

РАЗДЕЛ I

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.74.043:669.187.56

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ МАШИНО- СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

С.Н. Жеребцов¹, Е.А. Чернышов¹, А.А. Александров², В.И. Гурдин²

¹ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет (НГТУ)»
им. Р.Е. Алексеева, Россия, г. Нижний Новгород.

²ФГБОУ ВО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)»,
Россия, г. Омск.

Аннотация. Представлена новая технология производства машиностроительных изделий, включающая в себя электрошлаковую плавку расходного электрода в плавильной емкости, модифицирование расплава ультрадисперсными порошковыми комплексами и последующую заливку его совместно со шлаком в металлическую литейную форму. Приведены сравнительные результаты физико-механических свойств изделий полученных по различным технологиям литья, показана макро- и микроструктура литого металла изделий «Сердечник рогообразный» из жаропрочного литейного никелевого сплава.

Ключевые слова: электрошлаковое кокильное литье; никелевые сплавы; модифицирование; структура; механические свойства; жаропрочность; сердечник рогообразный.

Введение

В химической, нефтяной, газовой и других отраслях промышленности при монтаже трубопроводов, на магистральных линиях, технологических разводках цехов, компрессорных станций, широко используются изделия «Отводы» крутоизогнутые трубные изготавливаемые по ГОСТ 17375-2001 большой номенклатуры диаметров и с различной толщиной стенок. Данные изделия изготавливают с помощью гидропресса, который проталкивает нагретые до высоких температур мерные трубные заготовки по специальному инструменту – протяжке. Главной деталью протяжки является изделие «Сердечник рогообразный», он работает при высоких температурах, в агрессивных газовых средах, испытывает большие механические нагрузки, воспринимаемые при движении отвода по сердечнику и поэтому должен изготавливаться из жаропрочного и жаростойкого материала [1, 2, 3].

Изделие протяжка состоит из трех частей – сердечник, проставка и хвостовик, соединенных при помощи сварки. Вследствие это-

го, в серийной технологии для изготовления изделий «Сердечник рогообразный» используют хромоникелевые стали тип 25-20, (Х23Н18) обладающие хорошей свариваемостью. Однако механические и жаропрочные свойства таких материалов не обеспечивают высокую прочность и износостойкость сердечников, в результате чего их срок службы составляет 200-250 часов работы, что позволяет изготавливать всего 16000-18000 отводов.

Одной из проблем производства машиностроительных изделий является то, что в настоящее время основным процессом получения отливок из жаропрочных сплавов является литье по выплавляемым моделям в горячие керамические формы в вакуумных индукционных печах (ВИП), что обуславливает очень высокую трудоемкость изготовления изделия и крайне низкую рентабельность производства. Вместе с тем плохие литейно-технологические свойства таких сплавов и высокие требования к качеству отливок неизбежно влекут за собой низкий выход годного

металла и высокий процент брака при использовании традиционных методов литья.

Из вышеизложенного следует, что проблема изыскания новых технологий получения деталей из жаропрочных сплавов требует своего решения [4, 5, 6]. В связи с этим были

проведены исследования для разработки новых технологий производства жаропрочных никелевых сплавов, создания и внедрения технологического оборудования для осуществления процесса электрошлакового кокильного литья (ЭШКЛ) (рис. 1).

