



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ В ВАКУУМЕ

А. А. БОНДАРЕВ, В. М. НЕСТЕРЕНКОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Магниевого сплавы находят все более широкое применение в различных областях промышленного производства, особенно когда изделия должны иметь наименьшие весовые характеристики. Использование для изготовления таких конструкций магниевых сплавов является наиболее перспективным, но в этом случае должны быть в наличии и надежными технологии их изготовления, включая и процессы сварки различными способами. Электронно-лучевая сварка в настоящее время многими специалистами относится к разряду высоких технологий. Во-первых, процесс ЭЛС происходит в условиях вакуумной среды, что совершенно исключает какие-либо окислительные процессы жидкого металла в сварочной ванне. Более того, при плавлении в вакууме происходит рафинирующая очистка жидкого металла от вредных примесей. А прочностные характеристики соединений при этом самые высокие. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований свариваемости электронным лучом деформируемых магниевых сплавов различных толщин. Показано влияние системы легирования и параметров режима на формирование швов и размеры зоны проплавления заготовок различной толщины. Определены прочностные характеристики сварных стыковых соединений. Библиогр. 8, табл. 4, рис. 6.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, магниевые сплавы, режимы сварки, прочность сварных соединений, микроструктура металла шва и основного металла

Магниевого сплавы, являясь самым легким конструкционным материалом и имея сравнительно высокие механические свойства, отличаются высокой химической стойкостью по отношению к ряду агрессивных сред, способны воспринимать большие ударные нагрузки благодаря низкому модулю упругости, а также хорошо обрабатываются режущим инструментом. Количество марок промышленных деформируемых магниевых сплавов приближается к двум десяткам. Из легких металлов алюминий в 1,5 раза и титан в 2,5 раза тяжелее магния, сталь тяжелее последнего в 4 раза. Этим объясняется повышенный интерес к применению сплавов магния в различных отраслях промышленности как у нас в стране, так и за рубежом [1–4].

Применение магниевых сплавов в качестве конструкционного материала в сварных конструкциях было бы невозможным без развития методов их технологической обработки и сварки [5, 6].

Исследованию свариваемости магниевых сплавов различных систем легирования дугowymi способами сварки посвящается целый ряд работ [7], в том числе и сверхлегких конструкционных сплавов на основе системы Mg–Li.

Однако, как показал анализ работ, посвященных исследованиям свариваемости магниевых сплавов, эти вопросы в литературе освещены еще недостаточно. И практически полностью отсут-

ствуют сведения по свариваемости магниевых сплавов электронным лучом.

Результаты ранее проведенных исследований свидетельствуют о том, что магниевые сплавы марок МА2-1, МА12, ИМВ2, ИМВ2-1, а также сплавы систем легирования Mg–Zn–Zr–Ce и Mg–Nd–Zr могут успешно свариваться дугowymi способами. Коэффициент прочности соединений для большинства из них находится в пределах 0,9...1,0 основного металла. Другие прочностные показатели соединений также находятся на уровне свойств основного металла при высокой плотности металла шва.

Основной проблемой при сварке магниевых сплавов является предупреждение образования горячих трещин в сварных соединениях.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины были проведены исследования свариваемости электронным лучом магниевых сплавов, марка и химический состав которых приведены в табл. 1.

Сплав МА2-1 относится к слаболегированным среднепрочным магниевым сплавам. Он имеет хорошую пластичность в горячем состоянии и хорошо сваривается дугowymi способами. Его использовали в работе с целью выбора параметров режима сварки заготовок из этого сплава толщиной до 200 мм.

