



УДК 621.74.043:669.187.56

ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ КОКИЛЬНОЕ ЛИТЬЕ СПЛОШНЫХ РОГОВЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Е. Н. Еремин, С. Н. Жеребцов

Предложена новая технология производства сплошных роговых сердечников, включающая электрошлаковую плавку расходного электрода в плавильном тигле, модифицирование расплава тугоплавкими частицами и последующую его заливку вместе со шлаком в кокиль. Описано оборудование для осуществления этого процесса. Приведены результаты сравнительного анализа литого металла, показаны преимущества технологии.

New technology is offered for production of solid horn-shaped cores, including electroslag melting of consumable electrode in melting crucible, modifying of molten metal by refractory particles and its subsequent pouring together with slag into chill mould. Equipment for realizing of this process is described. Results of comparative analysis of cast metal are given and advantages of the technology are shown.

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

В химической, нефтяной, газовой и других отраслях промышленности широко используют крутоизогнутые трубные отводы различных диаметров. Их изготавливают с помощью гидропресса, который проталкивает нагретые мерные трубные заготовки по специальному инструменту — протяжке. Главной деталью протяжки является роговой сердечник, изготавливаемый из жаропрочного материала, поскольку он работает при высоких температурах и испытывает большие механические нагрузки, воспринимаемые при движении отвода по сердечнику [1]. Сама протяжка состоит из трех частей: сердечника, проставки и хвостовика, соединенных посредством сварки. В серийном производстве сердечников используют хромоникелевые стали типа 25–20, характеризующиеся хорошей свариваемостью. Однако механические и жаропрочные свойства таких материалов не обеспечивают высокий уровень прочности и износостойкости сердечников, в результате срок их эксплуатации составляет всего 200... 250 ч, что позволяет изготавливать лишь 16000... 18000 отводов [2].

Результаты проведенных исследований подтверждают эти данные и показывают, что даже при строгом соблюдении технологии изготовления сердечника способом плавки в индукционной печи и соответствии его химического состава техническим условиям на используемую сталь, свойства литого металла не обеспечивают необходимую стойкость роговых сердечников в составе протяжки.

Исследования сердечника с Ду76, отлитого по серийной технологии и разрушившегося в процессе эксплуатации в поперечном направлении, показало,

© Е. Н. ЕРЕМИН, С. Н. ЖЕРЕБЦОВ, 2005

что излом на участке разрушения хрупкий, крупнозернистый (рис. 1). В макроструктуре исследованной в произвольном сечении детали обнаружены две зоны: по периферии — крупные столбчатые дендриты, в центре — относительно равноосные зерна.

В микроструктуре на фоне крупных зерен γ -твердого раствора зафиксированы характерные выделения, свидетельствующие о высокотемпературном окислении металла в процессе работы в атмосфере продуктов сгорания топлива с повышенным содержанием серы. Следовательно, для изготовления таких сердечников целесообразно использовать жаропрочные никелевые сплавы. В то же время применение для этих целей сложнолегированных никелевых сплавов ограничено их очень плохой свариваемостью.

Таким образом, наиболее приемлемым материалом является сплав ЭП-202 (ХН67ВМТЮ), рекомендуемый для изготовления сварных изделий [3].

Основным процессом получения отливок из жаропрочных сплавов является литье по выплавляемым моделям в горячие керамические формы в вакуумных индукционных печах, что обуславливает очень большую трудоемкость изготовления изделия и крайне низкую рентабельность производства.

В то же время плохие литейно-технологические свойства таких сплавов и высокие требования к качеству отливок неизбежно влекут за собой низкий выход годного металла, а также значительный процент брака при использовании традиционных способов литья.

Из изложенного следует, что проблема разработки новых технологий получения деталей из жаропрочных сплавов требует незамедлительного решения.

