

УДК 621.318.12; 621.74

doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-22-28

Повышение качества магнитов из сплава ЮНДКТ5БА на этапе литья их заготовок

П.А. Головкин

АО «Плутон»

Improving the quality of magnets made of the Fe-Al-Ni-Co alloy at their workpiece casting

P.A. Golovkin

JSC Pluton

На основе металлографического анализа материала магнитов из сплава ЮНДКТ5БА установлено, что чрезмерный перегрев расплава перед разливкой снижает целевые характеристики изделия ввиду образования различных внутренних дефектов. Показано, что недопустимо высокие химическая неоднородность и внутренние напряжения приводят к образованию в материале отливок трещин и к разрушению столбчатых зерен, ухудшая рабочие характеристики готовых магнитов. Установлено, что превышение рекомендованного содержания серы не способствует получению повышенных магнитных свойств вследствие формирования столбчатой направленной структуры материала, а, наоборот, ухудшает их ввиду образования препятствующих направленному прохождению магнитных изолиний многочисленных сульфидных включений.

Ключевые слова: материал магнитов, перегрев расплава, направленная кристаллизация, магнитные свойства, химическая неоднородность, трещины напряжения

Metallographic analysis of the magnet material made from the Fe-Al-Ni-Co made it possible to determine that melt excessive overheating before casting reduced the product target characteristics due to formation of various internal defects. Inaccessibility was shown of high microchemical inhomogeneity and internal stresses that led to formation of cracks in the casting material and destruction of the columnar grains deteriorating the finished magnets performance.

Keywords: magnet material, melt overheating, directional crystallization, magnetic properties, microchemical inhomogeneity, stress cracks

Особенностью магнитотвердого литейного сплава ЮНДКТ5БА является широкий допуск массового содержания как основных входящих в его состав компонентов (кобальта, никеля, алюминия, меди), так и специальных легирующих добавок. Допускается добавление серы, кремния, церия и других веществ в количестве до 1% каждого без снижения магнитных свойств получаемых магнитов и магнитных систем, характеристики которых определяет ГОСТ 25639–83 [1].

Химический состав сплава ЮНДКТ5БА и других сплавов типа альнико приведен в таблице [2]. В обозначении сплавов буквы имеют следующее значение: Ю — алюминий; Н — никель; Д — медь; К — кобальт; Б — ниобий; А — столбчатая кристаллическая анизотропия; Т — титан.

Температуру расплава в тигле измеряют вольфрамомолибденовыми погружными термометрами, а температуру расплава в разливочном ковше — оптическим пирометром. Для

Химический состав сплавов типа альнико

Химический элемент	Содержание, % масс, в сплаве			
	ЮНДК	ЮНДКБА	ЮНДКТ5	ЮНДК5ТБА
Алюминий	7,5...7,0	7,5...8,7	6,5...8,2	6,5...7,5
Никель	12,5...15,5	12,5...15,0	14,0...16,5	13,5...14,5
Медь	2,0...3,5	3,0...4,5	3,0...4,0	3,0...4,0
Кобальт	23,5...25,0	24,0...26,0	34,0...35,5	34,5...35,5
Титан	0,15...0,50	≤ 0,3	4,5...5,5	4,0...5,5
Ниобий	–	≤ 0,15	≤ 1,1	≤ 1,2
Кремний	≤ 1,5	≤ 0,6	–	–
Сера	≤ 1,0			
Церий	≤ 1,0			
Железо	Остальное			

проверки магнитных параметров готовых изделий используют измерительную оснастку, отвечающую требованиям ГОСТ 8.268–77 [3], а для измерения магнитной индукции — приборы УШ-8 и У-10.

Современное состояние вопроса и исследовательская часть. По сравнению с другими сплавами типа альнико сплав ЮНДКТ5 (ЮНДК35Т5БА) имеет более высокие магнитные свойства на единицу массы, но ухудшенные вследствие этого прочностные свойства и склонность к хрупкому разрушению [4]. Кроме того, при прочих равных условиях максимально достигаемая длина зоны направленной кристаллизации в отливках из сплава ЮНДКТ5БА составляет 60...70 мм (из сплава ЮНДКБА — 80 мм) [5], если отношение длины их эффективной части к ее диаметру не превышает 6/1 [6].