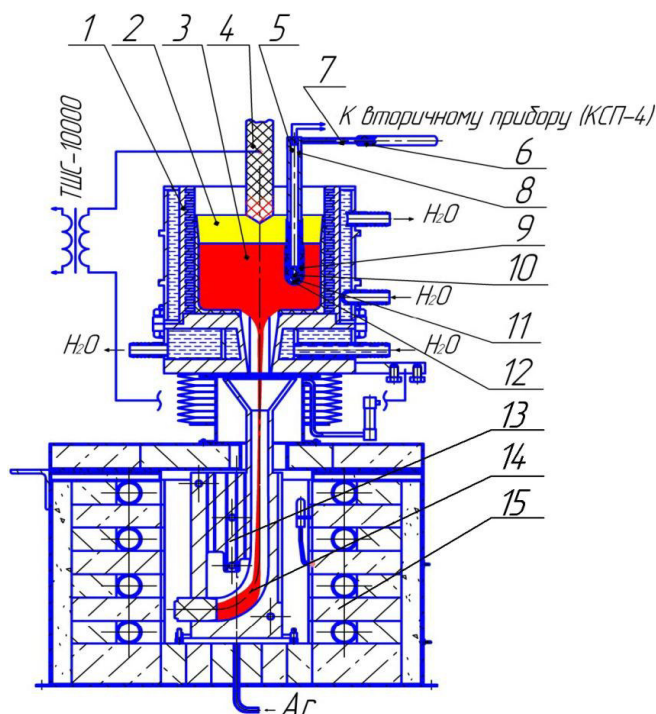


Рис. 1. Водоохлаждаемая автогарнисажная плавильная ёмкость в процессе электрошлакового кокильного литья (ЭШКЛ) изделия «Сердечник рогообразный» в среде защитного газа донным сливом в литейную форму, установленную в печи нагрева:

1. Водоохлаждаемая автогарнисажная плавильная емкость; 2. Жидкий электропроводный шлак
3. Жидкий металл; 4. Расходуемый электрод; 5. Термопара вольфрам-рениевая ВР 5-20; 6. Изолирующая рукоятка; 7. Стальная трубка; 8. Несущая трубка из жаропрочного сплава; 9. Защитный чехол из BNC
10. Алундовая соломка; 11. Порошок карбонитрида бора BNC; 12. Спай термопары вольфрам-рениевой ВР 5-20; 13. Литейная форма; 14. Отливка; 15. Печь нагрева литейной формы

Переплав расходуемого электрода, в качестве которого использовали прокат и отходы изделий от основного производства жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6-У (Х10Н58К10В11Ю6Т3М2Б), ЖС6-К (Х12Н60К5В5М5Ю6Т3), ЖС3-ДК (Х12Н62К10В4М4Ю4Т3), и т.д. начинали с жидкого старта и осуществляли под высокофторидным флюсом марки АНФ-21, АНФ-6 на установке А-550У, УШ-148 с источником питания ТШС-3000-1, ТШС-10000-1.

В качестве тигля использовали новое разработанное плавильное оборудование – медная водоохлаждаемая плавильная емкость, которая обеспечивает «стерильные» условия плавки жаропрочных хромоникелевых сплавов. В связи со значительным «вторичным» окислением легирующих элементов при разливке жаропрочных сплавов на возду-

хе, применили схему донного слива расплава без промежуточных емкостей в литейную форму, которая устанавливалась по оси плавильной емкости под проплавляемой пробкой-затравкой. Для этого использовали сливное устройство, состоящее из медного водоохлаждаемого поддона со сквозным конусным отверстием, в котором устанавливается токоподводящая пробка-затравка из того же материала, что и расходуемый электрод. В центральной части пробки имеется глухое отверстие, в которое устанавливается охлаждающий элемент. После накопления требуемой массы расплава, охлаждающий элемент выводится из пробки, перемычка между отверстием и расплавом перестает охлаждаться, под действием тепла проплавляется и происходит слив расплава в форму. Перед заливкой металла в литейную форму подает-

ся газ аргон, который тяжелее воздуха, в связи с чем происходит вытеснение воздуха из литейной формы. Так как аргон является инертным газом, то окисления жидкого металла в литейной форме не происходит.

Технология изготовления изделия «Сердечник рогообразный» включает:

плавку расходуемого электрода в плавильной емкости под слоем флюса;

- модифицирование ультрадисперсными порошковыми комплексами (УДПК);

- накопление необходимого количества металла по весу отливки;

- выдержку расплава в плавильной емкости по времени с заданными температурами согласно разработанной технологии высокотемпературной обработки расплава (ВТОР);

- последующую заливку расплава совместно со шлаком в металлическую литейную форму (кокиль) повторяющую наружные контуры отливаемого изделия;

- выдержку, охлаждение, разборку литейной формы и очистку изделия от защитного шлакового гарнисажа.