Сплав на основе системы магний–цинк–цирконий (ВМД-3) относится к разряду высоколегированных и наиболее прочных магниевых дефор-



Таблица 1. Химический состав магниевых сплавов, мас. %

Сплав	Al	Zn	Mn	Li	Cd	Nd	La	Zr	Ni	Si	Fe	Be
МА2-1	3,8...5,0	0,8...1,5	0,4...0,8	-	-	-	-	-	0,005	0,10	0,05	0,02
ВМД-3	-	2,3...3,5	-	-	1,0...2,0	-	0,5...1,0	0,5...0,9	0,005	0,15	0,03	0,02
ВМД-6	0,1	5,5...7,0	-	-	0,2...1,0	1,4...2,0	-	0,5...0,9	0,004	0,15	0,04	0,002
ИМВ-2	5,0	1,0	0,4	8,0	4,0	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 2. Механические свойства исследуемых магниевых сплавов

Марка сплава	Полуфабрикат	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV , Дж/см ²
МА2-1	Плита	270,3...280,0	210,6...230,5	11,3...12,5	0,5...0,7
ВМД-3	Лист	270,1...280,3	230,5	6,5...9,5	0,45
ВМД-3	Плита	320,0	260,0	13,2	
ВМД-6	Лист	200,4...210,2	90,2...90,5	5,3...8,7	0,25
ИМВ-2	"-	220,0...230,0	190,0...190,5	17,5...20,0	0,4...0,5

мируемых сплавов. Сплав ВМД-3 дополнительно легирован кадмием и лантаном. Известно, что лантан при введении его в количестве 0,2...0,8 % дает сильное измельчение зерна и повышает прочность сплавов системы магний–цинк. Этот сплав имеет хорошую пластичность в горячем состоянии и удовлетворительную свариваемость. В работе использовали образцы из этого сплава в виде листов толщиной 2, 5 и 10 мм.

Сплав ВМД-6 — новый высокопрочный деформируемый магниевый сплав. Он несвариваемый, применяется для высоконагруженных деталей. В работе использовали образцы из сплава ВМД-6 в виде дисков толщиной 6 мм, которые вырезали из прутка диаметром 160 мм.

Сплав ИМВ-2 относится к серии сверхлегких конструкционных сплавов на основе Mg–Li, имеет низкую плотность (1,6 г/см³), высокую удельную жесткость и хорошую свариваемость дугowymi способами. Кроме того, сплавы системы Mg–Li имеют высокую сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке и мало чувствительны к водородной пористости. Однако наличие в сплаве большого количества лития, имеющего большое сродство к кислороду, требует тщательной защиты жидкого металла сварочной ванны и разогретых прилегающих участков основного металла от окружающего воздуха, для чего при дуговой сварке рекомендуют использовать поддув аргона со стороны проплава.

При отработке режимов и техники электронно-лучевой сварки перечисленных выше магниевых сплавов использовали образцы толщиной 12 мм. Свойства исследуемых сплавов приведены в табл. 2.

В процессе проведения исследований все приведенные марки сплавов сваривали без присадочных материалов. Сборку образцов под сварку осуществляли с минимально возможными зазорами. Подготовку свариваемых кромок под сварку выполняли путем шабрения на глубину до 0,1 мм. Перед этим образцы подвергали обезжириванию органическими растворителями.

Сварку заготовок сплавов МА2-1 и ВМД-3 толщиной 100 мм и более, длиной 450 мм выполняли с использованием источника питания ЭЛА-60/60 с ускоряющим напряжением 60 кВ и током пучка до 1 А.

Режимы сварки соединений различных марок магниевых сплавов, обеспечивающие полную глубину проплавления при минимально необходимой мощности, приведены в табл. 3.

Электронно-лучевую сварку указанных сплавов выполняли как статическим, так и вращающимся по окружности лучом. Частоту колебаний принимали равной 300 Гц, амплитуду 1,5 мм.

Свойства соединений определяли на круглых образцах по ГОСТ 6996–66 тип II, ударную вязкость – на образцах с надрезом типа Менаже.

Визуальный контроль за процессом электронно-лучевой сварки магниевых сплавов позволил установить, что в зависимости от системы легирования поведение жидкого металла сварочной ванны различно. Так, при сварке сплавов МА2-1 и ВМД-3 с полным проплавлением и сплава ИМВ-2 с полным и неполным проплавлением процесс протекает спокойно, без выплесков и разбрызгивания жидкого металла. В сварных швах в этом случае наблюдаются дефекты формирования в виде подрезов глубиной 2-3 мм с двух сторон верхнего валика вдоль зоны сплавления (рис. 1).

