКЛР и технологических свойств сплавов.

В научном отношении выполненная работа подтвердила перспективность подхода к созданию новых литейных инварных сплавов путем комплексного легирования, способного одновременно обеспечить заданные показатели инварности и уровень литейных свойств, достаточный для производства фасонных (сложно-профильных и крупногабаритных) отливок.

Экспериментальный раздел работы по выплавке, литью и термической обработке сплавов выполнен в цеховых условиях с участием и при финансовой поддержке научно-производственного предприятия «НПЦ «Линвар».

### Библиографический список

1. Сидоренко Р. А., Рабинович С. В., Харчук М. Д. Изучение особенностей кристаллизации сплава 32НКД // Изв.вузов. Черная металлургия. 1978. № 10. С. 144–147.
2. Рабинович С. В., Харчук М. Д., Черменский В. И. О влиянии микроликвации никеля на тепловое расширение литейных железоникелевых сплавов // Изв.вузов. Черная металлургия. 1994. № 10. С.29–32.
3. Огородникова О. М., Черменская Е. В., Рабинович С. В., Грачев С. В. // Температурный коэффициент линейного расширения литейных инваров Fe-Ni и суперинваров Fe-Ni-Co // ФММ. 1999. Т.88. № 4. С.46–50.
4. Патент РФ № 1096956. Сплав на основе железа / С. В. Рабинович, М. Д. Харчук, Р. А. Сидоренко и др.
5. Рабинович С. В., Сидоренко Р. А., Харчук М. Д., Иоффе А. Я. Литые детали из суперинвара для оптических приборов // Оптико-механическая промышленность. 1978. №11. С.49–51.

6. Рабинович С. В., Харчук М. Д., Черменский В. И., Сидоренко Р. А. Новые прецизионные литейные сплавы с заданным коэффициентом расширения // Литейное производство. 1994. №1. С.15-16.
7. ТУ ВЗ-27-85. Отливки из прецизионного сплава марки 32НКБЛ. Технические условия.
8. ТУ ВЗ-28-85. Отливки из прецизионного сплава марки 36НБЛ. Технические условия.
9. Прецизионные сплавы. Справ. изд. под ред. Б.В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983. 439 с.
10. Патент 2183228 РФ. Литейный сплав на основе железа / Рабинович С.В., Харчук М.Д., Черменский В.И. и др. // Оpubл. 10.06.2002. Бюлл. № 16.