В процессе экспериментальных плавов проведены прямые замеры температуры жидкого металла и шлака на протяжении всего процесса ЭШКЛ, расходуемого электрода из сплава ЖС6–У, ЖС6–К, ЖС3–ДК в медной водоохлаждаемой автогарнисажной плавильной емкости. В результате проведенных исследований установлена возможность высокотемпературной обработки расплава при осуществлении процесса заливки изделия «Сердечник рогообразный» методом донного слива в керамические и металлические литейные формы.

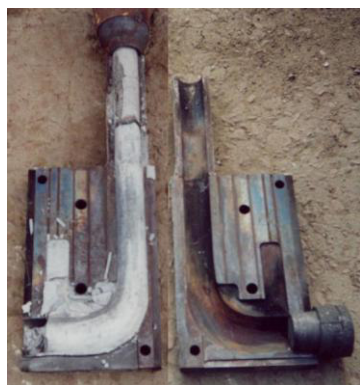
В последнее время для повышения качества литого металла изделий из жаропрочных сплавов применяют модифицирова-

ние тугоплавкими частицами. Для выбора оптимального химико-физического состава модификатора выполнена полная серия экспериментов, в которых эффективность вида, размер и количество тугоплавких УДП частиц, а также количество активирующей добавки – титана, оценивали по результатам влияния на физико-механические свойства литого металла [7, 8, 9].

В результате экспериментов установлено, что для никелевых сплавов наиболее рационально использовать модификатор, содержащий 0,025% УДП частиц порошка карбонитрида титана (TiCN) и 0,2% порошка титана (Ti) из расчета на массу обрабатываемого расплава, что позволяет эффективно и целенаправленно воздействовать на микро- и макроструктуру, получать мелкое равноосное зерно по всему объему отливки с высокими физико-механическими свойствами изделия.

Модификатор вводили при различных температурах расплава - 1910 °С, 1830 °С, 1720 °С, 1650 °С за 2 ÷ 3 минуты до слива, что обеспечивало равномерное распределение дисперсных частиц - инокуляторов по всему объему жидкого металла в плавильной емкости. Заливку приготовленного жидкого металла и шлака в металлическую литейную форму-кокиль, повторяющую наружные контуры отливаемого изделия, проводили при различных температурах 1900÷1850 °С, 1830÷1740 °С, 1700÷1600 °С, 1580÷1440 °С.

Практические результаты разработанной технологии электрошлакового кокильного литья изделий «Сердечник рогообразный», по схеме донного слива расплава в металлический кокиль, повторяющий контур отливаемого изделия представлены на рисунке 2.



а)



б)

Рис. 2. Разобранный кокиль с отливкой (а) и внешний вид литых сердечников (б)

После заливки расплава литейная форма отсоединяется от плавильной емкости и переносится кран-балкой на площадку, где происходит окончательная кристаллизация отливки и ее остывание. После этого форма разбирается и из нее извлекается литая заготовка. На рис. 2 показаны разобранный кокиль с отливкой в гарнисаже (см. рис. 2,а) и внешний вид получаемых сердечников (см. рис. 2,б). Наружная поверхность отливки получается ровная, шлаковый гарнисаж составляет около 0,5-1,5 мм, что обеспечивает возможность получения небольшого припуска на дальнейшую механическую обработку. Из полученных по разработанной технологии ЭШКЛ отливок изготавливали образцы для проведения физико-механических испытаний и металлографических исследований.

Сплавы ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК и т.д. относятся к группе литейных сложнолегированных многокомпонентных жаропрочных сплавов, в которых наряду со значительным размером макрозерна и с большой разнотермичностью кристаллов при кристаллизации образуются различные фазы: твердые растворы, эвтектические системы, карбиды, интерметаллические соединения.

Поскольку структурное состояние литых сплавов определяется химическим и фазовым составом, а жаропрочные сплавы типа ЖС имеют свои особенности, то главными фазами в сплавах рассматриваемого типа являются: аустенитная матрица ~ 38–50%; упрочняющая γ' -фаза ~ 48–60%; карбиды ~ 1,8–2%. Аустенит этих сплавов состоит из никеля, кобальта, хрома и тугоплавких эле-

ментов: молибдена, вольфрама, тантала и др. Основной упрочняющей фазой в никелевых жаропрочных сплавах является γ' -фаза, представляющая собой интерметаллид $Ni_3(Al, Ti)$ с ГЦК решеткой, обладающая высокими физико-химическими свойствами.

Закономерности изменения механических и эксплуатационных свойств, повышающих качество литого металла, связаны с формированием дисперсной первичной структуры, уменьшением химической, физической и структурной неоднородностей, изменением термодинамических и кинетических параметров фазовых превращений. Оптимальное сочетание высоких механических и эксплуатационных свойств изделий должна обеспечивать структура, имеющая мелкое равноосное зерно по всему сечению литого металла, глобулярную форму и равномерное выделение первичных карбидов, однородную дисперсную упрочняющую фазу. Существующие электрошлаковые технологии не обеспечивают получение таких характеристик, поскольку не предусматривают возможность управления процессами зарождения и роста фаз в процессе кристаллизации.

В качестве оптимизируемых технологических параметров ЭШКЛ были взяты: температура перегрева расплава (ВТОР), температура ввода УДПК в расплав, температура заливки, время выдержки от момента ввода модификатора до заливки и количество вводимых УДПК. Сравнительные результаты, приведенные в таблице 1, показывают влияние способа производства сплава ЖС6-У на его физико-механические свойства.

Таблица 1 – Результаты испытаний физико-механических свойств сплава ЖС6-У, полученного различными способами производства, при 975°C

Способ производства	Временное сопротивл. разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относит. удлинение δ , %	Относит. сужение ψ , %	KCU МДж/м ²
ЭШКЛ	964/983	870/940	1,6/1,8	4,7/3,2	0,12/0,18
ЭШКЛ+УДПК+ВТОР	1132/1080	1052/1105	2,1/2,9	5,1/6,7	0,21/0,31
ВИП	810/870	720/760	0,9/1,1	2,2/2,7	0,04/0,12
ВИП+УДПК	945/980	780/820	1,4/1,8	3,3/4,2	0,10/0,14
ОСТ 90126-85 Паспорт	960	800	1,5	2,0	–

Изучение структуры литого немодифицированного электрошлакового металла (рис. 3) показывает, что его макроструктура транскристаллическая, состоящая из длинных узких столбчатых кристаллов по периферии и

равноосных в центре, что объясняется интенсивным отводом тепла металлическим кокилем.

Протяженность столбчатых зерен от 15 до 30 мм, диаметр зерен в центре от 6,0 до 10,0

мм (рис. 3, а). Микроструктура – аустенит с выделением карбидов, эвтектики и γ' -фазы. Наблюдается ликвация, связанная с образованием участков, состоящих из карбонитридов (Ti, Mo, W) (CN) и двойных карбидов

типа $(\text{Ni, Cr})_3(\text{Mo, W})_3\text{C}$. В структуре видны иглообразные строчно-сеточные включения карбидов, располагающиеся преимущественно по границам зерен и имеющие большую протяженность (рис. 3, б).

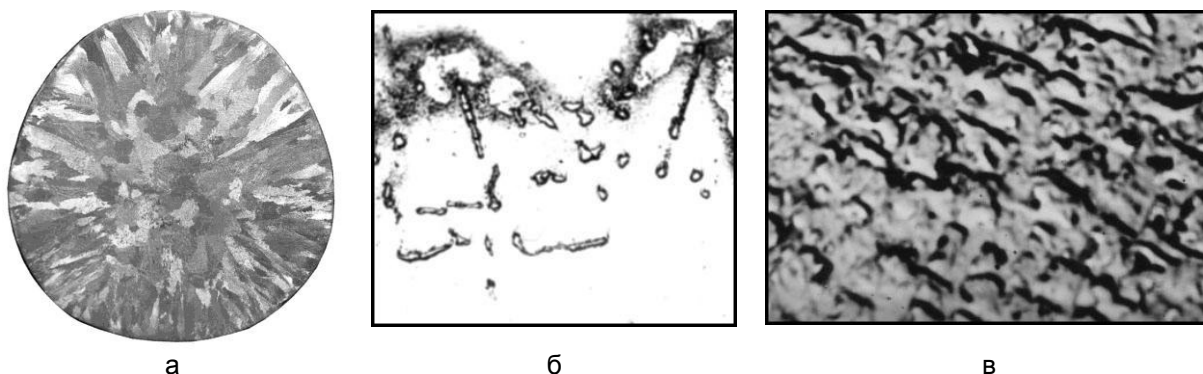


Рис. 3. Структура изделия «Сердечник рогообразный» из немодифицированного сплава ЖС6-У: а – макроструктура (x1); б – микроструктура (x240); в – γ' -фаза (x10000)

Изучение структурных превращений в изделиях, прошедших практические и стендовые испытания в результате эксплуатации при высоких температурах свыше 850 °С, показало, что упрочняющая γ' -фаза $\text{Ni}_3(\text{Ti, Al})$ имеет хаотично расположенные округлые формы, чаще неправильной конфигурации. Размер частиц нестабилен – от 0,3 до 1,2 мкм (рис. 3, в). Это говорит о том, что имеет место ее коагуляция и растворение в γ -твердом растворе. Кроме того, наблюдаются выделения пластинок η -фазы типа Ni_3Ti , что говорит о начале перерождения γ' -фазы в η -фазу. Процесс перерождения протекает по общей схеме: растворение частичек γ' -фазы и диф-

фузия атомов титана к растущей пластинке η -фазы. Иголообразно-пластинчатая форма фаз способствует хрупкому разрушению сплава. Одновременно с этим, извлекая тугоплавкие элементы из твердого раствора, эти фазы ослабляют его [9, 10].

Введение в расплав 0,025 % модификатора УДПК приводит к существенному изменению как полученной макро- и микроструктуры, так и морфологии, и топографии выделяющихся фаз: происходит резкое измельчение макрозерна, при этом столбчатость зерен и разностерность практически устраняются (рис. 4, а).

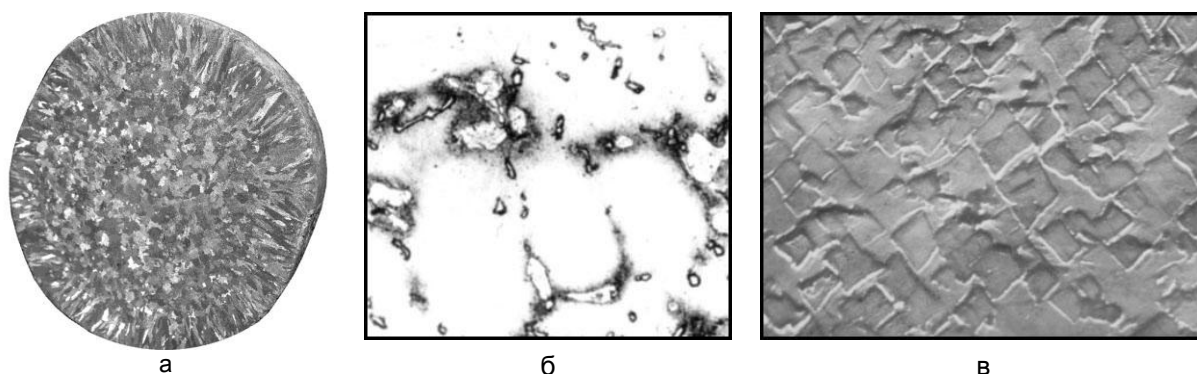


Рис. 4. Структура изделия «Сердечник рогообразный» из модифицированного сплава ЖС6-У: а – макроструктура (x1); б – микроструктура (x240); в – γ' -фаза (x10000)