Таблица 3. Параметры режимов сварки магниевых сплавов различной толщины ($U_{\text{иск}} = 60$ кВ)

Сплав	Толщина, мм	Ток пучка, мА	Скорость сварки, м/ч
МА2-1	20	80	45
МА2-1	135	430	15
МА2-1	165	430	10,5
ВМД-3	10	45	55
ВМД-3	7	30	24
ВМД-3	11	40	24
ВМД-3	135	450	14
ВМД-6	7,5	40	48
ВМД-6	7,5	30	33
ИМВ-2	10	22	24
ИМВ-2	12	27	24

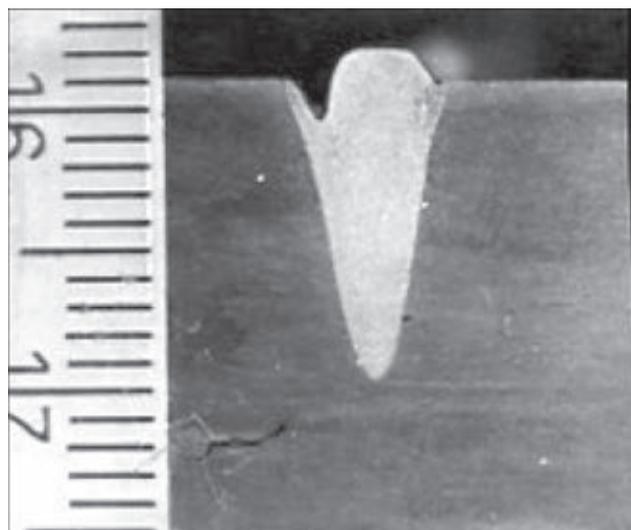


Рис. 1. Макрошлиф сплава МА2-1 при неполном проплавлении

При электронно-лучевой сварке обнаружили еще одну особенность в формировании соединений, которая свойственна только магниевым сплавам. Заключается она в том, что при сварке с полным проплавлением практически во всех случаях со стороны корня шва происходит выдувание жидкого металла давлением паров в кратере. В результате образуется подрез глубиной до 3,5 мм (рис. 2). С ростом толщин свариваемых заготовок глубокие подрезы формируются как со стороны корня швов, так и со стороны верхнего валика (рис. 2, а). Для устранения этих дефектов применяются верхняя и нижняя удаляемые после сварки подкладные планки (рис. 3).

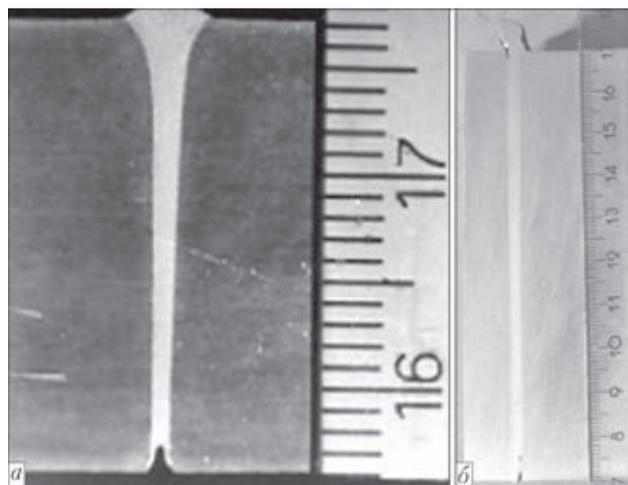


Рис. 2. Формирование корневой части шва глубиной 20 (а) и 100 мм (б) при ЭЛС сплава МА2-1 с полным проплавлением

В процессе проведения исследований все сварные соединения из магниевых сплавов подвергали рентгенографическому контролю для обнаружения внутренних дефектов. Результаты анализа показали, что при электронно-лучевой сварке исследуемых сплавов магния поры и трещины не образуются. Не обнаружены трещины даже на заготовках из сплава ВМД-6, которые по своему конструктивному оформлению соответствуют одному из наиболее сложных вариантов круговой пробы для определения склонности к трещинообразованию. Результаты исследований свойств соединений магниевых сплавов представлены в табл. 4. Соединения всех приведенных сплавов после сварки термообработке не подвергались.

