

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОСОБЕННОСТЕЙ
ТЕРМОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВА ЮНДК35Т5,
МИКРОЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ**

В. Х. ДАММЕР, Е. М. БУТКЕВИЧ

(Представлена проф. А. Н. Добровидовым)

Сплав ЮНДК35Т5, ГОСТ 9575-60 (35% Co, 15% Ni, 8% Al, 5% Ti, 4% Cu, Fe — остальное), обладает высокой коэрцитивной силой, остаточной индукцией и находит широкое применение в радиоэлектронике и специальном машиностроении. Постоянные магниты из этого сплава в связи с его высокой хрупкостью изготавливаются только в виде фасонных отливок с последующим шлифованием. При этом в процессе шлифования даже при малых подачах наблюдаются сколы кромок магнитов и выкрашивание отдельных зерен. Для улучшения шлифуемости применяется дополнительное легирование сплава такими компонентами как S, Se, Ca, V и другие. Однако в большинстве случаев указанные легирующие добавки значительно снижают магнитные свойства сплава, что ограничивает их применение.

В настоящей работе исследовались механические и магнитные свойства сплава ЮНДК35Т5, дополнительно легированного бором (0,003 ÷ 0,8%).

Сплавы для исследования выплавлялись в высокочастотной печи в набивных тиглях из электрокорунда емкостью от 3 до 15 кг, спеченных графитовым шаблоном. Плавки проводились под криолитом. Последним из шихтовых материалов вводился бор в виде лигатуры железо — бор или фторбората калия (KBF₄).

Как известно (1), термообработка сплава ЮНДК35Т5 связана с нагревом до температуры, при которой сплав имеет структуру твердого раствора с последующим охлаждением в магнитном поле с регулируемой скоростью. При этом в верхнем интервале температур (1200 ÷ 900°C) образцы охлаждаются со скоростью более 100°/мин во избежание высокотемпературного γ -распада, а в нижнем интервале (850—700°C) скорость охлаждения составляет 20 ÷ 40°/мин.

Ряд авторов [1, 2] рекомендует применение дополнительных изотермических выдержек в области 800 ÷ 700°C для более полного прохождения β — β_2 -распада, формирующего высокие магнитные свойства. После термомагнитной обработки образцы обычно подвергаются многоступенчатому отпуску, повышающему коэрцитивную силу при некотором снижении остаточной индукции.

Дополнительное легирование сплава ЮНДК35Т5 бором определенным образом меняет его структуру и свойства.

При исследовании микроструктуры литых образцов опытных плавок на нетравленном шлифе наблюдаются включения, количество которых зависит от содержания бора в сплаве. Микротвердость отдельных включений лежит в пределах от 1200 до 2900 кг/мм².

Высокая твердость включений, характерное расположение в области границ зерен и прямая зависимость от содержания бора позволяют считать, что эти включения являются простыми или комплексными боридами на основе Fe, Al, Ti. Рентгеноструктурный анализ также подтверждает наличие боридов типа FeB, TiB₂, AlB₁₂. На образцах после литья при содержании бора свыше 0,06% после травления наблюдаются выделения второй фазы в основном по границам зерен, а при содержании бора свыше 0,1% — и внутри зерен. В отличие от высокотемпературной γ -фазы наблюдаемая вторая фаза не имеет характерного игольчатого строения, количество ее при выдержке в области температур наиболее интенсивного γ -распада (1100 ÷ 1150°C) не возрастает, а при выдержках в области температур свыше 1220°C, достаточных для полного растворения γ -фазы, исследуемая фаза не исчезает. По всей вероятности, наблюдаемая фаза является боридной эвтектикой.

Опыт показал, что при введении в сплав ЮНДК35Т5 более 0,08% бора образуется сплошная сетка боридной эвтектики. При этом температура начала оплавления образцов снижается с 1260°C (без бора) до 1230°C (0,08% бора).

В работе проведено исследование зависимости твердости сплава от концентрации бора. Испытания проводились двумя способами: твердость образцов измерялась на приборе Виккерса при нагрузке 20 кг и микротвердость зерна и отдельных фаз на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г. Для выравнивания структуры образцы были предварительно отожжены при 1220°C в течение двух часов. Как и следовало ожидать, твердость, измеренная на приборе Виккерса (650 ÷ 690 кг/мм²), получилась средней между микротвердостью зерна (700 ÷ 780 кг/мм²) и боридной фазы (490 ÷ 700 кг/мм²), расположенной по границам.

Для определения влияния бора на магнитные свойства образцы опытных плавок подвергались стандартной для сплава ЮНДК35Т5 термомагнитной обработке по режиму: нагрев до 1220°C, выдержка 20 ÷ 30 мин, охлаждение на воздухе (300 ÷ 350°/мин) до 850 ÷ 840°C и далее в специальной камере со скоростью 20 ÷ 30°/мин в магнитном поле до 600°C. После закалки образцы подвергались отпуску при 640°C в течение 4 ÷ 6 часов. Магнитные свойства находятся в пределах ГОСТа 9575—60 при содержании бора до 0,1% и резко снижаются при дальнейшем увеличении концентрации бора.