В последние годы в производстве изделий из высоколегированных сталей и сплавов одно из ве-

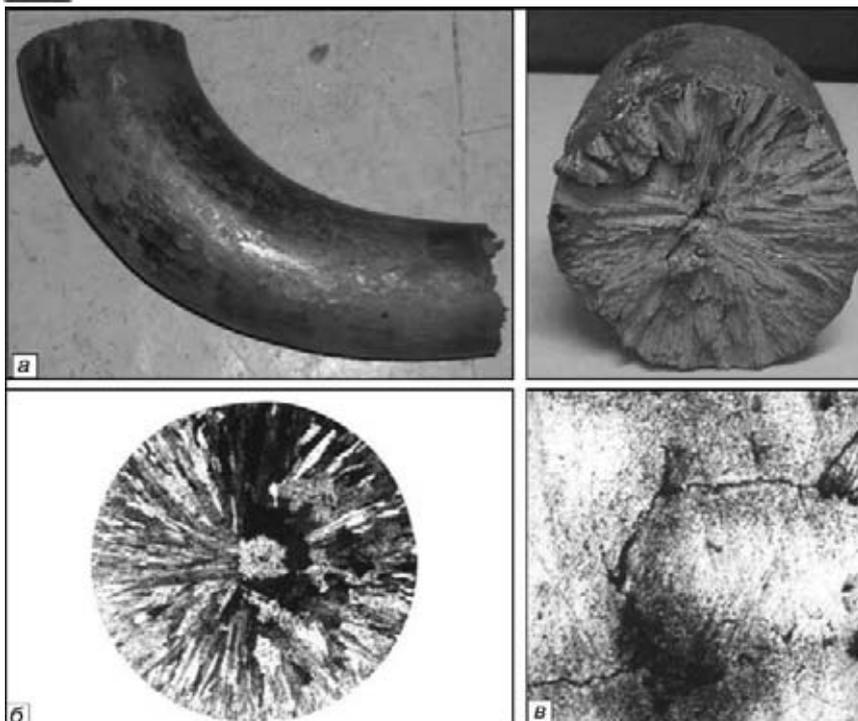


Рис. 1. Аварийный серийный сердечник: *a* — характер излома; *б* — макроструктура; *в* — микроструктура (× 200)

дущих мест занимают процессы, основанные на электрошлаковой плавке металла, в частности электрошлаковое кокильное литье (ЭКЛ) [4]. Это объясняется экономическими преимуществами, обусловленными более дешевым оборудованием, низкими эксплуатационными расходами и, главное, более высокими качественными показателями получаемого металла.

Традиционное электрошлаковое литье жаропрочных сплавов, осуществляемое способом переплава электрода в тигле с последующим переливом шлакометаллического расплава в форму, имеет ряд трудностей [5, 6], что обусловлено прежде всего вторичным окислением жидкого металла, вследствие которого в отливке не обеспечивается требуемый химический состав. Кроме того, литой электрошлаковый металл имеет столбчатую крупнозернистую структуру с большой протяженностью первичных осей дендритов. Все эти факторы не способствуют получению требуемых служебных характеристик литого металла. Поэтому совершенствование технологии электрошлаковых процессов является актуальной задачей.

Исследовали возможности совершенствования технологии ЭКЛ. Переплав электрода, в качестве которого использовали прокат сплава ЭП-202 диаметром 60 мм, начинали с жидкого старта и осуществляли под высокофторидным флюсом АНФ-21 на установке А-550У с источником питания ТШС-3000-1. Данная установка имеет небольшие габариты и удобна в эксплуатации, что способствовало ее широкому применению в исследовательских работах.

В качестве тигля использовали медную водоохлаждаемую плавильную емкость, гарантирующую «стерильные» условия плавки жаропрочных спла-

вов. Для повышения ее КПД на внутренней поверхности обечайки выполняли щелевые выемки, образующие вместе со шлаковым гарнисажем газовые полости, обуславливающие высокое термическое сопротивление стенки, что позволяет накапливать в ней необходимое количество жидкого металла.

В связи со значительным «вторичным» окислением легирующих элементов при разливке жаропрочных сплавов на воздухе применяли схему донного слива расплава без промежуточных емкостей в литейную форму, устанавливаемую по оси плавильной емкости под проплавляемой пробкой-затравкой. Для этого использовали сливное устройство, состоящее из медного водоохлаждаемого поддона со сквозным конусным отверстием, в котором размещали токоподводящую пробку-затравку из того же материала, что и расходный электрод. В центральной части пробки выполняли глухое отверстие для установки охлаждающего элемента.