Таблица 4. Механические свойства сварных соединений магниевых сплавов

Марка сплава	Толщина свариваемого металла, мм	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV, Дж/см ²
МА2-1	20	$\frac{250,1...250,7}{250,4}$	$\frac{210,2...250,3}{230,6}$	$\frac{8,0...12,5}{10,4}$	0,5
МА2-1	135	$\frac{250,8...270,6}{260,9}$	$\frac{120,2...130,4}{120,8}$	$\frac{11,7...16,7}{15,2}$	$\frac{0,75...1,0}{0,85}$
ВМД-3	10	$\frac{250,6...270,9}{260,8}$	$\frac{220,5...230,4}{220,7}$	$\frac{5,2...8,4}{7,5}$	0,4
ВМД-3	135	$\frac{220,3...250,9}{240,5}$	$\frac{220,0...240,8}{230,2}$	6,7	0,5
ВМД-3	135	$\frac{260,3...270,2}{260,85}$	$\frac{250,2...260,3}{250,6}$	5,4	0,5
ИМВ-2	12	$\frac{200,5...220,4}{210,8}$	$\frac{170,8...180,1}{10,8}$	4,0	0,3...0,7
ВМД-6	7,5	$\frac{200,6...200,8}{200,6}$	Разрушение за базой	-	0,4

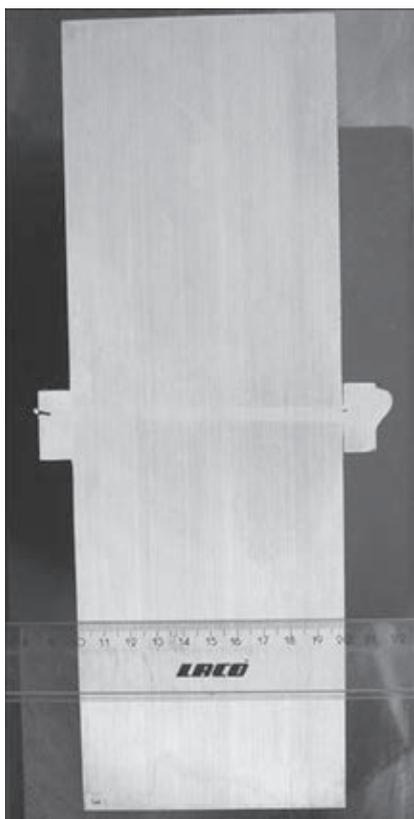


Рис. 3. Формирование швов при ЭЛС сплава МА2-1 с двумя подкладными планками

Анализ результатов механических свойств разрушенных образцов показал, что на сплавах ИМВ-2 и ВМД-6 разрушение во всех случаях происходило по основному металлу на расстоянии 10...15 мм от оси шва. При этом различия в значениях временного сопротивления для листов из

сплава ИМВ-2 толщиной 10 и 12 мм не обнаружено. Разрушение образцов из сплавов МА2-1 и ВМД-3 происходило большей частью по металлу шва. При ЭЛС сплава МА2-1 толщиной 135 мм и последующей вырезке образцов из различных участков швов по глубине анизотропии прочностных характеристик в шве не было обнаружено.

Ударная вязкость соединений (металл шва и зона термического влияния) для исследованных марок сплавов находится на уровне аналогичных характеристик для основного металла.

Коэффициент прочности соединений для сплавов ИМВ-2 и ВМД-6 практически равен единице. Для сплавов МА2-1 и ВМД-3 он находится в пределах 0,95...1,0, а для ВМД-3 – 0,75...0,85.

Анализ микроструктуры различных участков соединений магниевых сплавов показал, что структура металла шва при электронно-лучевой сварке практически не отличается от той, которая имеет место для сплавов в литом состоянии. Учитывая высокие скорости кристаллизации при электронно-лучевой сварке, наблюдается несколько меньше величина зерна и толщина межзеренных прослоек по сравнению со структурой швов, которая имеет место при дуговых способах сварки [8]. Видимых дефектов в металле шва на сплавах МА2-1, ВМД-6, ИМВ-2 при этом не обнаружено (рис. 4).