Последнее обстоятельство делает заманчивым повышение температуры перегрева расплава при его разливе в формы. Так, предприятие п/я Р-6927 [6] рекомендует проводить разливу при температуре 1720...1750 °С, причем время кристаллизации металла в форме составляет около 20 мин. Тогда при интервале кристаллизации сплава 1480...1450 °С перегрев расплава составляет 240...300 °С, но это значение не является наибольшим среди указанных в литературных источниках.

Напротив, документация п/я А-1903 [5] для достижения необходимого градиента температур на поверхности раздела расплава и поверхности водоохлаждаемой медной плиты (холо-

дильника) предписывает выполнять разливу с нагрева не менее чем 1780...1800 °С, когда его перегрев достигает 300...350 °С.

Однако существует и другая точка зрения на установление температуры разлива расплава. Так, в патенте [7] рекомендовано проводить разливу при температуре 1570 °С, в то время как температура ликвидуса сплава находится в пределах 1420...1440 °С [8], и перегрев составляет 90...120 °С.

В работе [4] рекомендован следующий порядок введения шихты в расплав при его открытой плавке в тигельных индукционных печах. На дно тигля помещают кобальт, железо укладывают ближе к стенкам тигля поперечно магнитным силовым линиям, благодаря чему оно быстрее расплавляется. Никелем уплотняют всю шихту. После расплавления материалов добавляют медь, а при температуре не менее 1550 °С — подаваемый в качестве модификатора и стабилизатора йодидный титан.

После отключения печи в расплав вводят кусковой алюминий, при этом температура расплава должна составлять 1460...1520 °С и быть тем выше, чем относительно больше алюминия загружают. Печь снова включают и разогревают сплав исходя из того, что температура выпускаемого из разливочного ковша металла для получения среднего размера отливок должна составлять 1540...1600 °С [4], как это рекомендовано в патенте [7]. Следует отметить, что, перелив расплава в промежуточный ковш выполняет ту же роль, что и подстуживание [9], помогая вытеснению из расплава растворенных в нем газов и различных примесей.

В работе [7] отмечено, что содержание серы (как способствующего образованию столбчатых кристаллитов модификатора) должно составлять 0,2...0,3 % по массе шихты, а в других публикациях — 0,15 % [8]. Сера следует добавлять примерно за 10 мин перед разливкой для получения наибольшей химической однородности расплава и малого газосодержания в нем [7].

В статье [10] указано, что температура заливки выше 1750 °С вызывает рост газообразования и интерметаллидных фаз, ухудшая свойства магнитов. Опыт АО «Плутон» также показывает, что чрезмерный перегрев снижает качество получаемых магнитов. Так, при нагреве под разливку до 1780 °С и более струя сливаемого металла разрывается и начинает «стрелять» тем больше, чем выше температура разливки.

Как следствие, в отливках имеют место показанные на рис. 1 пленки и горячие трещины. Материал отливок ввиду нестабильных условий разливки и кристаллизации расплава характеризуется существенной химической неоднородностью с образованием эвтектических прослоек и высоким уровнем напряжений, вызывающих появление холодных трещин напряжения (рис. 2).

Вводимая в расплав сера существенно расширяет температурный промежуток между его ликвидусом и солидусом, чем улучшает его литейные свойства и качество получаемых заготовок. Также сера способствует столбчатому росту кристаллитов, поскольку образующиеся сульфиды титана кристаллизуются на окислах и нитридах титана, как на зародышах, тем самым

нейтрализуя их действие как центров кристаллизации [4].

Однако при превышении рекомендуемого содержания серы в материале заготовок наблюдается снижение магнитных свойств получаемых изделий, что объясняется образованием избыточного количества включений — сульфидов титана [4].

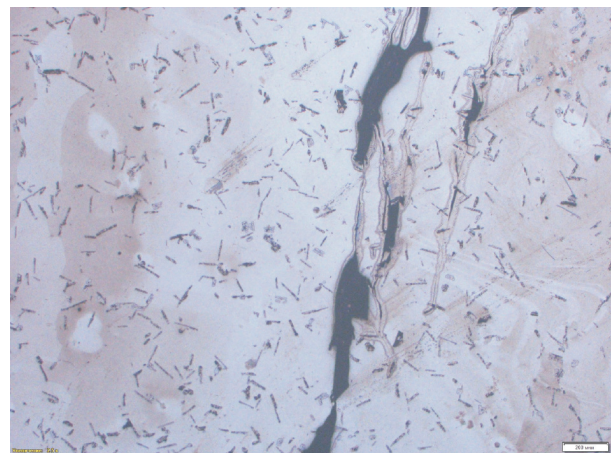
Как видно из рис. 1 и 2, пленки, эвтектические прослойки и трещины напряжения соседствуют с многочисленными сульфидными включениями, которыми буквально насыщен материал отливок. Это значит, что чрезмерное введение в расплав серы на фоне его перегрева дополнительно снижает прочность отливки и не только не способствует повышению магнитных характеристик получаемых изделий, но и ухудшает их, так как многие сульфидные включения становятся на пути прохождения магнитных изолиний.

В магнитных сплавах с титаном эффективным является введение 0,05...0,06 % углерода [5], позитивное действие которого на образование столбчатой структуры объясняют тем, что он нейтрализует окислы, которые могут стать центрами кристаллизации. Так как механизмы влияния серы и углерода на структуру отливок различаются, эти химические элементы следует вводить в расплав совместно [5].

Проведенные с учетом изложенного плавки показали, что для безопасного (без «стрельбы») разлива расплава при подаче в промежуточный ковш его температура не должна превышать 1720...1740 °С, но и она слишком велика для получения отливки без образования плен у ее



а



б

Рис. 1. Микроструктура литой заготовки с пленками при сильном перегреве расплава вблизи ее поверхности с увеличением $\times 50$ (а) и в глубине ее поверхности после травления с увеличением $\times 100$ (б)

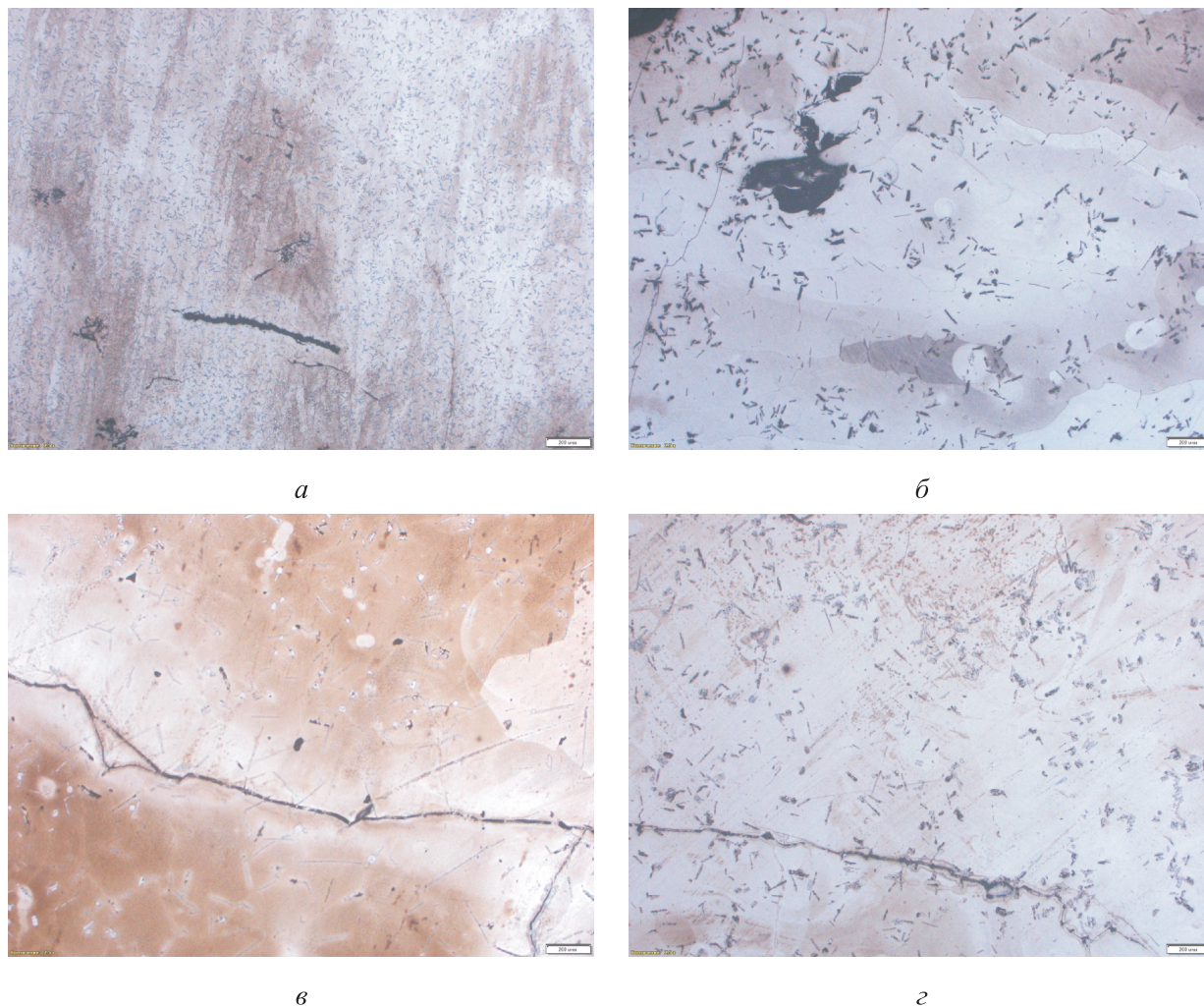


Рис. 2. Микроструктура литой заготовки с эвтектическими прослойками (а, б) и трещинами напряжения (в, г) при сильном перегреве расплава до (а, в) и после травления (б, г) при увеличении $\times 100$

поверхности и эвтектических включений в ее глубине. Для получения качественной структуры материала температура его разливки в формы не должна превышать $1650\dots 1680\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В этом случае достигается качественная столбчатая структура материала литых заготовок, без трещин, литьевых плен и эвтектических прослоек, примеры которой показаны на рис. 3, а и б. В донной части отливки, ближе к холодильнику, поперечное сечение зерна несколько меньше, а по мере отдаления от него и уменьшения теплоотвода в направлении холодильника оно возрастает.