После накопления требуемой массы расплава охлаждающий элемент выводили из пробки, переключая между отверстием и расплавом переставала охлаждаться и проплавлялась, в результате чего происходил слив расплава в форму со значительной прибыльной частью для принятия жидкого флюса, который, являясь тепловой надставкой, выравнивал температуру кристаллизующейся отливки и предотвращал образование в ней усадочной полости.

Схема комплекса для ЭКЛ представлена на рис. 2.

Технология изготовления сердечника включает плавку электрода в плавильной емкости под флюсом, модифицирование накопленного металла и последующую его заливку вместе со шлаком в металлическую литейную форму (кокиль). Режим переплава следующий: напряжение 42 В, ток 2850... 3000 А.

В последнее время для повышения качества литого металла изделий из жаропрочных сплавов применяют модифицирование тугоплавкими частицами [7–10]. В данной работе для модифицирования использовали ультрадисперсные порошки карбонитрида титана (TiCN), титана и иттрия. Выбор модификатора осуществляли согласно методике, изложенной в работе [11]. Модификатор получали смешиванием порошковых компонентов с последующим холодным прессованием в таблетки диаметром 25... 30 мм и толщиной 10... 20 мм. Модификатор вводили при температуре 1650 °С за 2 мин до слива, что обеспечивало равномерное распределение дисперсных частиц-инокуляторов по всему объему жидкого металла в плавильной емкости. Заливку металла в металлическую литейную форму-кокиль проводили при температуре 1600 °С.

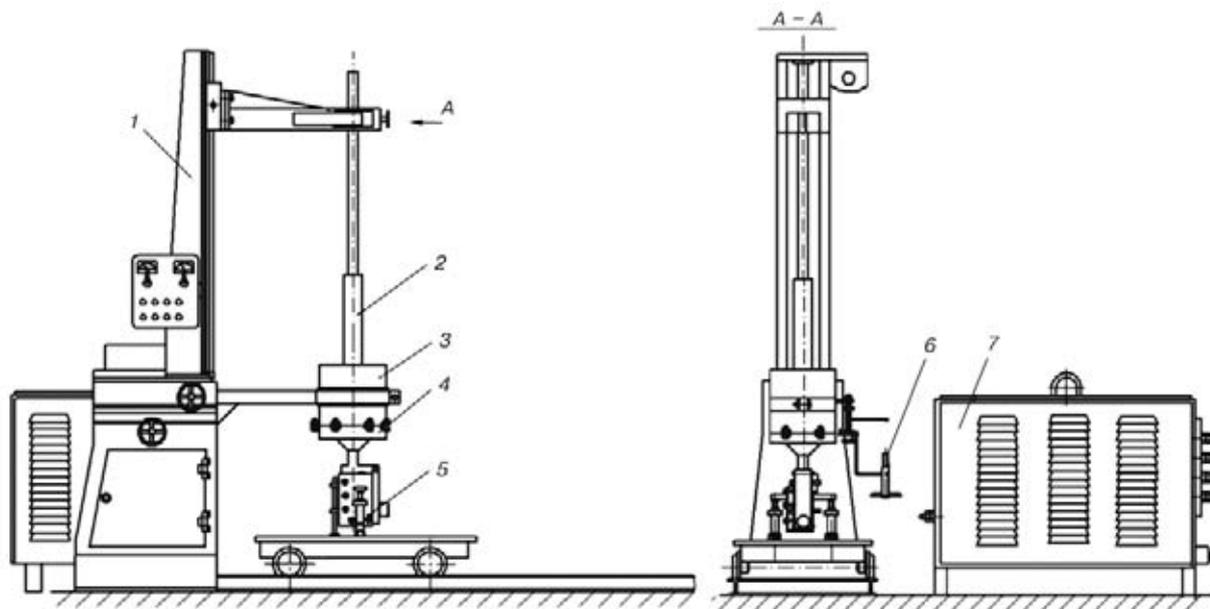


Рис. 2. Комплекс для ЭКЛ: 1 — установка А-550У; 2 — электрод; 3 — плавильная емкость; 4 — поддон; 5 — кокиль; 6 — охлаждающий элемент; 7 — трансформатор ТШС-3000

После заливки расплава литейную форму отсоединяли от плавильной емкости и переносили кранбалкой на площадку для окончательной кристаллизации отливки и остывания. Затем форму разбирали и извлекали литую заготовку. Наружная поверхность отливки была ровной, шлаковый гарнисаж составлял около 1 мм, что позволило получить небольшой припуск на дальнейшую механическую обработку. Разобранный кокиль с отливкой в гарнисаже и внешний вид изготавливаемых сердечников приведены на рис. 3.