Модификатор положительно влияет на морфологию карбидов, придавая выделени-

ям дискретный характер. Карбиды приобретают компактную равноосную форму. Грани-

ца зерна имеет вид извилистой линии, огибающей частицы, расположенные в матрице сплава. Дендритная структура литого металла тонкая и однородная по сечению слитка (рис. 4, б). Имеют место существенные изменения в положительную сторону строения микроструктуры, как матрицы сплава, так и упрочняющей γ' -фазы. Она приобретает прямолинейные очертания, близкие к кубической форме и упорядоченное расположение (рис. 4, в). Такое состояние структуры говорит о том, что границы зерен «закреплены» частицами и поэтому их миграция при нагреве незначительна, а, следовательно, физико-механические свойства при высоких температурах, жаропрочность и жаростойкость, более высокие по сравнению с исходным сплавом.

С применением разработанной технологии электрошлакового кокильного литья организовано производство изделий «Сердечник рогообразный», для выпуска изделий «Отводов» различных диаметров и типоразмеров по ГОСТ 17375-83. Промышленные испытания показали существенное повышение срока службы изделий «Сердечник рогообразный» в составе протяжки, что позволяет изготавливать 30000-50000 отводов.

Заключение

Разработаны и внедрены в производство технические предложения по выполнению конструктивных схем оборудования и оснастки, необходимых для осуществления этого процесса. Разработанная технология ЭШКЛ с модифицированием жидкого металла УДПК позволила значительно снизить выход из строя изделий в процессе эксплуатации при высоких температурах до 1050°C и агрессивных газовых средах по причине разрушения основного литого изделия по сравнению с традиционными способами литья.

Стойкость изделий «Сердечник рогообразный», изготовленных по разработанным технологиям ЭШКЛ, увеличилась в 2,2–3,4 раза, что позволяет изготавливать свыше 30000 изделий «Отвод» ГОСТ 17375–2000.

В целом, при использовании научных разработок в заготовительном производстве изделий ответственного назначения удалось достичь высокого коэффициента использования металла (до 0,6–0,8), и в 1,8–3,2 раза снизить трудоемкость их изготовления.

Библиографический список

1. Гальперин, А.И. Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов / А.И. Гальперин. – М. : Недра, 1983. – 203 с.
2. Шувалов, Ю.Б. Горячая протяжка крутоизогнутых отводов на полых рогообразных сердечниках / Ю.Б. Шувалов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1991. – № 2. – С. 36-37.
3. Химушин, Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф.Ф. Химушин. – М. : Металлургия, 1969. – 752 с.
4. Патон, Б.Е. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар // – Киев : Наук. думка, 1988. – 214 с.
5. Башнин, Ю.А. Влияние переплавных процессов на структуру и свойства стали / Ю.А. Башнин, В.Н. Исакина, Е.А. Масленкова // – М. : Металлургия, 1991. – 240 с.
6. Кличевец, М.И. Электрошлаковая плавка жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ / М.И. Кличевец, А.В. Шелгаева, Г.Г. Ведерников // Специальная электрометаллургия. – 1980. – Вып. 41. – С. 60-68.
7. Бабаскин, Ю.З. Влияние добавок нитрида циркония на структуру и свойства сплава ЖС6К / Ю.З. Бабаскин, Л.Н. Ларионов, С.Я. Шипицын, О.А. Шматко // Жаропрочные и жаростойкие сплавы на никелевой основе. – М. : Наука, 1984. – С. 184-187.
8. Чеченцев, В.Н. Объемное модифицирование никелевых сплавов при изготовлении отливок / В.Н. Чеченцев, В.П. Сабуров, Е.В. Замешаев, А.М. Микитась // Литейное производство. – 1988. – № 9. – С. 13-14.
9. Фаткулин, О.Х. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов дисперсными частицами тугоплавких соединений / О.Х. Фаткулин, А.А. Офицеров // Литейное производство. – 1993. – № 4. – С. 13-14.
10. Логунов, А.В. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов / А.В. Логунов, П.В. Петрушин, Е.А. Кушова, Ю.М. Должанский // Металловедение и термическая обработка металлов, 1987. – № 6. – С. 16-20.

