

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЗМ С ВИСМУТОМ В СПЛАВАХ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

А.В. Рябов, С.А. Ерёмкин, Е.А. Трофимов

EXPERIMENTAL STUDY OF INTERACTION LANTHANIDES WITH BISMUTH IN THE NICKEL ALLOYS

A.V. Ryabov, S.A. Eremkin, E.A. Trofimov

Изучены результаты процесса взаимодействия РЗМ с висмутом в системах Ni–Pr–Bi, Ni–Nd–Bi, Ni–Dy–Bi и Ni–Er–Bi. Температуры плавления большинства образующихся интерметаллических соединений существенно превышают возможные температуры эксплуатации жаропрочных никелевых сплавов и, следовательно, не должны критически ухудшать свойства сплава.

Ключевые слова: никелевые сплавы, висмут, неодим, празеодим, диспрозий, эрбий.

The results of interaction lanthanides with bismuth in the Ni–Pr–Bi, Ni–Nd–Bi, Ni–Dy–Bi and Ni–Er–Bi systems are investigated. The melting points of most intermetallic compounds substantially exceed the potential operating temperature of heat-resistant nickel alloys. Therefore the intermetallic compounds should not degrade the properties of the alloy.

Keywords: nickel alloys, bismuth, neodymium, praseodymium, dysprosium, erbium.

В ходе исследования осуществлено изучение результатов процессов взаимодействия висмута в никелевом расплаве с рядом редкоземельных элементов (Pr, Er, Dy, Nd). Задачей исследования было, прежде всего, определение возможности связывания содержащегося в никеле висмута в тугоплавкие интерметаллические соединения с этими элементами.

Предметом исследования являлись слитки никелевых сплавов систем Ni–Pr–Bi, Ni–Nd–Bi, Ni–Dy–Bi и Ni–Er–Bi, выплавленные в индукционной плавильной установке УПИ-60-2 в алундовом тигле, помещенном в графитовый тигель. Для проведения экспериментов использовался чистый никель марки Н-0, висмут марки Ви00, а также чистые редкоземельные металлы (РЗМ): неодим, празеодим, диспрозий и эрбий.

Средний размер гранул никеля – 3...5 мм; редкоземельные элементы (неодим, празеодим, диспрозий и эрбий) и висмут подавались в виде стружки. В тигель укладывалось 10 г гранулированного никеля и 0,1 г висмута, после чего печь включали и выводили на полную мощность. По расплавлению никеля производилась присадка редкоземельных элементов. После минутной выдержки тигель вынимался из печи и охлаждался на воздухе.

Полученные слитки металла разрезались вдоль, поверхность разреза полировалась. Полированная поверхность исследовалась с целью определения качественного и количественного состава включений, образовавшихся в металле.

Состав включений изучался с помощью растрового электронного микроскопа с рентгеновским спектрометром JEOL JSM-6460LV по длине и сечению образцов при увеличениях 500...10 000 микрорентгеноспектральным методом.

На рис. 1 представлены микрофотографии висмутсодержащих включений по границам зерен никеля.

Для системы Ni–Pr–Bi анализ образцов подтвердил образование соединений висмута с празеодимом, которые располагались как по границам зерен в виде тонких полос, так и в виде круглых обособленных включений. Спектральный анализ показал наличие включений типа PrBi, Pr₄Bi₃, Pr₅Bi₃. Согласно диаграмме состояния этой системы, температуры плавления этих веществ лежат в интервале 1225...1800 °С.

В ходе анализа были выявлены и гетерогенные включения. На микрофотографиях отчетливо заметны две фазы, одна – соединение висмута и празеодима, другая – вероятно, соединение никеля и празеодима.

Изменение состава фаз в металле вдоль выделенной линии, проходящей через такое включение, демонстрирует микрофотография, представленная на рис. 2.

При добавке неодима в никель-висмутовый сплав распределение соединений висмута происходит также по границам зерен в виде тонких полос (на микрофотографии, изображенной на рис. 1, б, это полосы светлого цвета). При этом наблюдается меньшее количество обособленных округлых

включений. Однако встречаются и такие, причём некоторые из них также гетерогенны (рис. 3). В отличие от результатов опыта с празеодимом, где висмут полностью связывался, а остаток празеодима концентрировался на границе двухфазного включения, в этом образце имеются двухфазные включения, состоящие из соединения Bi и Nd и остатков висмута (в виде NiBi).

Из соединений, представленных на диаграмме состояния Bi–Nd, в образце, выплавленном в ходе эксперимента, были найдены включения NdBi и NdBi₂. NdBi₂ имеет температуру плавления около 1600 °С, а NdBi является еще более тугоплавким (плавится при температуре порядка 1900 °С).

Изучение образца с диспрозием показало следующую картину: в верхней части слитка наблю-

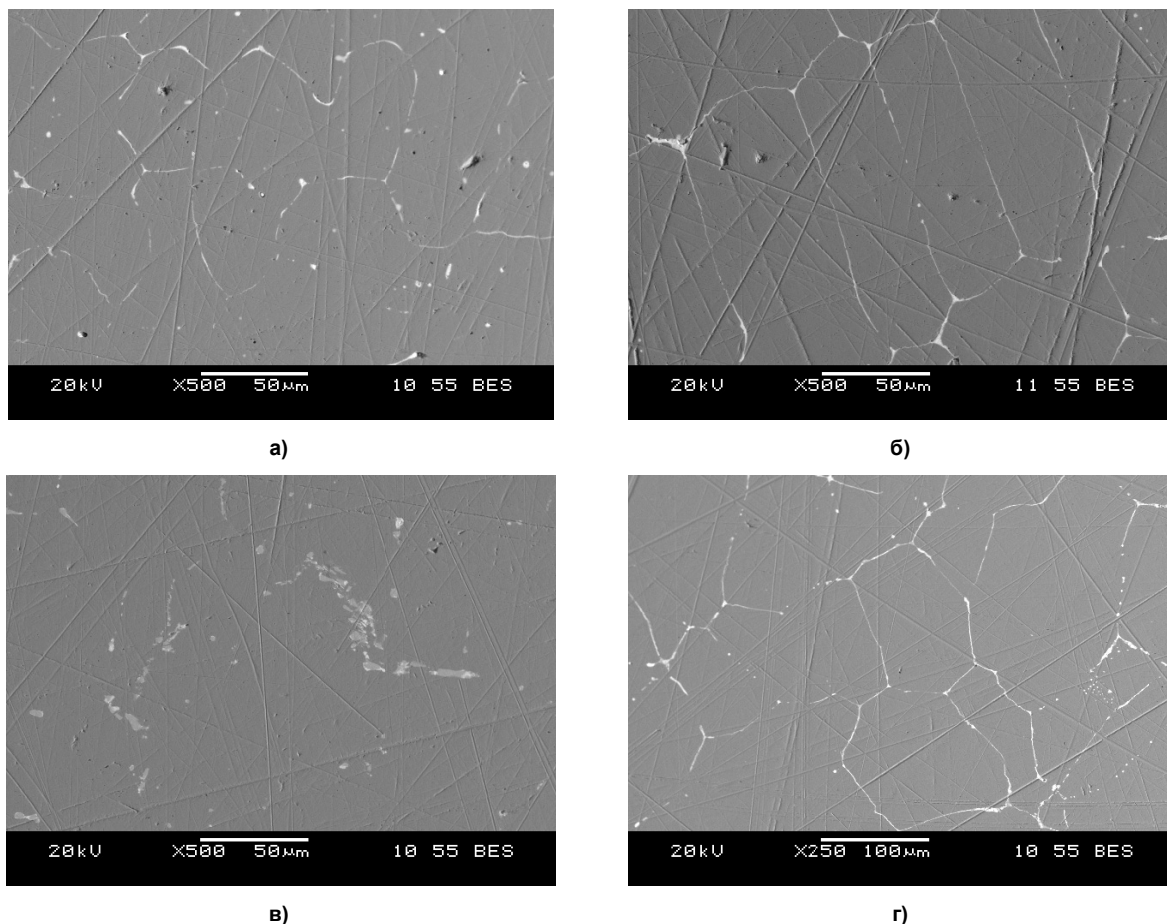


Рис. 1. Микрофотографии висмутсодержащих включений на границах зерен никеля: а – система Ni–Pr–Bi; б – система Ni–Nd–Bi; в – система Ni–Dy–Bi; г – система Ni–Er–Bi

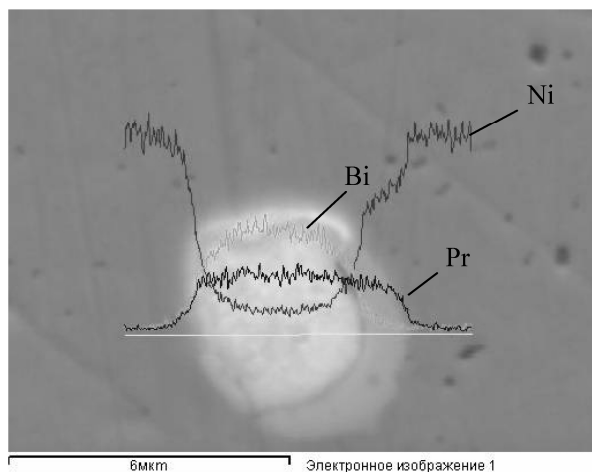


Рис. 2. Микрофотография двухфазного включения, относящегося к системе Ni–Pr–Bi, × 10 000