Из полученных таким образом отливок изготавливали образцы для экспериментов и металлографических исследований. Сравнивали качество металла немодифицированного и с различной степенью модифицирования.

Сплав ЭП-202 относится к группе литейных сложнелегированных многокомпонентных жаропрочных сплавов, в которых наряду со значительным размером макрозерна и с большой разнотельностью кристаллов при кристаллизации образуются различные фазы: твердые растворы, эвтектические системы, карбиды, интерметаллические соединения. Основной упрочняющей фазой является γ' -фаза, представляющая собой интерметаллид Ni (Al, Ti). Поэтому свойства литого сплава прежде всего определяются его химическим и фазовым составами.

Данные химического анализа (табл. 1) свидетельствуют о том, что металл отливки, полученной способом донного слива, по большинству основных легирующих элементов изменяется незначительно и укладывается в марочный. Ожидаемого увеличения массовой доли углерода после введения порции модификатора практически не зафиксировано. Это можно объяснить тем, что содержание свободного и связанного углерода в ультрадисперсных порошках TiCN не превышает 1,2 и 12,0 %

массы порошка. Поэтому введение 0,06 % TiCN может увеличить содержание углерода на тысячные доли процента, что выходит за пределы требований технических условий.

Механические свойства металла при комнатной температуре и длительную прочность при 850 °С определяли на образцах, вырезанных в продольном направлении и прошедших термическую обработку: закалка 1170 °С, 3 ч, охлаждение на воздухе; старение при 850 °С, выдержка 10 ч, охлаждение на воздухе. Полученные результаты, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что модифицирование существенно повышает как механические свойства сплава, так и его длительную прочность.

Наилучшие результаты зафиксированы при общей добавке модификатора около 0,5 % массы жидкого металла. В этом случае в результате модифицирования при повышении прочности литого металла на 16 % жаропрочность σ_{200}^{850} увеличивается в 3,4 раза, что даже выше свойств исходного сплава. Это можно объяснить тем, что качество и служебные свойства жаропрочных сплавов, кроме химического состава, определяют состояние границ зерен, их размер, степень однородности, морфологию и топографию включений [3, 12, 13].

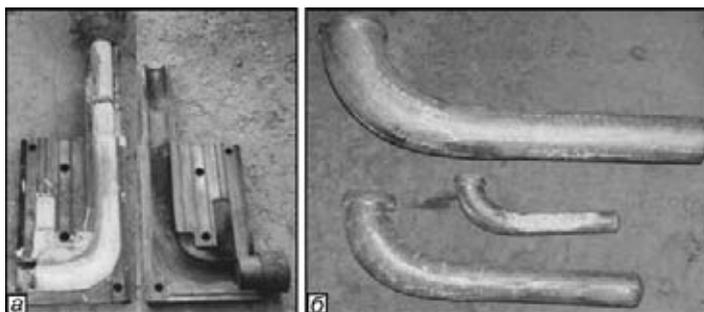


Рис. 3. Разобранный кокиль с отливкой (а) и внешний вид литых сердечников (б)



Таблица 1. Химический состав сплава ХН67ВМТЮ

Объект исследований	Массовая доля элементов, %									
	C	Cr	W	Mo	Ti	Al	Si	S	P	Mn
Исходный сплав	0,07	19,38	4,62	4,56	2,74	1,36	0,48	0,006	0,009	0,43
Металл без модифицирования	0,07	18,92	4,46	4,43	2,42	1,24	0,46	0,003	0,007	0,42
Металл, модифицированный 0,5 % (TiCN + Ti + Y)	0,07	18,97	4,46	4,44	2,65	1,25	0,46	0,003	0,007	0,42
Стандартный сплав	≤ 0,08	17...20	4...5	4...5	2,2...2,8	1,0...1,5	≤ 0,6	≤ 0,01	≤ 0,015	≤ 0,5