В металле ЗТВ на участке, примыкающем к зоне сплавления, наблюдается рекристаллизация исходной структуры основного металла с образованием равноосных зерен. Однако при этом сохраняется общая направленность текстуры основного

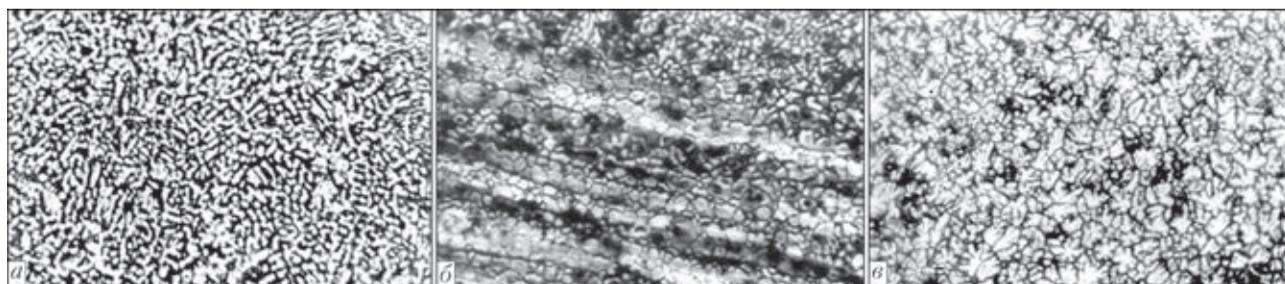


Рис. 4. Микроструктура ($\times 150$) металла шва сплавов МА2-1 (а), ВМД-6 (б) и ИМВ-2 (в)

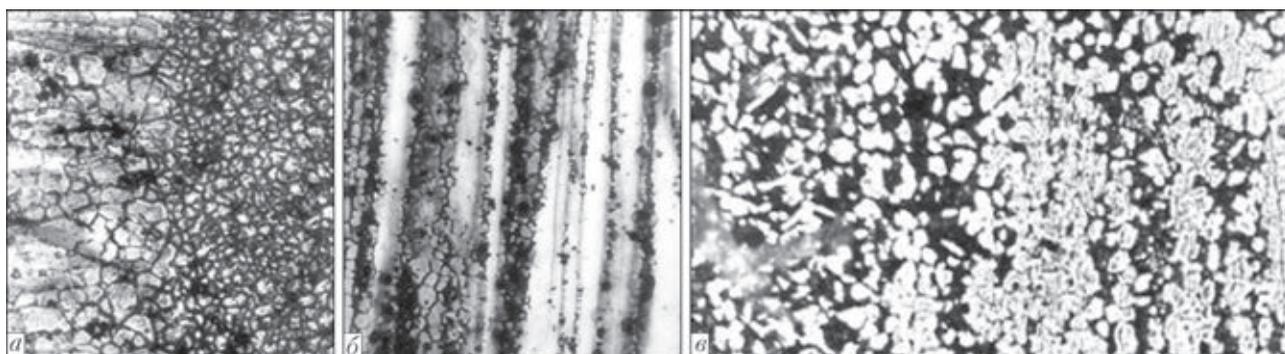


Рис. 5. Микроструктура ($\times 150$) соединений сплавов МА2-1 (а), ВМД-6 (б) и ИМВ-2 (в) в зоне сплавления