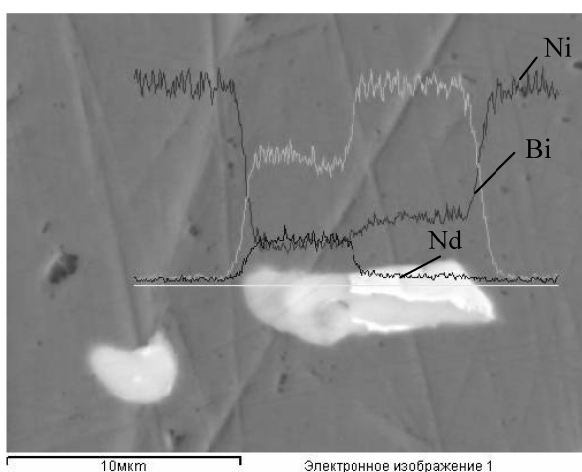


Рис. 3. Микрофотография двухфазного включения, относящегося к системе Ni–Nd–Bi, × 5000

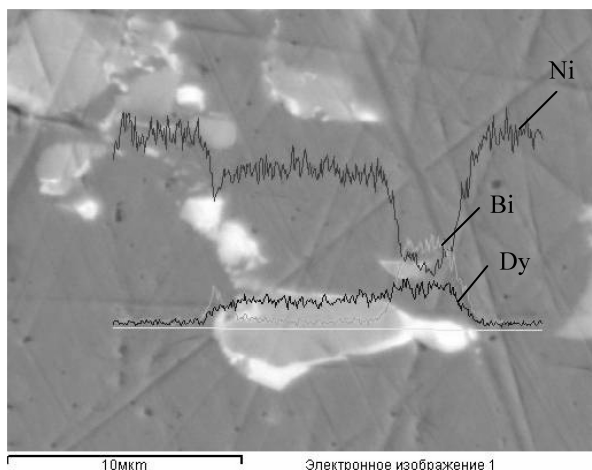


Рис. 4. Микрофотография включения, относящегося к системе Ni–Dy–Bi, × 5000

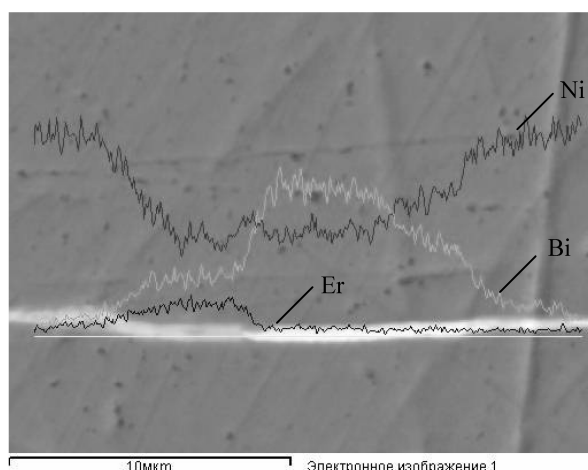


Рис. 5. Микрофотография включения, относящегося к системе Ni–Er–Bi, × 6000

далось большое скопление хаотично расположенных включений разной формы и размеров. Как правило, включения гетерогенные (рис. 1, в; 4). По мере продвижения к низу слитка включения становятся тоньше, и их распределение становится более равномерным.

Анализ показывает наличие включений типа DyBi, Dy₅Bi₃, а также соединения никеля с диспрозием Dy₂Ni₁₂. Предположительно, это соединение образуется при кристаллизации расплава при температуре ниже 1321 °С, а затем на границе образовавшихся включений, часто в виде оболочки, концентрируются DyBi и Dy₅Bi₃. Эти соединения тугоплавкие, имеют температуры плавления 2050 и 1515 °С соответственно.

Существенные отличия от других образцов показало изучение образца, выплавленного с добавкой эрбия. Микрофотография представлена на рис. 1, г. Наблюдаются очень четкие, тонкие прослойки на границах зерен сплава.

Полученные результаты свидетельствуют, что способность эрбия связывать висмут в соединения

существенно ниже по сравнению с другими изученными редкоземельными металлами. По этой причине несвязанный висмут реагирует с никелем и образует соединение NiBi. Это должно приводить к заметному снижению механических свойств никелевого сплава. Изменение состава включений по границе зерна вдоль выделенной линии представлено на рис. 5.

Таким образом, температуры плавления большинства обнаруженных в ходе исследования интерметаллических соединений существенно превышают возможные температуры эксплуатации жаропрочных никелевых сплавов и, следовательно, не будут подобно включениям NiBi, располагающимся по границам зерен никеля, критически ухудшать свойства сплава.

НИР проведена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также при поддержке РФФИ, гранты № 10-08-96033-р_урал_а и 11-08-12046-офи-м-2011.

Поступила в редакцию 31 августа 2011 г.