

УДК.669.017:621.78

С. Н. Жеребцов¹, Е. В. Лобов², Е.А. Чернышов³**КОМПЛЕКСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ ЖАРОПРОЧНЫЙ
НИКЕЛЕВЫЙ СПЛАВ
ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ КОКИЛЬНОМ ЛИТЬЕ**Омский государственный педагогический университет¹,
ОАО «Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения»²,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева³

Представлены многолетние результаты практических исследований, подтверждающие положительное влияние разрабатываемой технологии высокотемпературной обработки расплава (ВТОР) с совместным использованием процесса модифицирования никелевых сплавов при электрошлаковом кокильном литье. Впервые на практике показаны реальные параметры прямых замеров температуры жидкого металла и шлака при переплаве ряда жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6-У, ЖС3-ДК и т.д., в автогарнисажной плавильной ёмкости на протяжении всего технологического процесса электрошлакового литья изделий. Приведены сравнительные характеристики и результаты испытаний физико-механических свойств и служебных характеристик изделий, полученных вакуумно-индукционным переплавом и электрошлаковым переплавом с применением комбинированной технологии модифицирования и высокотемпературной обработки расплава.

Ключевые слова: электрошлаковое кокильное литьё, модифицирование, температура, жидкий металл, шлак, технологические параметры, физико-механические свойства, никелевый сплав.

Электрошлаковому переплаву (ЭШП) подвергали никелевые жаропрочные сплавы типа: ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК, во время переплава вводили модификаторы различного химического состава-(TiCN-Ti-Cr, TiCN-Ti-Ni, TiCN-Ti-Y, TiCN-Ti-Mo, TiCN-Ti-Va, а также РЗМ); в статье представлены результаты исследования с модификатором Ti(C_x N_y)-Ti. В процессе ЭШКЛ (электрошлаковое кокильное литьё) производили технологический перегрев расплавленного металла в плавильной емкости - для проверки нашего предположения о положительном влиянии технологии высокотемпературной обработки расплава (ВТОР), совмещённой с процессом модифицирования жидкого металла, на структуру и физико-механические свойства отливаемого изделия [1, 3, 4].

Металл плавил и разливали в установке электрошлакового литья А550-У, УШ-148, варьируя температуру введения добавки, состав модификатора, время выдержки, температуру жидкого металла и шлака, силу тока, напряжение в процессе переплава, температуру охлаждающей жидкости и т.д.

Контроль и запись токовых режимов электрошлакового переплава расходуемого электрода в плавильной ёмкости производились с помощью электронного потенциометра КСП-4, контроль скорости плавления электрода осуществлялся с помощью датчика веса в комплекте с самописцем ПСР-1. Температура охлаждающей жидкости (вода) на входе и выходе из поддона плавильной емкости контролировалась электронным автоматическим многоточечным потенциометром ЭПР-09РМЗ. Для прямого замера температуры жидкого металла и шлака в плавильной ёмкости на протяжении всего процесса переплава расходуемого электрода применялась вольфрам-рениевая термopара типа ВР5(20)5 в защитном корпусе из тугоплавкого металла.

Модифицирование после ВТОР с введением УДПК (ультрадисперсный порошок комплекс, разработанный на базе TiCN-Ti [1, 4]) в диапазоне температур при 1450-1470°C, 1580-1600°C, 1720-1740°C-потребовало применения технологии подстуживания жидкого металла для повышения эффекта модифицирования за счет снижения продолжительности вре-

мени выдержки от момента введения УДПК в жидкий металл, с последующей заливкой в кокиль и до начала процесса кристаллизации сплава в литейной форме [4].

На (рис. 1) приведена реальная схема процесса переплава расходоуемого электрода из сплава ЖС6-У под слоем защитного синтетического флюса марки $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ в охлаждаемой автогарнисажной плавильной ёмкости [1,4]. Температура нагрева жидкого металла достигала от 1900°C до 2040°C , а жидкого флюса соответственно от 2150°C до 2320°C .