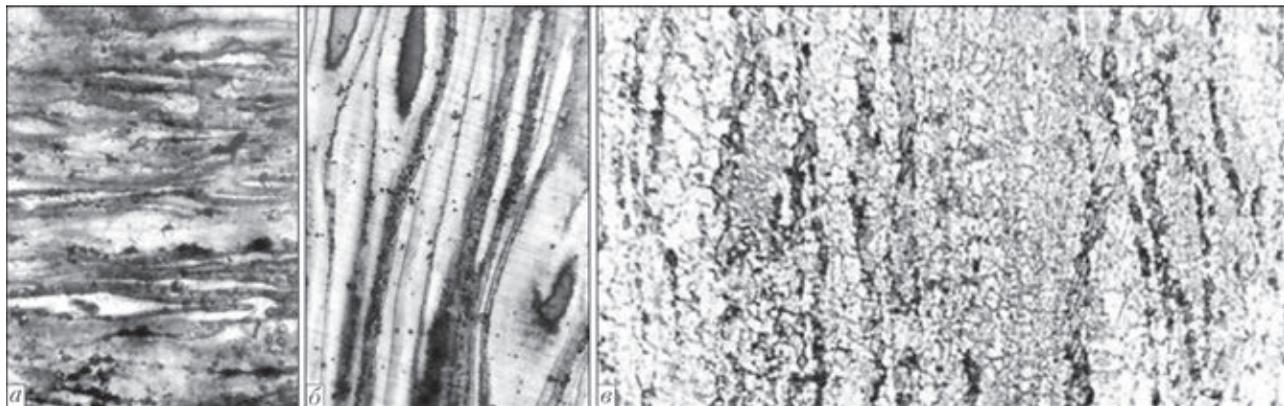


Рис. 6. Микроструктура ($\times 150$) основного металла сплавов МА2-1 (а), ВМД-6 (б) и ИМВ-2 (в)

металла (рис. 5). Утолщение межзеренных прослоек с выделением легкоплавкой эвтектики в металле ЗТВ примерно в 3-5 раз выше, чем в основном металле.

На рис. 6 для сравнения представлена структура основного металла сплавов МА2-1, ВМД-6 и ИМВ-2.

Выводы

1. Проведены комплексные исследования свариваемости электронным лучом в вакууме магниевых сплавов, включая высокопрочные магниеволитиевые сплавы.

2. Установлено, что для обеспечения высокого качества формирования и прочностных свойств соединений сварку необходимо выполнять сканирующим электронным лучом при частотах 200...700 Гц и амплитудой 1,5...2,5 мм.

3. Показано, что прочностные характеристики сварных соединений высокопрочных магниевых сплавов находятся на уровне не ниже 95 % аналогичных свойств основного металла.

4. Рекомендуется для предупреждения образования дефектов в виде занижения поверхности

швов или выдувания жидкого металла с обратной стороны шва использовать при подготовке стыковых соединений к сварке накладки и подкладки под стыком из того же металла при толщине не менее 5...10 мм.

1. *Магниевые сплавы: Справочник.* В 2 т. – М.: Металлургия, 1978. – Т. 1: Металловедение магния и его сплавов / Под ред. М. Б. Альтмана, А. Ф. Белова, В. И. Добаткина и др. – 232 с. – Т. 2: Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов / Под ред. И. И. Гурьева, М. В. Чухрова. – 296 с.
2. *Рохлин Л. Л., Никитина Н. И., В. А. Волченкова.* Исследование богатых магнием сплавов Mg–Al₂Cu // *Металлы.* – 2006. – № 2. – С. 104–108.
3. *Дриц М. Е.* Магниевые сплавы для работы при повышенных температурах. – М.: Наука, 1964. – 231 с.
4. *Воздвиженский В. М., Грачев В. А., Скаский В. В.* Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
5. *К вопросу об электронно-шлаковой сварке сплавов магния:* Сб. «Магниевые сплавы». – М.: Наука, 1978. – С. 183–187.
6. *Эйдензон М. А.* Металлургия магния и других легких металлов. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
7. *Магниевые сплавы:* Сб. ст. Ин-та металлургии им. А. А. Байкова. – М.: Наука, 1978. – 223 с.
8. *Бондарев А. А., Нестеренков В. М.* Исследование свариваемости магниевых сплавов МА2 электронным лучом в вакууме // *Компрессорное энергетическое машиностроение.* – 2013. – № 2. – С. 21–28.

Поступила в редакцию 10.07.2013



ЗАО "ПСКОВЭЛЕКТРОСВАР"

ТЯЖЕЛОЕ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

На ЗАО «Псковэлектросвар» в период с 24 по 26 июня 2014 г. состоится Международная научно-техническая конференция «Трубопроводы в России и за рубежом — их настоящее и будущее».

Предполагается участие в работе конференции представителей ведущих предприятий и организаций, связанных с производством трубной продукции, сваркой, контролем, ремонтом и эксплуатацией трубопроводов, их диагностикой. Предусмотрена также широкая демонстрационная программа показа сварочного оборудования и техники для неразрушающего контроля.

Контакты: тел. 007(8112)700 134 В. М. Александров