



# Влияние электромагнитного поля на свойства интерметаллидного Ni–Al-сплава

С.П. Конокотин

Н.С. Моисеева

Апрель 2011

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале *«Литейное производство»*, № 10, 2011 г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

## **Влияние электромагнитного поля на свойства интерметаллидного Ni–Al-сплава**

С.П. Конокотин, Н.С. Моисеева

*Всероссийский институт авиационных материалов*

*В статье рассматривается возможность повышения физико-механических свойств металла, находящегося в литейной керамической форме, методом электромагнитного воздействия в процессе его кристаллизации. Повышение механических свойств интерметаллидных сплавов позволит при их использовании решить комплекс проблем в разных областях техники.*

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, интерметаллидный сплав, вакуумно-индукционная установка, оболочковая форма.

*The article discusses the possibility of enhancing physical and mechanical properties of metal in a ceramic mold by the method of electromagnetic action during its crystallization. Enhancement of mechanical properties of intermetallide alloys will allow, when they are used, to resolve a complex of problems in various fields of engineering.*

**Key words:** electromagnetic field, intermetallide alloy, vacuum-induction unit, shell mold.

В статье рассматривается возможность повышения физико-механических свойств металла, находящегося в литейной керамической форме, методом электромагнитного воздействия в процессе его кристаллизации. Повышение механических свойств интерметаллидных сплавов позволит при их использовании решить комплекс проблем в разных областях техники.

Воздействие электромагнитного (ЭМ) поля на расплав металла (системы Ni–Al) в процессе его кристаллизации в литейной форме приводит к преимущественной направленности кристаллографической ориентации фаз, изменению их объемного состава, измельчению зерна и повышению физико-механических свойств.

Известно, что разработка новых жаропрочных литейных сплавов с высокими физико-механическими свойствами включает в себя выбор и оптимизацию их химсостава, методы их выплавки и кристаллизации. Известны также способы повышения механических свойств металла (слитков и полуфабрикатов) за счет измельчения его литой структуры, очищения ее от механических и газовых примесей с помощью различных методов ЭМ-воздействия на процесс кристаллизации металла. В работе в качестве такого устройства применяли цилиндрический, однополюсный ЭМ-индуктор (для создания однородного поля), питающийся переменным трехфазным током промышленной частоты, который, воздействуя на металл в процессе его кристаллизации, влиял на формирование его структуры и повышал свойства литого сплава.

Свойства сплава Ni–16% Al исследовали на литых цилиндрических образцах, полученных методом кристаллизации с ЭМ-обработкой (ЭМО). Сплав выплавляли в вакуумно-индукционной установке типа УППФ, в керамическом набивном тигле (из оксида алюминия) с заливкой в оболочковую форму с дождевой системой заливки\*. Плавку вели в вакууме, при  $p_{\text{ост}}=0,6-0,8$  Па. Температура формы в момент заливки составляла 550–600°C, а металла – 1590–1610°C.

Индукцию магнитного поля в рабочем объеме индуктора (при наличии в нем охлаждаемого корпуса) измеряли датчиком Холла. Время воздействия индукции магнитного поля величиной  $B=15-16 \cdot 10^{-3}$  Тл на процесс кристаллизации расплава металла в форме определяли методом расчета.

---

\* Конокотин С.П. Влияние электромагнитного поля на физико-механические свойства литого хрома. // Литейное производство. – 2011. – №7. – с. 15–18.

Время ЭМО расплава в процессе кристаллизации определяли по наиболее металлоемкой части отливки – заливочной чаше. Так как температура расплава перед заливкой в форму превышала температуру плавления на  $\sim 110$  К, время на его охлаждение, при удельной теплоемкости расплава  $c_p \approx 0,655$  Дж/г·К,  $\Delta t = 110$  К и температуре расплава  $T_p \approx 1600^\circ\text{C}$  (1873 К), составило 3,6 мин, а общее время воздействия ЭМ-поля на металл  $\tau_{\text{общ}} = \tau_1 + \tau_2 = 6,4 + 3,6 = 10$  мин. Большая длительность ЭМО металла значительного эффекта не давала, поскольку процесс протекал в интервале кристаллизации.

Микроструктуру образцов исследовали на микроскопе «Olympus». Микрошлифы изготавливали из поперечного сечения литых заготовок образцов, взятых из средней части. Преимущественную ориентацию кристаллической решетки (КР) определяли на дифрактометре ДРОН-4, твердость – на образцах поперечного сечения, взятых из верхней, средней и нижней части цилиндрической заготовки ( $\varnothing 15,5$  мм и длиной  $l = 170$  мм), на твердомере ТК-2М. Проводили также сравнительный анализ ударной вязкости литых образцов  $\varnothing 15,5$  мм и длиной  $l = 80$  мм.

Известно, что в результате процесса кристаллизации металла КР его атомов переходит в наиболее устойчивое энергетическое состояние. Происходит образование и рост зерен, размеры и форма которых различны. При этом различна и ориентация их КР в пространстве. При воздействии внешнего ЭМ-поля на расплав в процессе кристаллизации магнитные моменты атомов выстраиваются в ориентировано-устойчивом направлении, которое диктуется типом КР металла. Такой процесс кристаллизации, возможно, наиболее благоприятен для снижения внутренних напряжений в отливке.

Рентгеноструктурное исследование литых образцов, полученных методом кристаллизации с ЭМО, выявило преимущественное направление кристаллографической ориентации  $\gamma'$ -фазы –  $[111]+[113]$  и  $\beta$ -фазы –  $[101]$ , совпадающее с осью образцов (рис. 1).

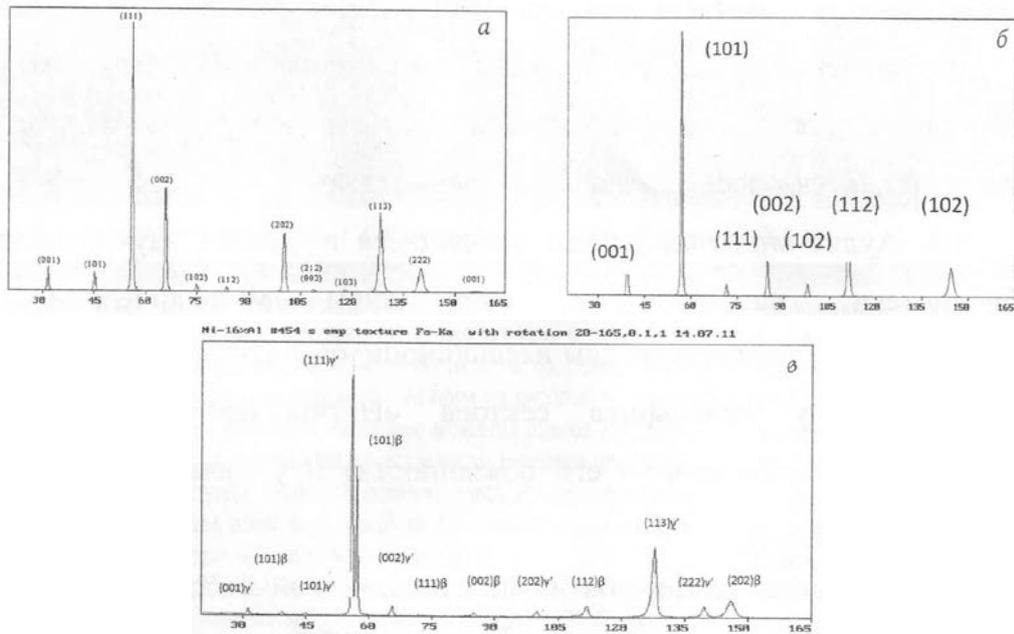


Рисунок 1. Рентгенограмма порошка-эталоны:  $\gamma'$ -фазы  $\text{Ni}_3\text{Al}$  (а),  $\beta$ -фазы  $\text{NiAl}$  (б); образца Ni–16% Al с ЭМО. Fe- $K_\alpha$ -излучение

Рентгеноструктурный анализ образцов без ЭМО показал, что объемное соотношение состава фаз составляет  $W_{\gamma'}/W_{\beta} \approx 1,55$  (рис. 2, а), а образцов с ЭМО –  $W_{\gamma'}/W_{\beta} \approx 3,90$  (рис. 3, б), из чего следует, что уменьшение объемной доли хрупкой  $\beta$ -фазы в сплаве способствует снижению его хладноломкости при комнатной температуре.

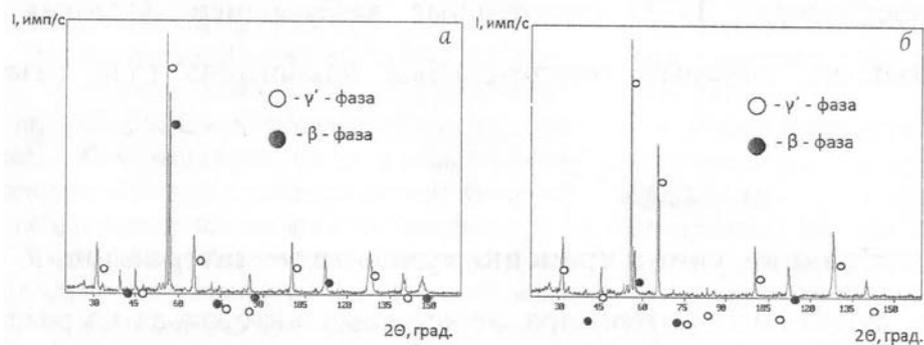


Рисунок 2. Рентгенограммы порошка образцов сплава Ni–16% Al: а – без ЭМО, б – с ЭМО. Fe- $K_\alpha$ -излучение