В большинстве опытов термомагнитная обработка проводилась по двухступенчатому режиму, включающему закалку образцов в масле с температуры 1220 ÷ 1240°C для фиксации твердого раствора и последующий повторный нагрев для термообработки в специальной печи-камере с наложением магнитного поля. Наиболее высокие магнитные свойства получены при следующем режиме термообработки: нагрев до 840°C, выдержка — 3 мин, охлаждение со скоростью 30°/мин до 800°C, выдержка 800°C—10 мин, охлаждение до 750°C, выдержка 750°C—20 мин, охлаждение до 600°C и далее на воздухе. Образцы, обработанные по такому режиму, после дополнительного отпуска при 640°C в течение 6 часов и при 550°C в течение 20 часов имели магнитные свойства ($B_r=0,8$ тл, $H_c=124$ ка/м), значительно превышающие ГОСТ 9575—60. На рис. 1 показана зависимость остаточной индукции и коэрцитивной силы от концентрации бора в сплаве.

Исследовалось также влияние на магнитные свойства температуры нагрева под закалку. Был выбран интервал температур от 1180 до 1240°C. Низкий уровень магнитных свойств при температуре нагрева 1180°C

Таблица 1

№ плавки	Расчетное содержание бора, %	Подача на врезание, мм/проход	Наличие сколов кромок и выкрашивания	Способ введения бора
130	0,007	0,05	нет	Фторборат калия
		0,075	"	
		0,1	"	
		0,125	есть	
		0,15	"	
		0,20	"	
134	0,008	0,05	нет	Фторборат калия
		0,075	"	
		0,1	"	
		0,125	"	
		0,15	есть	
		0,20	"	
135	0,05	0,05	нет	Ферробор
		0,075	"	
		0,1	"	
		0,125	"	
		0,15	"	
		0,20	"	
127	0,08	0,05	нет	Ферробор
		0,1	"	
		0,15	"	
		0,2	"	
		0,3	"	

объясняется наличием в структуре γ -фазы, что подтверждается металлографическим анализом. Температура 1220°C, по-видимому, также не является достаточной, так как повышение температуры до 1240°C на образцах плавки 132 обеспечило прирост магнитных свойств. В связи с возможным оплавлением образцов при более высокой температуре нагрева оптимальной температурой для образцов с содержанием бора от 0,003 до 0,008% следует считать 1230 ÷ 1240°C.

Как отмечалось выше, сплав ЮНДК35Т5 обладает очень низкой обрабатываемостью. Согласно ГОСТу 9575—60, подача на врезание при черновой механической обработке должна быть не более 0,05 мм/проход. Окончательная шлифовка должна производиться с подачей на врезание,

равной 0,01 мм/проход. В проведенной работе образцы шлифовались как в литом состоянии, так и после термомагнитной обработки. Испытания проводились на плоскошлифовальном станке ЗГ71, абразивным кругом марки СМ, зернистостью 46, по режиму: скорость круга—30 м/сек, скорость стола — 15 м/мин. Результаты испытаний представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, увеличение концентрации бора от 0,007 до 0,08% значительно улучшило шлифуемость.

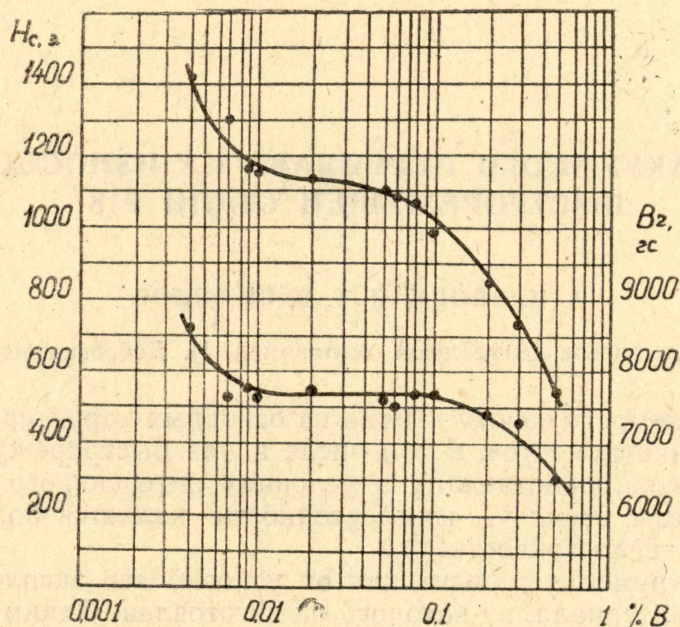


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы и остаточной индукции сплава ЮНДК35Т5 от концентрации бора

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Исследовано влияние малых добавок бора, вводимого в количестве от 0,003 до 0,8%, на шлифуемость и магнитные свойства сплава ЮНДК35Т5.

2. Определен интервал концентрации бора от 0,003 до 0,01%, в котором без снижения магнитных свойств обрабатываемость улучшилась в 2—3 раза.

3. Экспериментально разработана термомагнитная обработка сплава ЮНДК35Т5, легированного бором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. М. Довгалевский. Литые магниты из сплавов магнито. М., изд. Машиностроение, 1964.
2. А. А. Шекалов. Новые сплавы для литых постоянных магнитов. Л., серия «Металловедение и термообработка», вып. 3, ЛДНТП, 1963.