Таблица 2. Результаты испытаний сплава ХН67ВМТЮ

Объект исследований	Температура испытаний °С	Механические свойства				Жаропрочность τ_{200}^{550} , Ч
		σ_b	σ_T	δ	ψ	
		МПа		%		
Исходный сплав	20	858	560	14,8	16,6	–
	850	526	–	12,7	–	81
Металл без модифицирования	20	784	478	8,6	12,1	–
	850	591	–	10,2	–	28
Металл, модифицированный 0,5 % (TiCN+Ti+Y)	20	914	616	20,2	21,6	–
	850	628	–	14,8	–	96

Изучение литого немодифицированного электрошлакового металла (рис. 4) показало, что макроструктура у него — транскристаллическая, состоящая из длинных узких столбчатых кристаллов по периферии и равноосных в центре. Объясняется это интенсивным отводом тепла металлургическим кокилом.

Протяженность столбчатых зерен достигает 30 мм, диаметр зерен в центре — 10 мм. Микроструктура представляет собой аустенит с выделением карбидов, эвтектики и γ' -фазы. Обнаружена ликвация, связанная с образованием участков карбонит-

ридов (Ti, Mo, W)(CN) и двойных карбидов типа (Ni, Cr)₃(Mo, W)₃C. В структуре зафиксированы иглообразные строчечно-сеточные включения карбидов большой протяженности, располагающиеся преимущественно по границам зерен.

Изучение структурных превращений при 850 °С показало, что упрочняющая γ' -фаза Ni₃(Ti, Al) имеет округлые формы чаще неправильной конфигурации, расположенные хаотично. Размер частиц нестабилен — от 0,3 до 1,2 мкм. Это свидетельствует о ее коагуляции и растворении в γ -твердом растворе.

Кроме того, зафиксированы выделения пластинок η -фазы типа Ni₃Ti, свидетельствующие о начале перерождения γ' -фазы в η -фазу. Процесс перерождения протекает по общей схеме: растворение частиц γ' -фазы и диффузии атомов титана к растущей пластинке η -фазы. Иглообразно-пластинчатая форма фаз способствует хрупкому разрушению сплава [3, 13]. Кроме того, извлекая тугоплавкие элементы из твердого раствора, эти фазы ослабляют его.

Введение в расплав 0,5 % модификатора

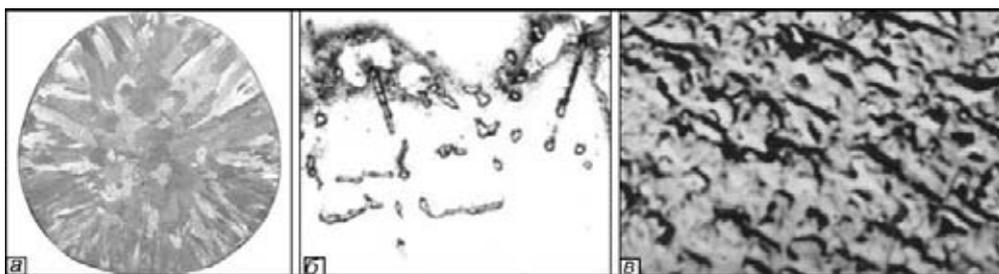


Рис. 4. Структура сердечника из немодифицированного сплава ХН67ВМТЮ: а — макроструктура; б — микроструктура (× 240); в — γ' -фаза (× 8000)

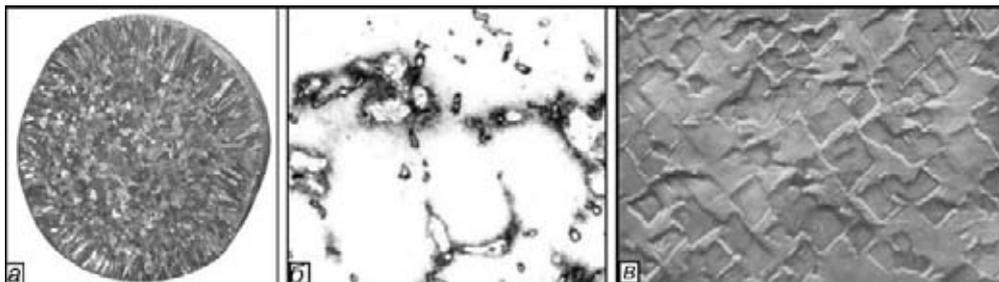


Рис. 5. Структура сердечника из модифицированного сплава ХН67ВМТЮ: а — макроструктура; б — микроструктура (× 240); в — γ' -фаза (× 10000)



приводит к существенному изменению как полученной структуры, так и морфологии и топографии выделяющихся фаз. Происходит резкое измельчение макрозерна, столбчатость зерен и разноточность практически устраняются (рис. 5).