Такое изменение фазового состава, возможно, связано с эффектом магнитоупругости. Воздействие магнитного поля на кристаллизующийся сплав вызывает колебания в решетках фаз и поворот их микрообъемов вдоль или перпендикулярно силовым линиям внешнего магнитного поля (в зависимости от магнитной природы фаз). Эти колебания и пластическая деформация

приводят к частичному разрушению КР  $\beta$ -фазы. В связи с тем, что ОЦК решетка  $\beta$ -фазы менее плотноупакованная, чем ГЦК решетка  $\gamma'$ -фазы, то в результате происходит фазовое смещение в сторону образования  $\gamma'$ -фазы с более высокой степенью упаковки атомов в элементарной ячейке.

Исследование микроструктур литых образцов сплава без ЭМО показало, что длина зерна 1300–1700 мкм, а его ширина – 540–780 мкм (рис. 3, *а, б*). Образцы, полученные с ЭМО, имели измельченную и более однородную структуру с размером зерна 300–550 мкм (рис. 3, *в, г*). Изменение литой структуры сплава с ЭМО можно отнести за счет дробления вторичных ветвей дендритов благодаря перемешиванию расплава в зоне интервала кристаллизации.

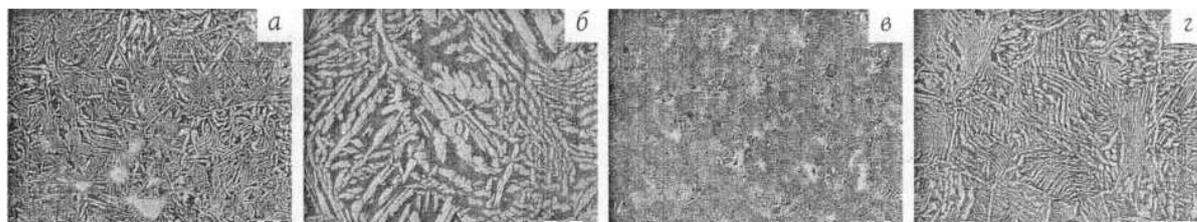


Рисунок 3. Микроструктура сплава Ni–16% Al:  
*а, б* – без ЭМО, *в, г* – с ЭМО;  $\times 50$  (*а, в*) и  $\times 200$  (*б, г*)

Сравнительный анализ микроструктуры образцов сплава Ni–16% Al без ЭМО и с ЭМО показал различие в характере распределения и размере пластин  $\gamma'$ -фазы. Такое формирование фаз, возможно, и ведет к изменению твердости сплава. В образцах без ЭМО это 25,7–26,2, а с ЭМО – 32,8–33,2 HRC, где  $\gamma'$ -фаза значительно измельчена, по сравнению с образцами сплава без ЭМО.

Литые цилиндрические образцы ( $\varnothing 15,5$  мм и  $l=80$  мм) исследуемого сплава без ЭМО имели ударную вязкость 26,5–28,4, а с ЭМО – 39,7–44,1 Дж/см<sup>2</sup>. Повышение ударной вязкости, возможно, связано с преимущественным направлением кристаллографической ориентации фаз, изменением их объемного состава, измельчением зерна и т.д.

В результате исследований образцов сплава Ni–16% Al, подвергнутого ЭМО в процессе кристаллизации, выявлено:

– наличие преимущественного направления кристаллографической ориентации  $\gamma'$ -(Ni<sub>3</sub>Al) фазы – [111]+[113] и  $\beta$ -(NiAl) фазы – [101], совпадающего с осью литых цилиндрических образцов (расположенных вдоль ЭМ поля);

- уменьшение объемной доли хрупкой  $\beta$ -фазы в ~2,5 раза;
- измельчение структуры литого металла в ~2,5 раза и ее упорядочение;
- повышение: твердости в ~1,25 раза; ударной вязкости в ~1,5 раза;
- возможность использования керамической формы с меньшим числом слоев (шесть вместо восьми).

Метод ЭМО позволяет воздействовать на сплавы как с низкой, так и с более высокой температурой плавления, чем современные жаропрочные Ni-сплавы.

Применение ЭМО для сплавов системы Ni–Al позволит снизить их хладноломкость и использовать для производства литых деталей, работающих в газотурбинных двигателях и других высокотемпературных агрегатах. Наличие высокой жаростойкости, жаропрочности, низкой плотности ( $\gamma < 7,8 \text{ г/см}^3$ ) и температуры плавления  $> 1400^\circ\text{C}$  позволит им успешно конкурировать с современными жаропрочными Ni-сплавами, обладающими более высокой плотностью ( $\gamma = 8,1\text{--}9,5 \text{ г/см}^3$ ) и температурой плавления до  $1350^\circ\text{C}$ , обеспечив при этом высокий экономический эффект.