Если из отливки изготавливают несколько небольших магнитов, то есть смысл дополнительно снизить температуру расплава перед разливкой, как это рекомендовано в справочнике [4]. Такое технологическое решение совершенствует структуру материала отливки и

на фоне уменьшения достигаемых размеров зерен повышает магнитные свойства конечного изделия.

На необходимость ограничения температуры перегрева расплава указывают и другие исследователи. Так, в работе [11] отмечено хорошее качество материалов отливок, полученных разливкой из промежуточного ковша, начиная с температуры $1520\dots 1550\text{ }^{\circ}\text{C}$, что всего на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем у ликвидуса сплава (около $1420\dots 1440\text{ }^{\circ}\text{C}$) [8].

В этом случае получение качественной структуры отливок благодаря отсутствию на пути магнитных изолиний различных дефектов и примесей возмещает некоторое условное снижение целевых магнитных свойств, которое могло бы произойти ввиду сокращения разброса температур подаваемого в литьевую форму расплава и обеспечивающего теплоотвод мед-

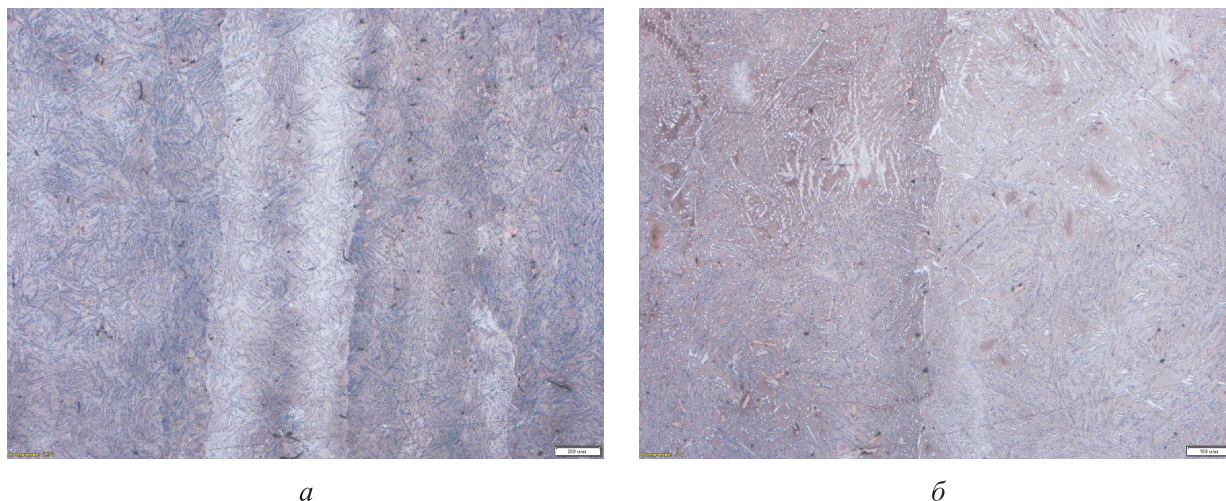


Рис. 3. Качественная столбчатая структура материала литых заготовок ближе к донной части отливки (а) и в отделении от нее (б) при увеличении $\times 100$

ного холодильника. Кроме того, уменьшение перегрева расплава уменьшает расхождение целевых и технологических свойств заготовок, отлитых за один проход ковша от формы к форме.