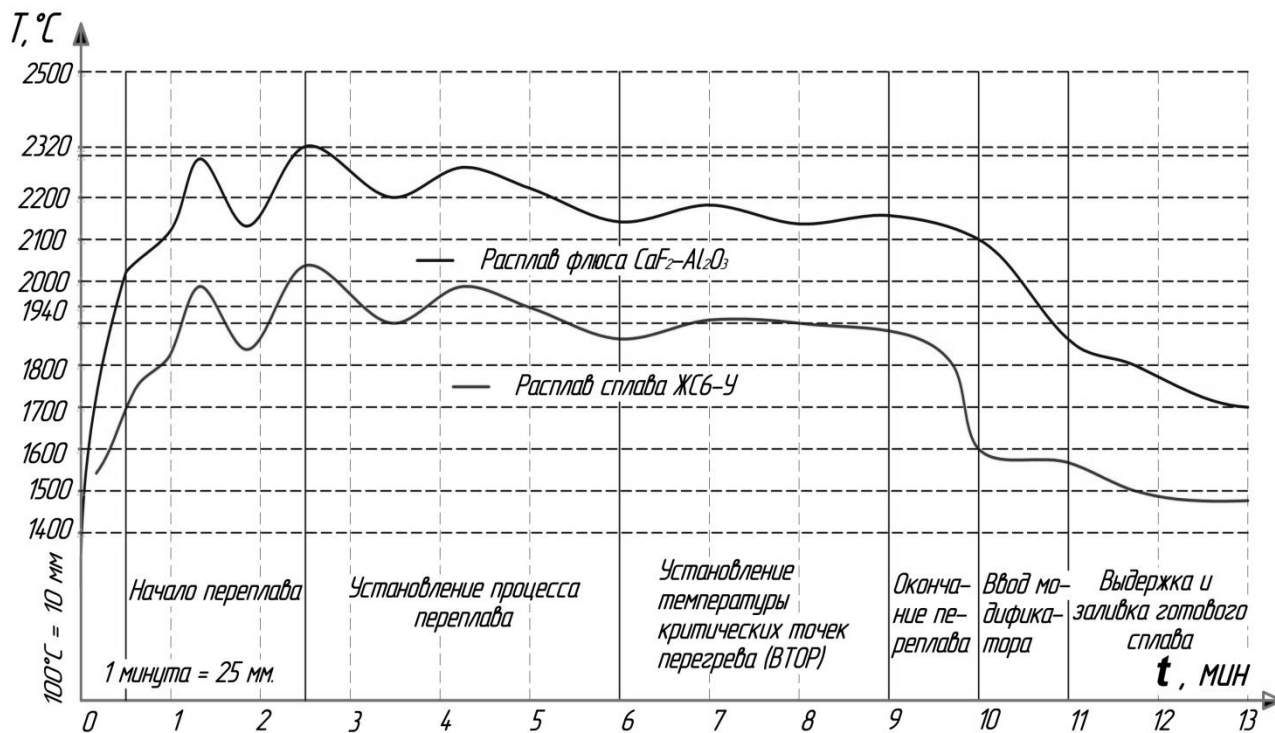


Рис. 1. Температурно-временная зависимость процесса ЭШКЛ+ВТОР расходоуемого электрода из сплава ЖС6-У в плавильной емкости

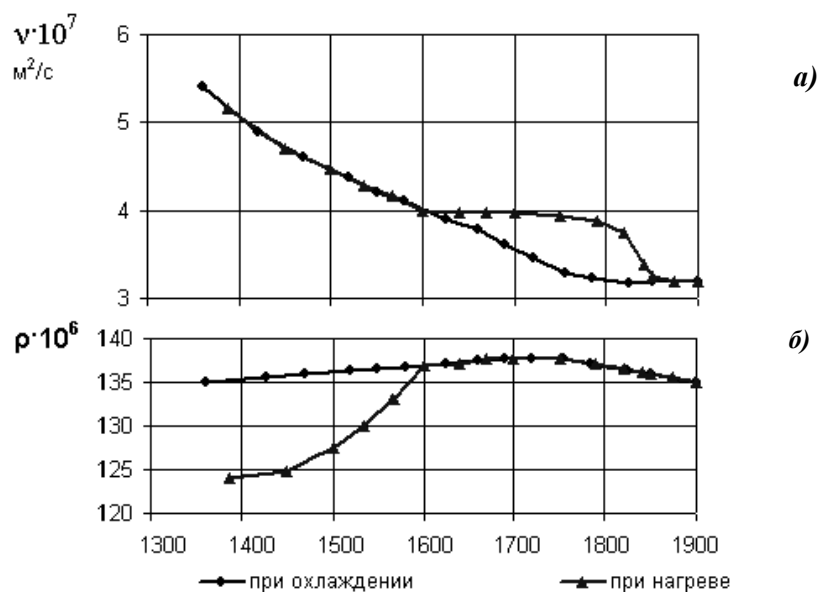


Рис. 2. Политермы:
 а – кинематической вязкости (ν) сплава ЖС3-ДК;
 б – удельного электросопротивления (ρ) сплава ЖС3-ДК

Перевод расплава никелевых сплавов в равновесное состояние при воздействии высокотемпературной обработки расплава осуществляют перегревом выше второй критической температуры $t_{кр2}$ 1830°C (для ЖС3-ДК и ЖС6-У), и 1800°C для ЖС6-К [1, 4]. Необходимую температуру перегрева расплава ЖС3-ДК, ЖС6-К, ЖС6-У для перевода его в равновесное состояние определили по изменению кинематической вязкости и удельного сопротивления в жидком состоянии (рис. 2, а, б), по методикам, рассмотренным в работах [7, 8].

На политермах структурно-чувствительных свойств никелевого сплава ЖС3-ДК можно выделить два температурных интервала, в которых происходят интенсивные изменения структуры расплава. В низкотемпературной области 1550-1650°C аномальный характер изменения свойств связан с разрушением неравновесных группировок атомов, соответствующих по составу и строению интерметаллидной γ' - фазе, а в интервале температур 1780-1830°C осуществляются полная диссоциация и растворение тугоплавких соединений, находящихся в расплаве.

С учетом результатов опытов был выбран следующий температурный режим плавки и модифицирования: перегрев до 1840–1850°C, выдержка 5–10 мин; температура введения УДПК не должна превышать 1700°C. Оптимальную температуру введения модификатора установили по изменению механических свойств образцов из сплава ЖС3-ДК, полученных с использованием технологии электрошлакового кокильного литья (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние температуры введения модификатора после ВТОР при ЭШП (1830°C)
на механические свойства сплава ЖС3-ДК**

Температура введения, T_1 °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
1570	1086/1074/1071	793/820/791	18,9/14,0/18,8	21,2/20,0/22,4
Среднее	1077	801	17,2	21,2
1610	1056/1075/1036	802/804/794	18,8/18,0/14,8	20,8/20,1/20,5
Среднее	1055	800	17,2	20,4
1650	1162/1162/1152	843/843/839	16,0/16,8/16,0	19,7/20,4/18,1
Среднее	1158	841	16,3	19,4
Паспорт	900	760	14,0	16,0

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. В качестве функций сравнения использовали относительное удлинение, предел прочности, ударную вязкость и длительную жаропрочность исследуемых сплавов ЖС6-У, ЖС3-ДК, ЖС6-К, согласно ОСТ1 90126-85.

Была отлита большая партия образцов с добавкой модификаторов, приготовленных при различных режимах ТФА (температурная фазовая активация) и вводимых в расплав при различных температурах жидкого металла, а также последующей временной выдержки и заданной температурой заливки жидкого металла, в литейную форму и последующим определением качества отливки (табл. 2). Для повышения эффективности модифицирования применяли принудительное охлаждение модифицированного расплава ЖС3-ДК, ЖС6-У, к двухкамерному поддону плавильной ёмкости под давлением подвели охладитель, с помощью которого задавали требуемые параметры температуры нагрева и охлаждения жидкого металла [2, 3].

Таблица 2

**Влияние режимов ТФА модификатора и температуры введения
и разливки сплава ЖС-6У на качество отливок**

№ плавки		Режимы ТФА, $T, ^\circ\text{C}/\text{мин}$	Температура введения $T, ^\circ\text{C}$	Температура за- ливки $T, ^\circ\text{C}$	Качество отливок
1	ЭШП	1000/60	1650	1570	Чистая
2	ЭШП	1000/60	1650	1575	Засоры
3	ВИП	1000/60	1670	1650	Чистая
4	ВИП	1000/60	1650	1620	Чистая
5	ВИП	1000/60	1570	1550	Засоры
6	ЭШП	1000/60	1670	1600	Чистая
7	ЭШП	950/30	1670	1570	Отливки каче- ственные
8	ВИП	950/30	1680	1550	

Необходимость этой операции возникла в результате продолжительного времени «выстаивания» и выдержки перегретого модифицированного расплава в литейной форме, до начала прохождения процесса кристаллизации отливки, из-за этого значительно снижается эффект модифицирования. Результаты испытания образцов, вырезанных из отливок «Сердечник рогообразный», показали, что предел прочности металла увеличился на 140-210 МПа при возрастании пластичности материала (табл. 3).

Таблица 3

**Механические свойства образцов из модифицированного сплава ЖС6-У,
с принудительным охлаждением затравочного узла**

Вид отливки	Наличие охлаждителя	$\sigma_b, \text{Мпа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
Сердечник ВИП	(+)	909	10,0	18,1
	(-)	885	16,4	16,8
	(+)	934	10,8	19,7
Сердечник ЭШП мод.	(+)	1186	16,0	15,7
	(+)	1240	16,8	18,7
	(+)	1190	16,0	17,0
Образцы ЭШП без мод.	(-)	1045	12,8	15,0
	(+)	1070	13,6	13,0
	(-)	1065	8,8	14,9
Образцы ЭШП мод.	(+)	1260	20,0	20,1
	(-)	1120	16,0	17,3
	(+)	1150	16,8	18,9
	(+)	1196	20,0	20,1

Механические свойства испытанных образцов, вырезанных из отливок, свидетельствуют о том, что совмещение ВТОР с модифицированием и принудительным охлаждением расплава позволяет увеличить прочность изделия на 220-250 МПа при росте пластичности примерно в два раза. Исследование длительной прочности на образцах, вырезанных из отливок не модифицированного и модифицированного сплава ЖС6-У, указывает, что показатель длительной прочности у модифицированного сплава выше на 80÷140 МПа.

Следует отметить, что при последовательном увеличении нагрузки на испытываемый образец сопротивление разрушению модифицированного сплава повышается. Это может быть связано с диссипацией энергии на блоках структуры, окружающей модифицированные карбиды, а также меньшим углом «разориентировки» самих зерен модифицированного сплава [4].

Образцы из модифицированного сплава ЖС3-ДК после ЭШКЛ по сравнению с ВИП выдерживают нагрузку 700-920 МПа при 700 $^{\circ}\text{C}$, при длительности испытания более 150-265 ч

(табл. 4). Выполненные исследования наглядно показывают, что ЭШП по сравнению с ВИП более прогрессивная технология переплава высоколегированных никелевых сплавов.

Таблица 4

Длительная прочность образцов модифицированного сплава ЖС-ЗДК, вырезанных отливок ($t_{исп}$ -700°C)

№	Нагрузка σ , МПа	Время до разрушения, ч	δ , %	ψ , %
ВИП	680/720/740	100/106/97	4,7	5,6
ВИП	688/720/740/760/780	100/100/100/100/168	3,1	3,7
ВИП	680/740	100/93	4,3	6,8
ЭШП	870/920	265/155	6,8	7,5
ЭШП	880/910	240/180	5,4	6,3
ЭШП	680/700	150/130	3,4	5,1
ВИП	820/800	130/145	5,2	4,0

Свойства модифицированного сплава ЖС6-У, подвергнутого ВТОР при ЭШП, верхняя критическая точка для сплава ЖС6-У составляет 1830°C, а нижняя 1650°C. Продолжительность выдержки расплава при 1830°C принимали равной 10 мин. Модификаторы вводили при 1650°C. Исследование механических свойств образцов показало (табл. 5), что свойства модифицированного сплава по сравнению со сплавом после ВТОР без модифицирования улучшились: σ_b увеличился на 10÷15%, δ -на 35- 47%, ψ на 45-58%.

Таблица 5

Механические свойства образцов из сплава ЖС6-У после ВТОР и модифицирования, испытанные при температуре 20°C

Вид обработки	Механические свойства			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
ВТОР (ЭШЛ)	1100/1045/1120	970/920/990	5,2/4,7/4,9	8,3/6,3/7,2
ВТОР+(TiCN-Ti)	1210/1160/1180	1060/980/1005	8,3/6,7/7,1	12,7/10,0/11,3

Размер макрозерна в отливках из модифицированного сплава при ЭШКЛ + ВТОР составил в среднем 0,7-1,2 мм, карбиды приобрели компактную форму, их средний размер составил 3-5 мкм. Наилучшие сочетания структуры и свойств сплавов ЖС6-К, ЖС6-У получены при введении УДП комплекса при 1580°C и выдержке 5 мин с последующей разливкой при 1490-1510°C.

Циклическая устойчивость образцов из модифицированного сплава ЖС6-У при 20°C увеличивается от 166 МПа до 200 МПа при испытании на резонансной частоте и базе $2 \cdot 10^7$ циклов, полученных различными способами производства ВИП и ЭШКЛ.

Исследование длительной прочности образцов модифицированного сплава ЖС6-У при различных температурах и нагрузках показало, что при 100-часовой нагрузке на образец она может быть увеличена до 30 МПа (табл. 6). По сертификату завода изготовителя $\sigma_b=1000-1050$ МПа; $\delta=3-5\%$; $\psi=4-8\%$; $\sigma_{100}^{1000}=170$ МПа. Это связано с тем, что детали машин (энергетические установки, лопатки, ротора газотурбинных двигателей, изделия «Сердечник рогообразный» и др.), работающих в условиях высоких температур и агрессивных газовых средах, воспринимают большие знакопеременные механические нагрузки.

Таким образом, применение ВТОР совместно с модифицированием позволяет получать стабильные служебные свойства отливок, превышающие верхний уровень механических свойств серийных сплавов, указанных в сертификатах на металл, поставляемых заводами-изготовителями.

Таблица 6

Длительная прочность образцов из сплава ЖС6-У, после ВТОР и модифицирования

Плавка	Режим испытаний	Физико-механические свойства		
		τ , ч	δ , %	ψ , %
ВИП	σ_{250}^{975}	12,0	4,2	5,3
ЭШП		25,0	3,9	4,6
ВИП	σ_{200}^{1000}	32,0	6,2	2,8
ЭШП		69,8	5,3	1,5
ВИП	σ_{160}^{1100}	21,6	4,3	1,9
ЭШП		37	5,0	1,6
ВИП	σ_{120}^{1150}	12,0	3,2	4,1
ЭШП		28	4,0	5,4

Необходимо отметить, что особенности структуры жаропрочных никелевых сплавов, отлитых с применением ВТОР, требуют изменения режимов термической обработки изделий для получения максимальной жаропрочности: нагрев до температуры растворения 10% γ' -фазы с охлаждением на воздухе и старения при температуре начала растворения γ' -фазы. Но значительного изменения строения карбидной фазы при этом может не происходить. Отмечено, что повышение скорости охлаждения металла отливки способствует измельчению карбидов MeC при кристаллизации и γ' -фазы при распаде γ -фазы в интервале температур 1400-1500°C, но четкой (прямой) функциональной зависимости между допустимым пределом повышения скорости охлаждения и наилучшими показателями по физико-механическим свойствам сплавов не установлено, в этом направлении ведутся дальнейшие исследования.

Для исследования возможности улучшения строения карбидной и γ' -фазы, за счёт повышения скорости процесса направленной кристаллизации, для увеличения физико-механических свойств металла отливок провели цикл опытных плавов сплавов ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК и т.д., с применением комбинированной технологии ВТОР и модифицирования на базе производственных мощностей ЗАО «Омский завод специальных изделий», ОАО «Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», г. Омск.

Используя опыт НПО "Сатурн" и рекомендации ВИАМ, был принят следующий режим плавки и заливки сплава ЖС6-У в изделие «Сердечник рогообразный»: ВТОР - 1740°C, выдержка 10-20 мин, введение модификатора при 1670°C, температура заливки 1530°C. Для подбора составов модифицирующих комплексов проведен ряд экспериментальных плавов с заливкой образцов, испытания которых показали, что применение новых модификаторов оказало положительное влияние на физико-механические свойства изучаемых сплавов [3, 4].

Варьирование параметров процесса заливки позволило оценить влияние температуры введения модификатора и его состава на механические свойства сплава. Наиболее высокие и стабильные свойства получены при модифицировании 0,025% TiCN-Ti от массы заливаемого металла, при температуре введения добавки 1650- 1670°C.

Следует отметить, что общий уровень механических свойств всех образцов из сплавов ЖС6-У после ВТОР и модифицирования выше по сравнению с сертификатом ОСТ1 90126-85: σ_B -на 140-320 МПа, $\delta\%$ -в 2-4 раза, причем он достигнут без образования посторонних кристаллов, образующихся при охлаждении.

В процессе выполнения работы был широко опробован технологический процесс объемного модифицирования сплавов ЖС6-У, ВЖЛ12-У, ЖС3-ДК, позволивший увеличивать их пластичность в 1,5-2 раза и поднять предел циклической выносливости на 25-40 % [1, 4, 6].

Применение новой технологии модифицирования и совмещение с ВТОР при получении качественных заготовок, за счёт изменения микроструктуры и повышения химической

однородности отливки, позволило улучшить качество литья как ЭШКЛ, так и традиционными технологиями ВИП, ВДП, исключить сосредоточенную пористость, уменьшить размер зерна, значительно повысить прочностные показатели, пластичность, жаропрочность и служебные характеристики изделий.

Библиографический список

1. **Жеребцов, С.Н.** Применение метода высокотемпературной обработки жаропрочного сплава при литье изделия "Сердечник рогообразный" // Литейщик России. – 2005. – №7. – С. 37–39.
2. **Жеребцов, С.Н.** Применение технологии электрошлакового переплава для производства изделия из хромоникелевых сплавов // Технология машиностроения. – 2006. – №5. – С. 12–14.
3. **Жеребцов, С.Н.** Исследование зависимости физико-механических свойств сплава ЖС6-У от технологических параметров литья // Литейщик России. – 2005. – №11. – С. 35–36.
4. **Жеребцов, С.Н.** Применение наноматериалов и высокотемпературной обработки никельхромовых сплавов при электрошлаковом литье: дисс. ... на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2006. – 213 с.
5. **Ларинов, В.Н.** Применение высокотемпературной обработки расплава при монокристалльном литье лопаток турбин на установке УВНК-8П // В.Н. Ларинов [и др.] // Авиационная промышленность. – 1989. – Прил. № 2. – С. 30–34.
6. **Еремин, Е.Н.** Повышение качества литого металла при электрошлаковом переплаве жаропрочных никелевых сплавов / Е.Н. Еремин, С.Н. Жеребцов, В.Г. Радченко // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2003. – №8. – С. 15–18.
7. **Колотухин, Э.В.** Совершенствование технологии выплавки и повышение качества жаропрочных сплавов на основе исследования их удельного электросопротивления: дисс. ... на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Свердловск, 1990. – 150 с.
8. **Барышев, Е.Е.** Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии / Е.Е. Барышев, А.Г. Тягунов, Н.Н. Степанова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 198 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.10.2015*

S.N. Zherebtsov, E. V. Lobov, E.A. Chernyshov

KOMPLESNY IMPACT ON THE CRYSTALLIZING HEAT RESISTING NICKEL ALLOY AT ELECTROSLAG KOKILNY MOLDING

Omsk State Pedagogical Institute,
Omsk Research Institute of Mechanical Engineering (ONIITM),
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Presented the results of many years of research supporting the positive impact of high-technology developed by melt processing (second) with the joint use of the process of modifying nickel alloys at electroslag diecasting. For the first time in practice shows the real parameters of direct measurements of the temperature of the molten metal and slag remelting of a number of heat-resistant nickel alloys such ZHS6-U, ZHS3-DC, etc., avtogarnisazhnoy smelting capacity, throughout the process of electroslag casting products. The comparative characteristics and test results of physical and mechanical properties and service characteristics of products obtained by vacuum induction remelting and electroslag remelting using a modification of the combined technology and high-melt processing.

Key words: electroslag chill casting, modification, temperature, liquid metal, slag, process parameters, physical and mechanical properties, nickel alloy.