TECHNOLOGY ELECTROSLAG CHILL CASTING ENGINEERING PRODUCTS

S.N. Zherebtsov, E.A. Chernyshov, A.A. Aleksandrov, V.I. Gurdin

Abstract. A new technology of production engineering products comprising electro slag melting the consumable electrode in the melting tank, the molten modifying ultra fine powder complexes and subsequently pouring it together with the slag in a metal mold. The comparative results of the physical and mechanical properties of products produced by various casting techniques, shows the macro- and micro-structure of cast metal products "core horn-shaped" heat-resistant nickel alloy foundry.

Keywords: electroslag chill casting; nickel alloys; modification; structure; mechanical properties; heat resistance; horn-shaped core.

References

1. Halperin A.I. Machinery and equipment for the production of curved pipe sections. M.: Nedra, 1983, 203 p.
2. Shuvalov Y.B. Hot broaching knuckle bends in the horn-shaped hollow cores. Chemical and petroleum engineering. 1991, № 2. pp. 36-37.
3. Khimushin F.F. Heat resistant steels and alloys. M.: Metallurgy, 1969. - 752 p.
4. Paton B.E., Medovar B.I. Electroslag crucible melting and casting metal. Kiev Sciences. Dumka, 1988, 214 p.
5. Bashnin, J.A., Isakin V.N., Maslenkova E.A. Influence pereplavnyh processes on the structure and properties of steel. - M.: Metallurgy, 1991, 240 p.
6. Klichevets M.I., Shelgaeva A.V., Vedernikov G.G. Electroslag Melting HN73MBTYU. MI resistant nickel alloy. Special electrometallurgy, 1980, Vol. 41, pp. 60-68.
7. Babaskin YU.Z., Larikov L.N., Shipitsin S.J., Shmatko O.A. Influence of zirconium nitride additives on the structure and properties of the alloy ZhS6K. Heat-resistant and heat-resistant nickel-based alloys. M.: Nauka, 1984, pp. 184-187.
8. Chechens V.N., Saburov V.P., Knead E.V., Mikitas A.M. Obemnoe modification of nickel alloys in the manufacture of castings. Foundry, 1988, № 9, pp. 13-14.
9. Fatkulov O.H., Officerov A.A. Modification of heat-resistant nickel alloys dispersed particles of refractory compounds. Foundry, 1993, № 4, pp. 13-14.
10. Logunov A.V., Petrushin P.V., Kukshova E.A., Dolzhansky Y.M. Predicting the impact of structural factors on the mechanical properties of high-temperature alloys. Metallurgy and heat treatment of metals, 1987, № 6, pp. 16-20.

Жеребцов Сергей Николаевич (Россия, Нижний Новгород) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Металлургические технологии и оборудование Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. (603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: s.n.zherebtsov@mail.ru).

Чернышов Евгений Александрович (Россия, Нижний Новгород) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24).

Александров Александр Александрович (Россия, Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Строительные конструкции Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: omsk-aaa@rambler.ru).

Гурдин Виктор Иванович (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатация и ремонт автомобилей Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).

Zherebtsov Sergey Nikolaevich - (Russian Federation, Nizhny Novgorod) - Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metallurgical technology and equipment of the Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alekseeva. (603950, Nizhny Novgorod, Minin st, 24, e-mail: s.n.zherebtsov@mail.ru).

Chernyshov Yevgeny Aleksandrovich - (Russian Federation, Nizhny Novgorod) - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Metallurgical Technology and Equipment Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alekseeva (603950, Nizhny Novgorod, Minin st., 24).

Aleksandrov Aleksander Aleksandrovich - (Russian Federation, Omsk) - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building structures Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira ave., 5, e-mail: omsk-aaa@rambler.ru.).

Gurdin Viktor Ivanovich - (Russian Federation, Omsk) - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Maintenance and repair of motor vehicles Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira ave, 5)