Измерения магнитной индукции показали, что на фоне насыщенности материала отливок дефектами падение целевых показателей изделий при перегреве исходного для их приготовления расплава до $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигает $10\text{...}12\%$ относительно таковых, полученных из расплава с перегревом до $1680\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удержание количества серы на достаточном для ограничения центров его кристаллизации нижнем пределе также способствует качественной структуре и высоким магнитным свойствам изделий, дополнительно улучшая их на $2\text{...}3\%$.

Выводы

1. Избыточный перегрев расплава становится причиной падения свойств магнитов и магнитных систем из литейного сплава ЮНДКТ5БА ввиду образования в материале заготовок трещин напряжения и литевых плен, которые становятся препятствием на пути магнитных изолиний. При этом формально достигаемые размеры вытянутых при направ-

ленной кристаллизации зерен не обеспечивают расчетных характеристик получаемых изделий.

2. Разогрев расплава до температур более $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к разрыву струи при его переливе в промежуточный ковш и ее «стрельбе». Температура расплава при его переливе в промежуточный ковш не должна превышать $1680\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда в момент заливки в литевые формы его температура будет составлять не более $1520\text{...}1550\text{ }^{\circ}\text{C}$, что всего на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем температура ликвидуса сплава ЮНДКТ5БА.

3. Получение литых заготовок с минимальным перегревом расплава дает повышение их целевых характеристик на $10\text{...}12\%$ относительно таковых для заготовок, полученных разливкой расплава с температурой до $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Несмотря на уменьшение абсолютного размера зерна в отливках, улучшение качества их материала повышает целевые характеристики изготавливаемых магнитов и магнитных систем.

4. Содержание серы в материале отливок не должно превышать $0,15\text{...}0,20\%$ по массе. При повышении содержания серы сульфидные включения становятся на пути распространения магнитных изолиний, что понижает магнитные характеристики изделий. Ограничение содержания серы при прочих равных условиях улучшает их целевые характеристики на $2\text{...}3\%$.

Литература

- [1] ГОСТ 25639–83. *Магниты литые постоянные. Технические условия*. Москва, Издательство стандартов, 1987. 35 с.
- [2] ГОСТ 17809–72. *Материалы магнитотвердые литые. Марки*. Москва, Издательство стандартов, 2001. 6 с.

- [3] ГОСТ 8.268–77. *Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик магнитотвердых материалов*. Москва, Издательство стандартов, 1978. 25 с.
- [4] Пятин Ю.М., ред. *Постоянные магниты*. Москва, Энергия, 1976. 376 с.
- [5] Технический отчет по ОКР «НК». П/я А-1903, 1975. 30 с.
- [6] Технический отчет по НИР «Легирование сплавов ЮНДК24, ЮНДК25БА и ЮНДК35Т5 редкоземельными элементами с целью дальнейшего повышения их магнитных параметров и механических свойств». П\я Р-6927, 1970. 47 с.
- [7] Jesmont J.J., Weimersheim S. *Method of making permanent magnets*. Patent US 3226266A. Appl. 07.02.1962, publ. 28.12.1965.
- [8] Пикунов М.В., Десипри А.И. *Металловедение*. Москва, Металлургия, 1980. 256 с.
- [9] Чередниченко И.В., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю. и др. Структура и свойства сплавов для постоянных магнитов ЮНДК25БА, полученных методом направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем. *Труды ВИАМ*, 2017, № 11, с. 29–36.
- [10] Сеин В.А., Буряков И.Н., Дроздов С.С. и др. Новая литейная форма для получения столбчатой кристаллической структуры в магнитах из сплавов типа ЮНДК (Т). *MiTOM*, 2018, № 8, с. 60–64.
- [11] Каменская Н.И., Сеин В.А., Зверева М.И. Исследование причин разрушения постоянных магнитов из литых магнитотвердых сплавов. *MiTOM*, 2017, № 4, с. 37–41.

References

- [1] GOST 25639–83. *Magnity litye postoyannyye. Tekhnicheskie usloviya* [State standard GOST 25639–83. Casting permanent magnets. Specifications]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1987. 35 p. (In Russ.).
- [2] GOST 17809–72. *Materialy magnitotverdyye litye. Marki* [State standard GOST 17809–72. Casting hard magnetic materials. Marks]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2001. 6 p. (In Russ.).
- [3] ГОСТ 8.268–77. *Metodika vypolneniya izmereniy pri opredelenii staticheskikh magnitnykh kharakteristik magnitotverdyykh materialov* [State standard GOST 8.268–77. The method of carrying out measurements for determination of static magnetic characteristics of hard magnetic materials]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1978. 25 p. (In Russ.).
- [4] Pyatin Yu.M., ed. *Postoyannyye magnity* [Permanent magnets]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 376 p. (In Russ.).
- [5] Tekhnicheskiy otchet po OKR «NK» [Technical report on design and “NK” development work]. P/ya A-1903, 1975. 30 p. (In Russ.).
- [6] Tekhnicheskiy otchet po NIR «Legirovanie splavov YuNDK24, YuNDK25BA i YuNDK35T5 redkozemelnyimi elementami s tselyu dalneyshego povysheniya ikh magnitnykh parametrov i mekhanicheskikh svoystv» [Technical report on research project “YuNDK24, YuNDK25BA and YuNDK35T5 alloys doping by rare-earth elements in order to improve their magnet parameters and mechanical properties”]. P\ya R-6927, 1970. 47 p. (In Russ.).
- [7] Jesmont J.J., Weimersheim S. *Method of making permanent magnets*. Patent US 3226266A. Appl. 07.02.1962, publ. 28.12.1965. (In Russ.).
- [8] Pikunov M.V., Desipri A.I. *Metallovedenie* [Metallurgical science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 256 p. (In Russ.).
- [9] Cherednichenko I.V., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhnyy M.Yu. et al. The structure and properties of permanent magnetic alloys UNDK25BA, manufacturing by directional solidification methods with liquid metal cooler. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 11, pp. 29–36.
- [10] Sein V.A., Buryakov I.N., Drozdov S.S. et al. Novel casting mold for obtaining columnar crystal structure in magnets from alloys of type YuNDK(T). *MiTOM*, 2018, no. 8, pp. 60–64. (In Russ.). (Eng. version: *Met. Sci. Heat Treat.*, 2018, vol. 60, no. 7-8, pp. 548–552, doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-018-0317-z>)

- [11] Kamenskaya N.I., Sein V.A., Zvereva M.I. A study of the causes of failure of permanent magnets from cast hard magnetic alloys. *MiTOM*, 2017, no. 4, pp. 37–41. (In Russ.). (Eng. version: *Met. Sci. Heat Treat.*, 2017, vol. 59, no. 3–4, pp. 232–236).

Статья поступила в редакцию 25.11.2022

Информация об авторе

ГОЛОВКИН Павел Александрович — кандидат технических наук, начальник лаборатории. АО «Плутон» (105120, Москва, Российская Федерация, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11, e-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru).

Information about the author


GOLOVKIN Pavel Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Deputy Chief Technologist. JSC Pluton (105120, Moscow, Russian Federation, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya St., Bldg. 11, e-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Головкин П.А. Повышение качества магнитов из сплава ЮНДКТ5БА на этапе литья их заготовок. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 5, с. 22–28, doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-22-28

Please cite this article in English as:

Golovkin P.A. Improving the quality of magnets made of the Fe-Al-Ni-Co alloy at their workpiece casting. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 5, pp. 22–28, doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-22-28



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

«Теоретические основы лазерной обработки»

Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрюв

В монографии рассмотрены физические основы технологических процессов лазерной обработки, а также вопросы взаимодействия концентрированного лазерного излучения с материалами, образования плазменного факела и парогазового канала. Представлены аналитические и численные методы анализа температурных полей и остаточных напряжений при лазерной обработке. На базе краткого изложения основ теории кристаллизации рассмотрены процессы затвердевания жидкого металла в условиях лазерного воздействия. Описаны особенности фазовых и структурных превращений материалов в твердом состоянии. Большое внимание уделено технологической прочности металла при лазерной обработке. Обобщены и систематизированы представления об особенностях образования трещин в различных температурных интервалах при лазерной сварке и наплавке.

Для инженерно-технических и научных работников, а также студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>