Модификатор положительно влияет на морфологию карбидов, придавая выделениям дискретный характер. Карбиды приобретают компактную равноосную форму. Граница зерна имеет вид извилистой линии, огибающей частицы, расположенные в матрице сплава. Дендритная структура литого металла тонкая и однородная по сечению слитка. Имеются существенные изменения в строении γ' -фазы. Она приобретает прямолинейные очертания, близкие к кубической форме и упорядоченное расположение. Такое состояние структуры свидетельствует о том, что границы зерен «закреплены» частицами и поэтому их миграция при нагреве незначительна, а, следовательно, уровень свойств при высоких температурах должен быть увеличенным. Действительно, испытания показали, что механические свойства, длительная прочность модифицированного металла высокие, однородны по длине сердечника и превосходят свойства серийного сплава металлургического комбината.

По разработанной технологии ЭКЛ на ЗАО «Омский завод специальных изделий» организовано производство сплошных роговых сердечников по ГОСТ 17375-83. Производственные испытания показали существенное удлинение срока службы сердечника в составе протяжки, что позволяет изготавливать свыше 30000 отводов.

1. Гальперин А. И. Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов. — М.: Недра, 1983. — 203 с.
2. Шувалов Ю. Б. Горячая протяжка крутоизогнутых отводов на полых роогообразных сердечниках // Хим. и нефт. машиностроение. — 1991. — № 2. — С. 36-37.

3. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1969. — 752 с.
4. Патон Б. Е., Медовар Б. И. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла. — Киев: Наук. думка, 1988. — 214 с.
5. Башин Ю. А., Исакина В. Н., Масленкова Е. А. Влияние переплавных процессов на структуру и свойства стали. — М.: Металлургия, 1991. — 240 с.
6. Электрошлаковая плавка жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ / М. И. Кличевец, А. В. Шелгаева, Г. Г. Ведерников и др. // Спец. электрометаллургия. — 1980. — Вып. 41. — С. 60-68.
7. Влияние добавок нитрида циркония на структуру и свойства сплава ЖС6К / Ю. З. Бабаскин, Л. Н. Лариков, С. Я. Шнищин, О. А. Шматко // Жаропрочные и жаростойкие сплавы на никелевой основе. — М.: Наука, 1984. — С. 184-187.
8. Объемное модифицирование никелевых сплавов при изготовлении отливок / В. Н. Чеченцев, В. П. Сабуров, Е. В. Замешаев, А. М. Микитась // Литейн. пр-во. — 1988. — № 9. — С. 13-14.
9. Влияние микролегирования сплава ЖС6У иттрием на его фазовую стабильность / В. В. Сидоров, Г. И. Морозова, А. М. Кулебякина, А. И. Гневшена // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1988. — № 12. — С. 21-23.
10. Фаткулин О. Х., Офицеров А. А. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов дисперсными частицами тугоплавких соединений // Литейн. пр-во. — 1993. — № 4. — С. 13-14.
11. Еремин Е. Н. Закономерности комплексного модифицирования литого электрошлакового металла // Анализ и синтез механических систем. — Омск: ОмГТУ, 1999. — С. 76-78.
12. Структура, фазовый состав и свойства сплава ЭИ437Б электрошлаковой разливки / Ю. В. Латаш, М. М. Клюев, Г. П. Негода и др. // Спец. электрометаллургия. — 1984. — Вып. 55. — С. 7-11.
13. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов / А. В. Логунов, П. В. Петрушин, Е. А. Кукшова, Ю. М. Должанский // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1987. — № 6. — С. 16-20.

Омск. гос. техн. ун-т

ЗАО «Омский завод специальных изделий»

Поступила 08.02.2005

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ Объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:

ДОКТОРАНТУРА

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

АСПИРАНТУРА

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием документов проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11.

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): www.paton.kiev.ua

Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11,

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю