



Национальный проект «Образование. Новые возможности  
для каждого»

Обучение граждан по программам непрерывного образования.



## **Цифровые технологии и автоматизация в современном сварочном производстве**

# **Оборудование и технология для гибридной лазерно-дуговой сварки сталей и алюминиевых сплавов**



Декабрь, 2020 года , Пенза

---

# ЛАЗЕРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ (Резка)

## Российско-германский центр лазерных технологий



### Основные преимущества:

- высокая производительность
- высокая точность воспроизведения контура
- малая ширина и высокое качество реза
- широкий диапазон толщин и материалов
- вырезка по трехмерным траекториям

### Основные недостатки:

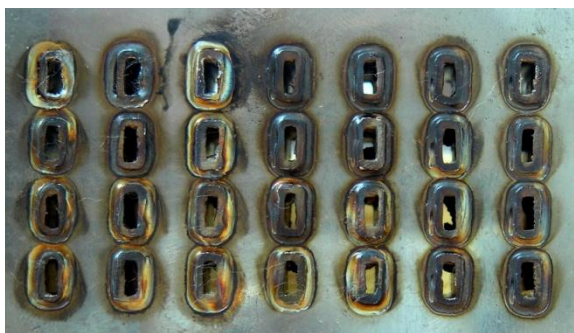
- высокая стоимость оборудования
- недостаток квалифицированного персонала

# ЛАЗЕРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ (СВАРКА)

## Российско-германский центр лазерных технологий



Роботизированный комплекс для сварки со сканированием



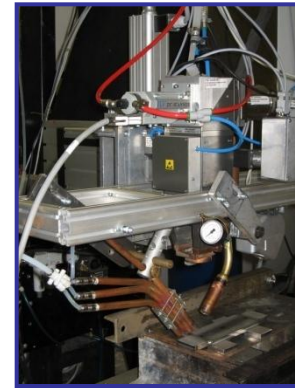
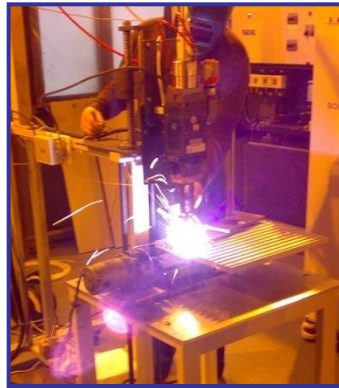
Сварка трубных решеток



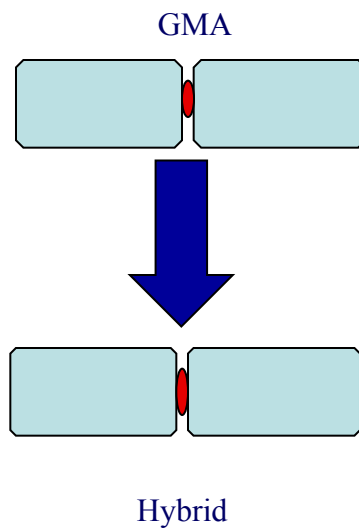
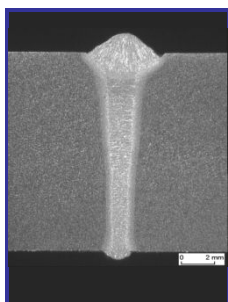
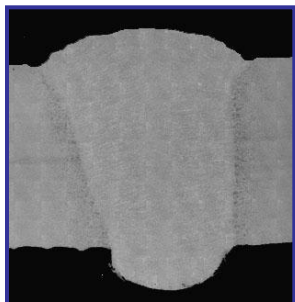
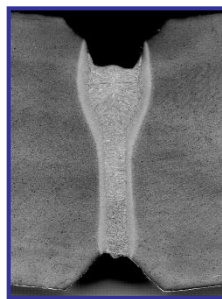
Сварка разнородных материалов (сталь и титан)



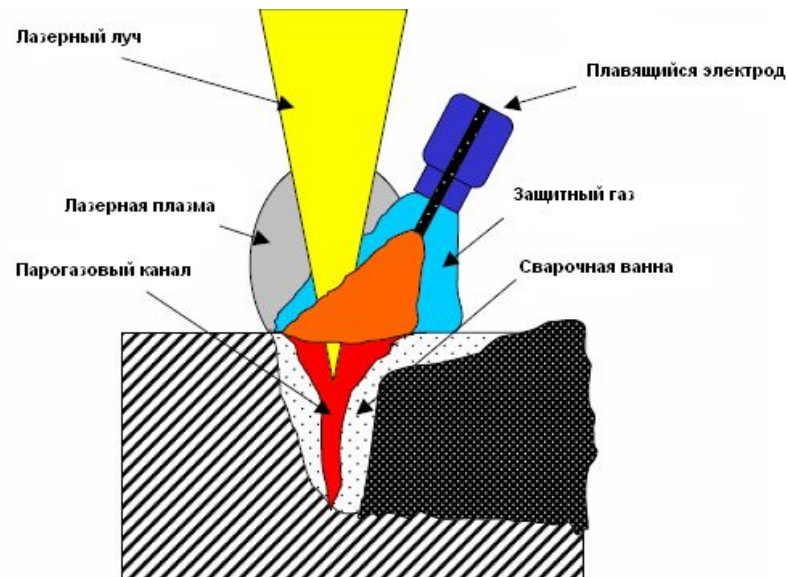
Сварка тел вращения



### Сравнение сварки погруженной дугой и лазерно-дуговой сварки



### Схема лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом



- Практически установлены диапазоны изменения геометрии разделки на свариваемых листах.
- Установлен диапазон изменения режимных параметров лазерной и гибридной сварки в широком диапазоне изменения скорости сварки для достижения требуемых механических свойств сварного соединения.
- Установлена возможность сварки по контролируемому зазору для достижения максимальной глубины проплавления во всех пространственных положениях.
- Совместно с ЗАО НПФ «ИТС» установлены диапазоны использования лазерного процесса (сварка корневого слоя шва) и автоматического дугового процесса (заполняющие и облицовочные слои шва) при сварке больших толщин.
- Установлены требования к металлопорошковой проволоке для использования при гибридном и лазерном процессе сварки.
- Единственные в России имеем более чем 3-годовой практический опыт лазерной и гибридной сварки с использованием 15-кВт оптоволоконного лазера.

### **Вопросы для решения**

- Технологические исследования процесса лазерной двухлучевой и лазерно-дуговой сварки высокопрочных судостроительных сталей больших толщин в различных пространственных положениях;
- Разработка модели и моделирование процесса лазерной двухлучевой и лазерно-дуговой сварки, определение методов испытаний, режимных параметров сварки и сварочных материалов;

# Моделирование гибридной лазерно-дуговой сварки

**Input parameters**

Regim parameters | Material properties | Geometry of seam

h1, mm: 100  
h2, mm: 300  
b1, mm: 200  
b2, mm: 200

h1, mm: 100  
h2, mm: 100  
b1, mm: 300  
b2, mm: 300  
c1, mm: 100  
c2, mm: 100

h1, mm: 10  
h2, mm: 200  
b1, mm: 300  
b2, mm: 100

**Alloy directory**

IDNumber	Material	Melting point, K	Boil
1	TSIE335	1810	
1.0	Crane10	1756	
1.002	Crane_25	1725	
1.003	Crane_30	1725	
1.004	Crane_40	1703	
1.0601	AlSi1060	1647	
1.1165	AlSi1330	1725	
1.1165	AlSi1330H	1725	
1.1167	AlSi1335H	1703	
1.1172	AlSi1030	1725	
1.1186	AlSi1040	1703	
1.1191	AlSi1045 (Cm45)	1703	
1.3505	AlSiE52100	1647	
1.4016	AlSiType430	1714	
1.4021	AlSiType420	1756	

**Welding Work Table [mm/min]**

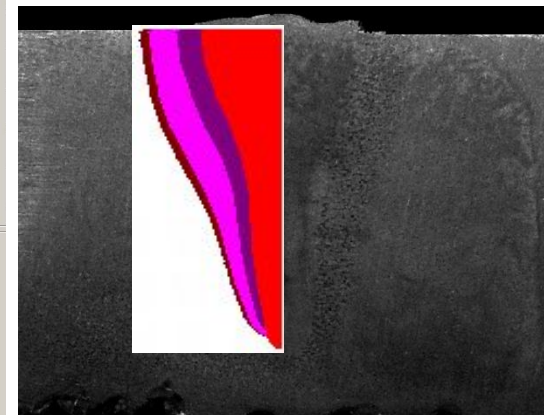
Layer Parameters:  
Wave length: 10.6  
Radiation power, kW: 3  
Welding speed, cm/sec: 1  
Aperture, cm: 2  
Focal radius, cm: 0.02  
Focal distance, cm: 15  
Focal exceeding, cm: 0

Lamp Parameters:  
Lamp radiation power, kW: 3  
Heat spot diameter of lamp, mm: 3  
Shaft, mm: 3  
Slot Aperture, mm: 0  
Slot Aperture, mm: 2  
Lamp Gas: Argon

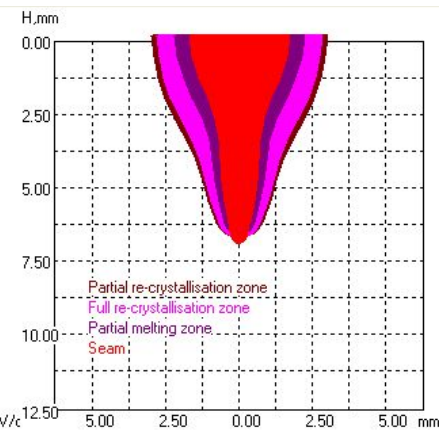
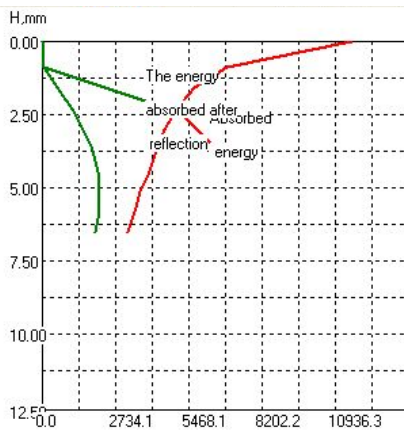
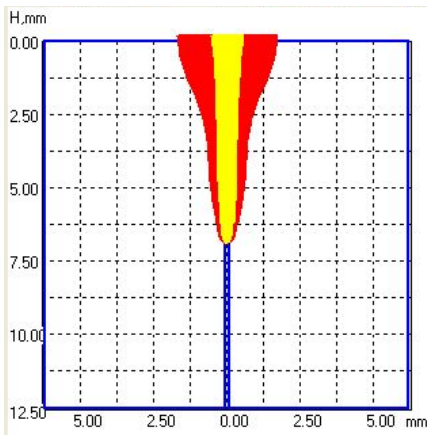
Hybrid Laser-Lamp Welding  
Absorbed energy: 2483 W  
This is unstable through penetration  
Reflection energy/losses: 0 W  
Vapour flow speed: 238.4 m/sec  
Wall temperature: 3171 K  
Channel is present  
Sample thickness: 100.00 mm  
Depth: 0.81 cm  
Width on the Surface: 0.48 cm  
Width on the half of Depth: 0.14 cm  
Melted zone square: 0.25 cm<sup>2</sup>  
Seam: lap joint  
Material: Low-carbon steel

Melting Point= 933.1  
Boiling Point= 2793  
Heat capacity= 0.917  
Density= 2.7  
Thermal conductivity= 239  
Surface tension= 534  
Thermal surface tension= -0.35  
Latent evaporation heat= 230.8

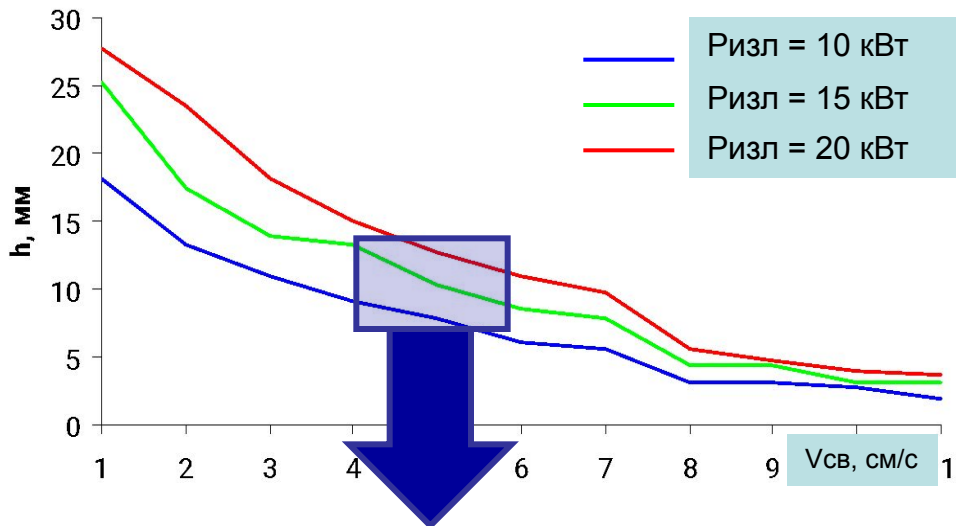
LaserCAD v 4.0



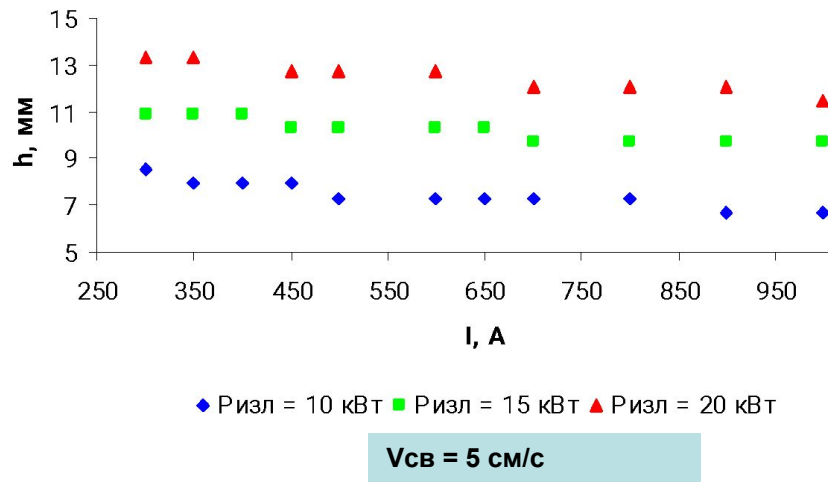
$W=4,5 \text{ kW}$ ,  $v= 15 \text{ mm/s}$ ,  
материал – сталь 10



### Зависимость глубины проплавления от скорости сварки



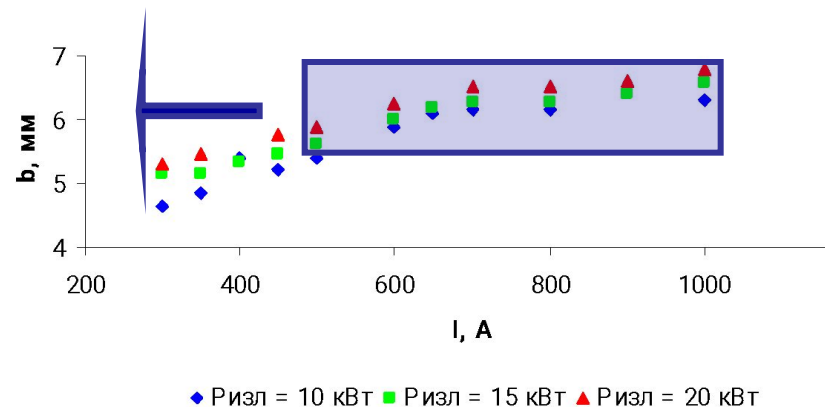
### Зависимость глубины проплавления от тока дуги



### Диапазон технологических параметров сварки металлов больших толщин

Толщина металла	более 12 мм
Скорость сварки	~3 м/мин (5 см/с)
Мощность лазерного излучения	12кВт – 15 (20) кВт
Ток электрической дуги	500А –1000 А

### Зависимость ширины зоны проплавления от тока дуги

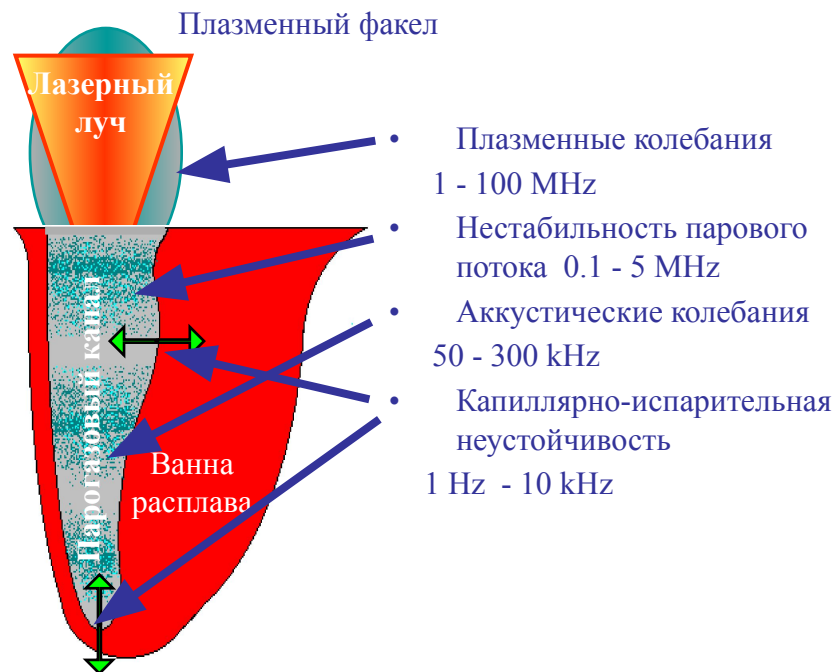
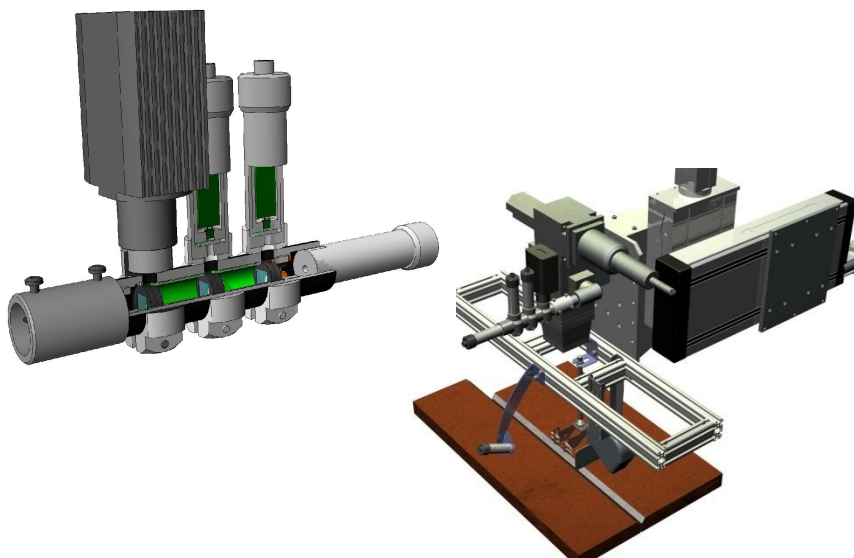


# Исследование динамического поведения сварочной ванны при гибридной сварке мощным волоконным лазером

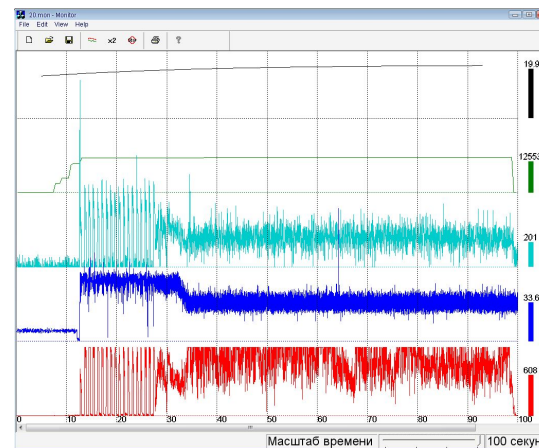


Квазипериодические волны закристаллизовавшегося расплава на нижней поверхности сварного шва. Материал – сталь 09Г2С, мощность излучения 15 кВт, скорость сварки 2.4 м/мин.

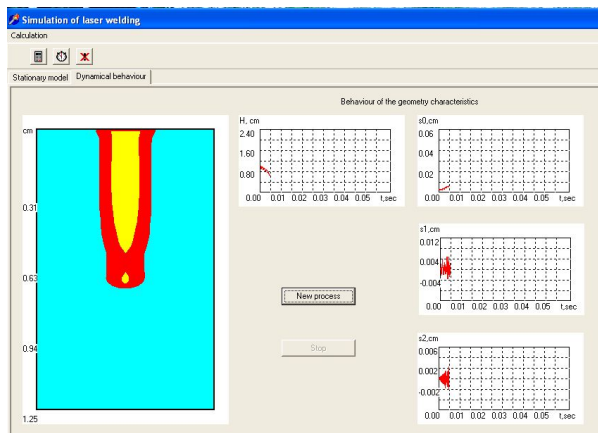
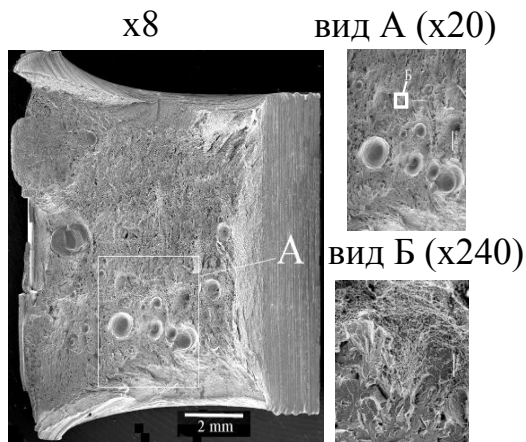
## Система мониторинга



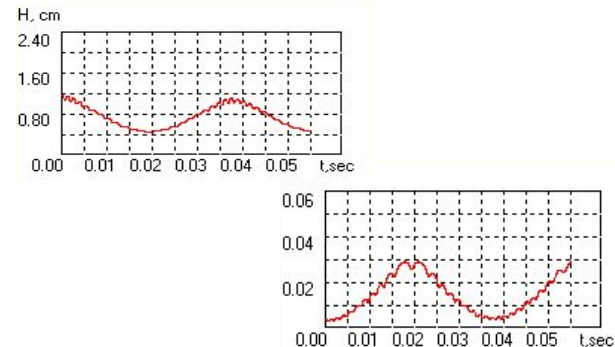
## Графический интерфейс системы мониторинга





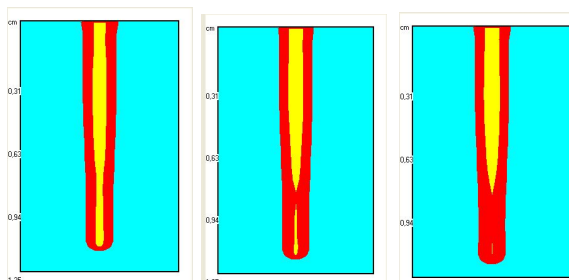


### Поведение геометрических характеристик сварочной ванны



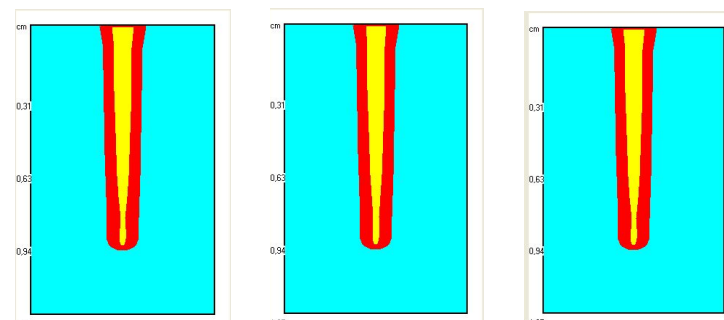
### Моделирование поведения парогазового канала

#### Моделирование схлопывания парогазового канала



Расчет с шагом 2 мс.  
 Мощность излучения 15 кВт,  
 скорость сварки 4 см/с,  
 фокальный радиус 0,2 мм,  
 фокусное расстояние 300 мм,  
 материал – сталь класса X80

#### Стабилизация канала за счет высокочастотного кругового сканирования. Радиус сканирования 0,2 мм.



Расчет с шагом 3 мс. Мощность излучения 15 кВт,  
 скорость сварки 4 см/с, фокальный радиус 0,2 мм,  
 фокусное расстояние 300 мм, материал – сталь класса X80



Лазерно-дуговой технологический комплекс

Рабочий инструмент (гибридный лазерно-дуговой модуль)

Подсистема «Лазерное оборудование»

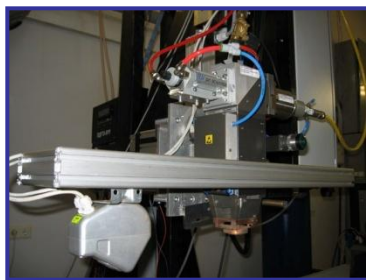
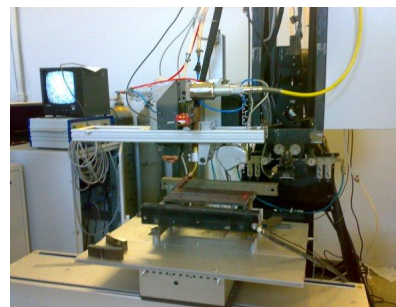
Подсистема «Дуговое оборудование»

Подсистема «Мониторинг»

Подсистема «Геометрическая адаптация»

Сварочный манипулятор

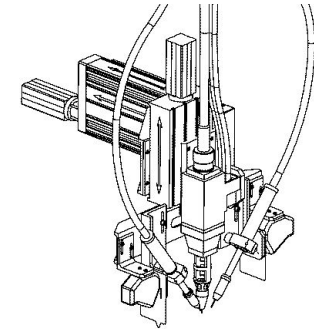
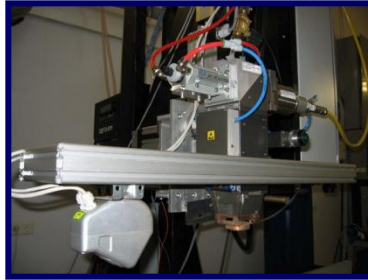
САУ



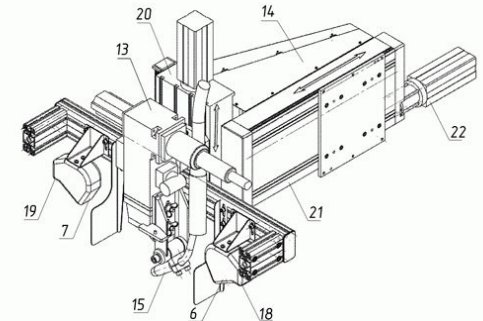
- 15 kW волоконный лазер
- 30 м 200 мкм световод
- Дуговой источник ВД506 ДК (ВДУ-1500 DC)
- Сварочная проволока диаметром до 4 мм
- ЧПУ
- Система наведения на стык
- On-line мониторинг

# Разработка технологического оборудования

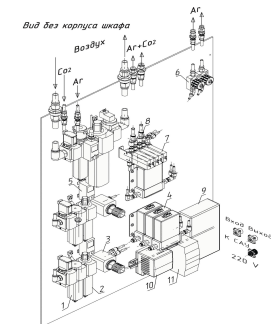
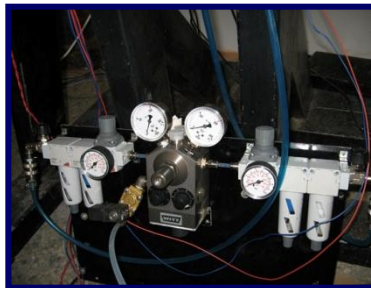
## Сварочная головка



## Система наведения и позиционирования головки

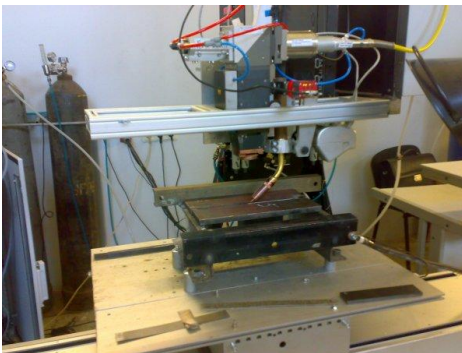
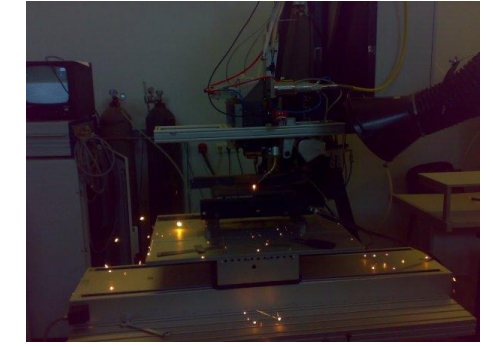
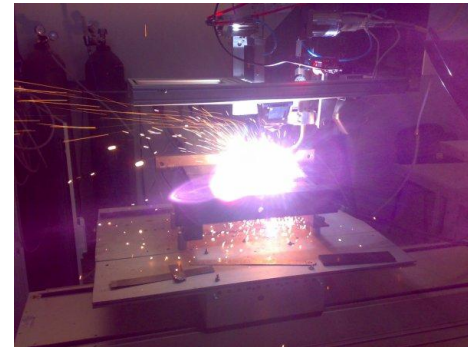
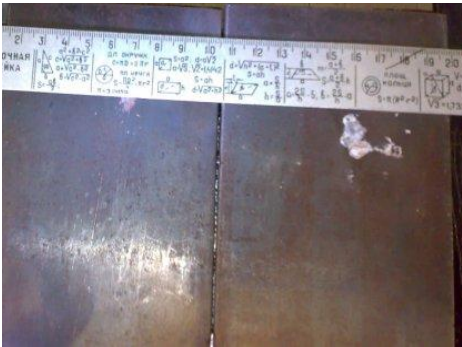


## Система газораспределения



# Сварочные эксперименты

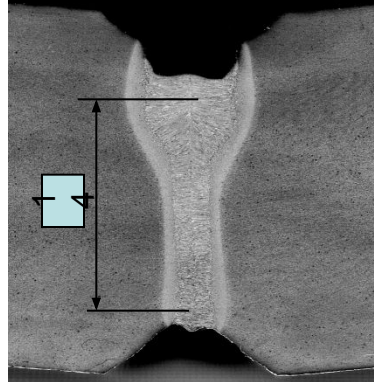
$P=14,5 \text{ kW}$ ,  $I=440 \text{ A}$ ,  $V=15 \text{ m/min}$ ,  $v=1.2 - 3 \text{ m/min}$ ,  $\Delta=0-2 \text{ mm}$



## Гибридная лазерно-дуговая сварка

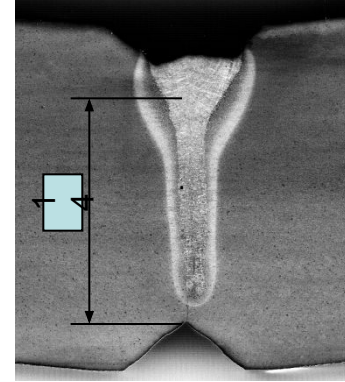
P=12,5 кВт

V=1,5 м/мин, I=250...  
280А,  
U=27,5В



22

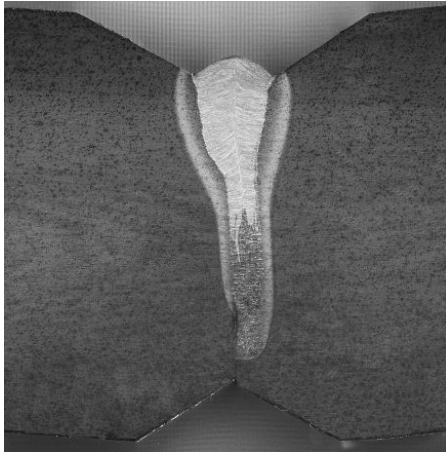
V=1,8 м/мин, I=250...  
280А,  
U=27,5В



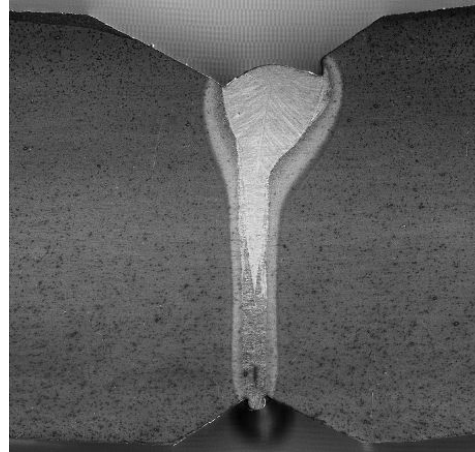
P=12,5 кВт

Толщина образца 15 мм.

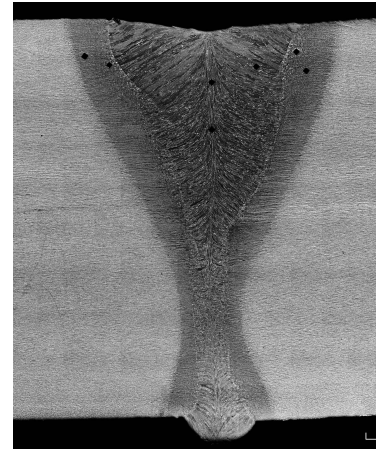
P=15 кВт



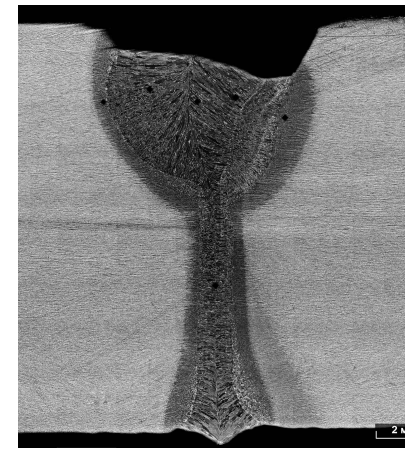
V=2,5 м/мин, I=460...  
480А,  
U=24 В



V=2,2 м/мин, I=460... 480А,  
U=24 В

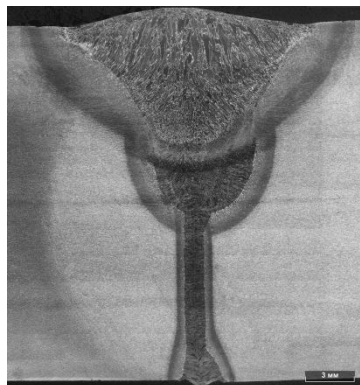


V=2 м/мин, I=650А,  
U=32 В



V=2,2 м/мин, I=650А,  
U=32 В

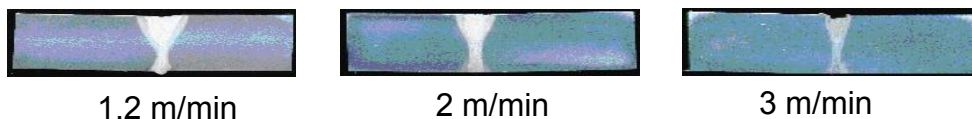
Металлопорошковая проволока POWER BRIDGE 60M Ø1,6 мм



Влияние зазора, 3 m/min



Влияние скорости сварки, 0.5 mm



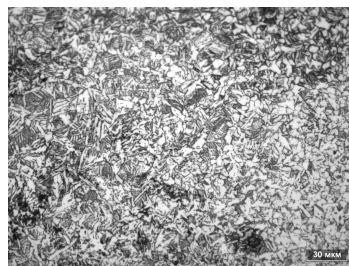
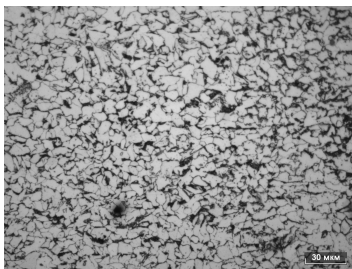
Влияние сканирования, 2.2 m/min, 400 Hz, 0.5 mm, 1.5 mm зазор



### Экономическая эффективность

	MAG	Hybrid
Число проходов	5	3
Производительность за смену	860 м	1400 м
Сварочные газы	24000 l/shift	4800 l/shift
Стоимость оборудования	1 000 000 €	2 000 000 €
Энергопотребление	100 кВт	50 кВт
Сварочные материалы	3 кг/м	1 кг/м

# Металлография сварного соединения



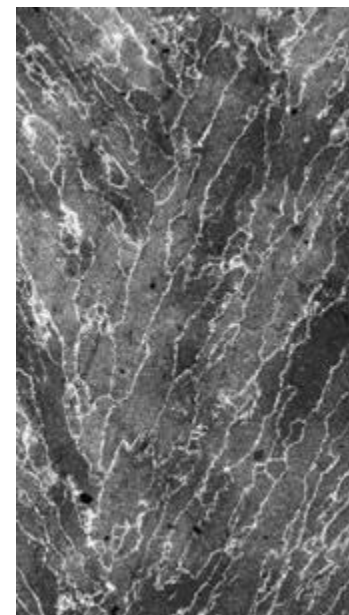
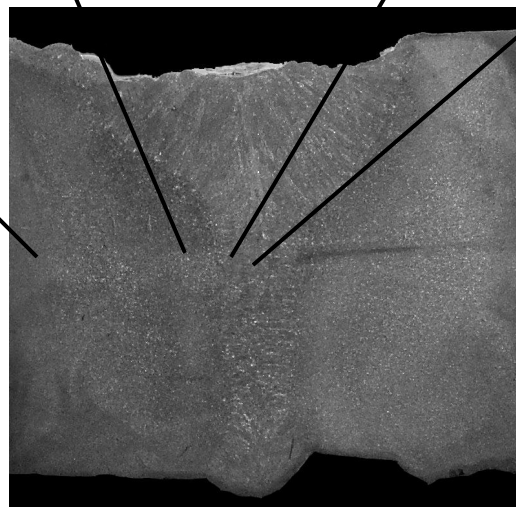
Основной металл

Переходная зона

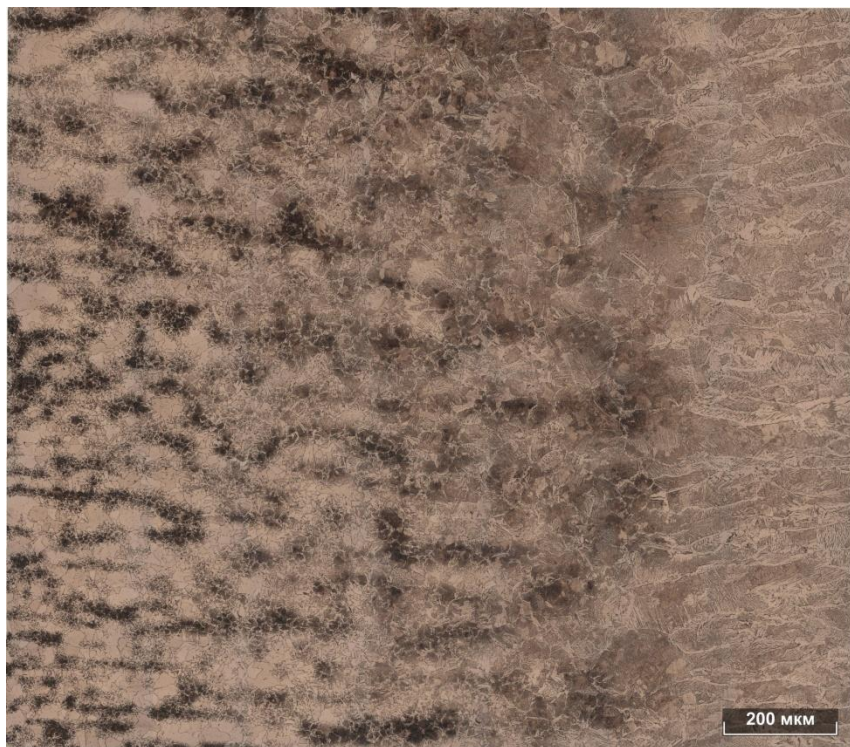
Переходная зона

Центральная зона

Основной металл –  
сталь 10  
Сварочная  
проволока-  
Metal cord  
“Power bridge 60M”  
(Fe, Si, Ni, Ti, B, C)  
© ITS Ltd



**Сварное соединение, выполненное гибридной лазерно-  
дуговой сваркой (мощность лазера 5 кВт).  
Металлопорошковая проволока POWER BRIDGE 60M Ø1,2 мм.**



Структура переходной  
зоны



Структура центральной  
зоны



**Сварное соединение, выполненное гибридной лазерно-дуговой сваркой (мощность лазера 15 кВт). Металлопорошковая проволока POWER BRIDGE 60M Ø1,6 мм, ток дуги 650А, напряжение на дуге 32В. Толщина образца 15 мм.**

<b>№ п/п</b>	<b>Параметры разделки</b>	<b>Наличие технологического шва</b>	<b>Скорость сварки</b>	<b>Скорость подачи проволоки, м/мин</b>	<b>Ударная вязкость KCV<sub>-40</sub> Дж/см<sup>2</sup></b>
3.1	Притупление 6 мм, зазор 0,5 мм, угол фаски 9 град.	Да	2,2 м/мин	22	188,171
1.7	Притупление 9 мм, зазор 0,5 мм, угол фаски 30 град	Нет	2,0 м/мин	22	62,77,83,7 2

# **Химический состав наплавленного металла на шве гибридной лазерно-дуговой сварки**

## **Точка 1 (наплавленный металл)**

**Ni 0.323**  
**Fe 97.504**  
**Mn 1.509**  
**Ti 0.009**  
**Si 0.870**

## **Точка 3 (центр шва глубокого провара)**

**Ni 0.154**  
**Fe 98.47**  
**Mn 1.51**  
**Ti 0.006**  
**Si 0.317**

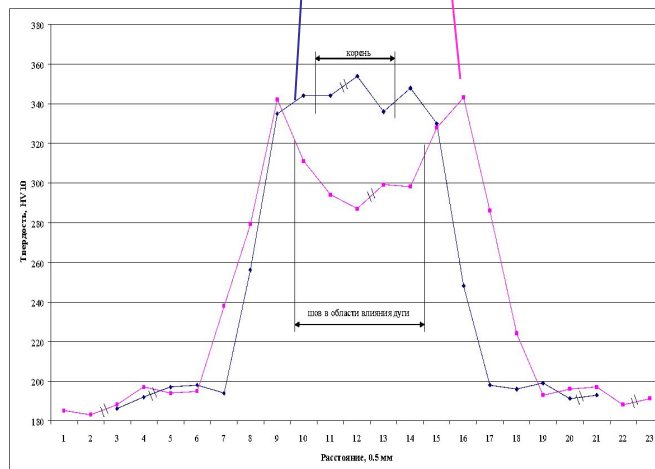
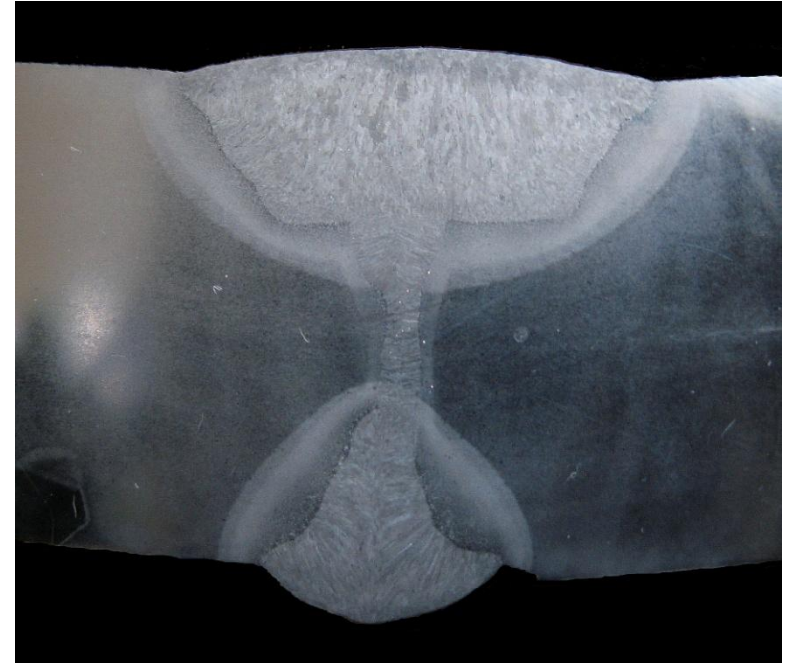
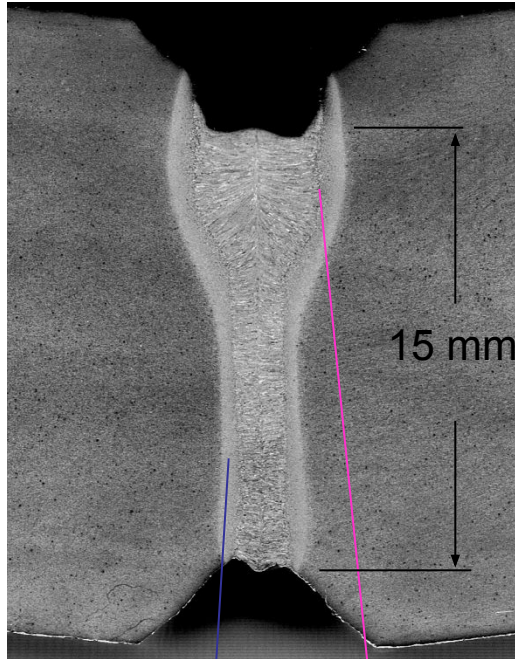
## **Точка 2 (центр шва глубокого провара)**

**Ni 0.248**  
**Fe 97.230**  
**Mn 1.656**  
**Ti 0.003**  
**Si 0.602**

## **Точка 4 (центр шва глубокого провара)**

**Ni 0.157**  
**Fe 97.708**  
**Mn 1.482**  
**Ti 0.015**  
**Si 0.405**

# Сварные швы



Material – X80  
Metal powder filler wire  
Welding speed 3 m/min  
Laser power 12.5 kW  
Arc power 7 kW  
Impact energy (-40 C) 300J

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ





# Проведение испытаний опытных образцов технологической оснастки для лазерной и лазерно-дуговой сварки

Дата	Операция	Материал	Толщина	Оборудование	
16.09.10	Проплавление стыкового соединения	Сплав 1424	10 мм	ЦТЛИ.683413.022	№ 001

Параметры процесса сварки							
Скорость сварки, м/мин	Фокусное расстояние, мм	Мощность излучения, Вт	Расход защитного газа, л/мин	Диаметр присадочной проволоки, мм	Скорость подачи присадочного металла, м/мин	Напряжение, В	Сила сварочного тока, А
3,0	250	8000	30	1,2	11	29	220

№ п.п	1	2	3	4	5	6
X, мм	0	100	200	300	400	500

Положение - нижнее							
Наименование параметра	Зазор, мм, допуск ±20%	0,4	0,42	0,44	0,45	0,47	0,46
		-	в допуске	в допуске	в допуске	в допуске	в допуске
Отклонение от стыка, мм, допуск ±0,2	0,1	0,1	-0,1	0	0,2	0,1	
		в допуске	в допуске	в допуске	в допуске	в допуске	в допуске

Положение - вертикальное							
Наименование параметра	Зазор, мм, допуск ±20%	0,4	0,44	0,45	0,45	0,46	0,47
		-	в допуске	в допуске	в допуске	в допуске	в допуске
Отклонение от стыка, мм, допуск ±0,2	-0,1	-0,1	0,1	0	-0,1	0,1	
		в допуске	в допуске	в допуске	в допуске	в допуске	в допуске

Паспорт шва

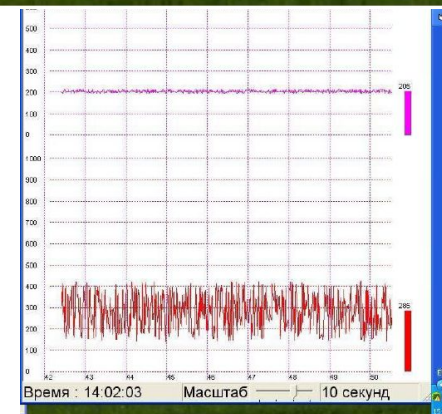
ООО "ЦЛТ"

Дата: 14.09.10    Время: 14:02:03    Оборудование: ЦТЛИ.683413.022 №001

Изделие: Образец №008    Операция: Проплавление стыкового соединения    Положение: Нижнее    Материал: Сплав 1424    Толщина: 10 мм    Нормативный документ: ЦТЛИ.683413.022ПМ (п.п. 4.13-4.17)

Наименование параметра	Установленное значение	Допуск		Измеренное значение	Контроль
		+	-		
<b>Начальное положение</b>					
X1	200,0	-	-	200,0	-
Y1	250,0	-	-	250,0	-
Z1	100,0	-	-	100,0	-
<b>Конечное положение</b>					
X2	720,0	-	-	720,0	-
Y2	250,0	-	-	250,1	-
Z2	100,0	-	-	100,0	-
Скорость сварки, м/мин	0,1	4%	4%	-	Коп. откл. 0
Диаметр присадочной проволоки, мм	1,2	-	-	-	-
Скорость подачи присадочного металла, м/мин	0,4	-	-	-	-
Расход защитного газа, л/мин	30	-	-	31	-
Мощность излучения, Вт	8000	-	-	2990	-
Сила сварочного тока, А	-	-	-	80	-
Напряжение, В	29	-	-	-	-
Фокусное расстояние, мм	250	-	-	-	-

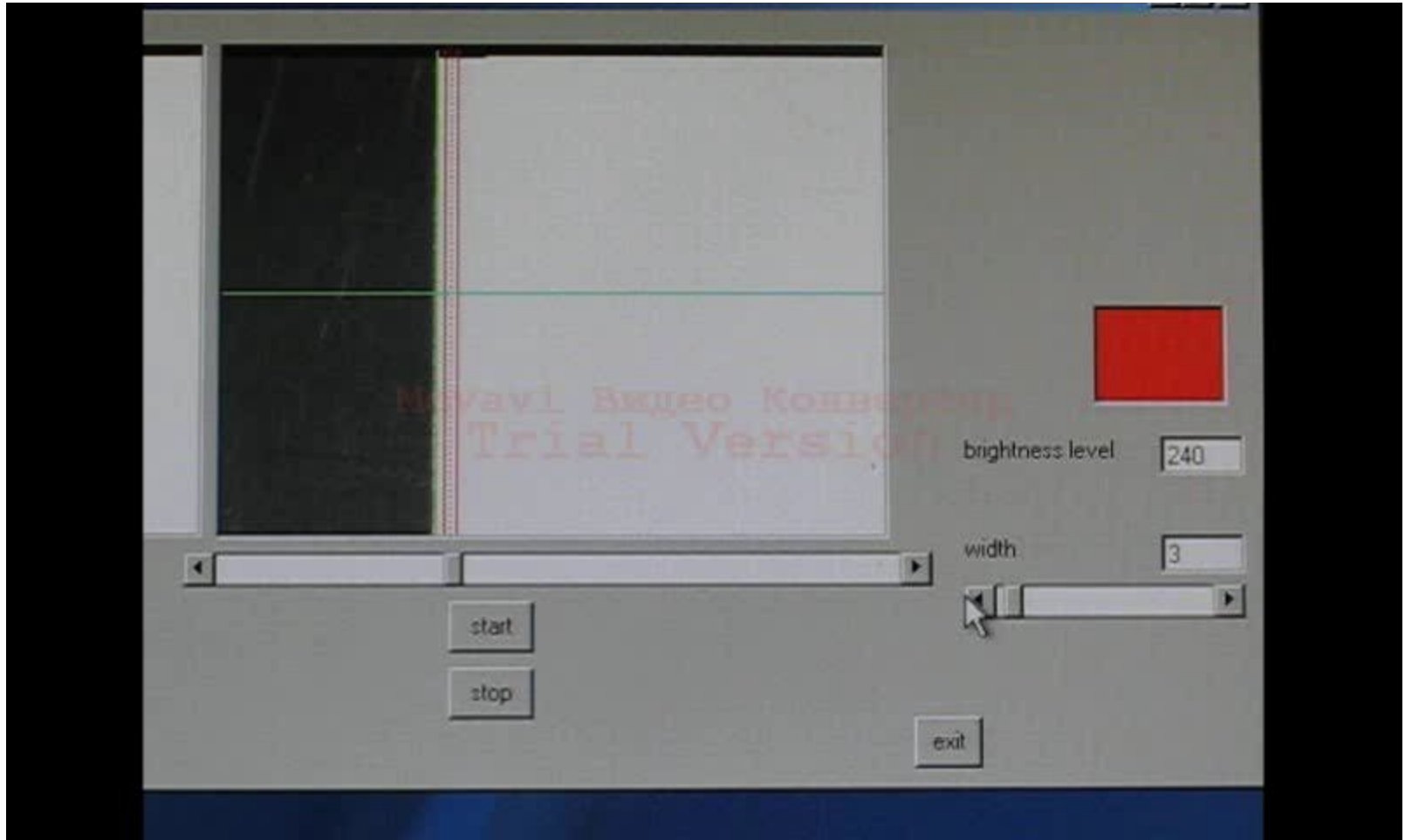
D:\welding\passport\14\_09\_008.xls    Сохранить    Открыть    Выход







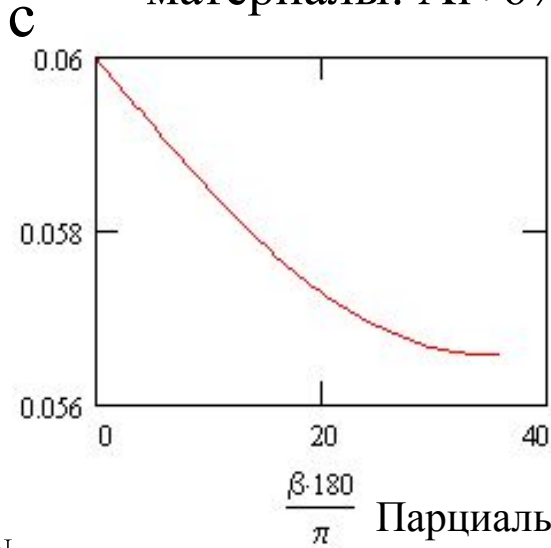
## Проверка взаимной точности позиционирования сварочной головки и свариваемого стыка



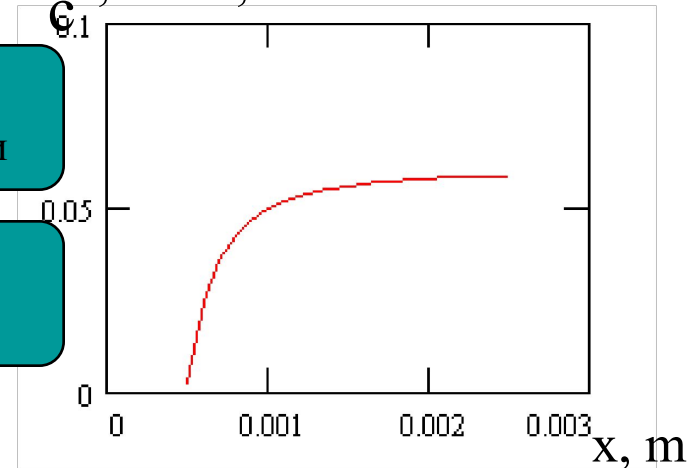


## Влияние испарения и диффузии примесей

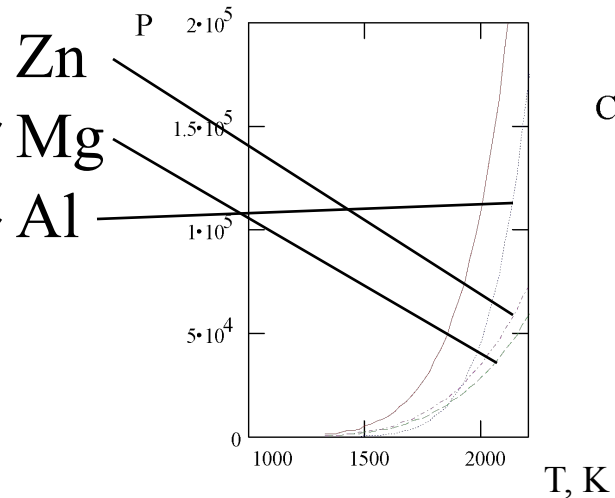
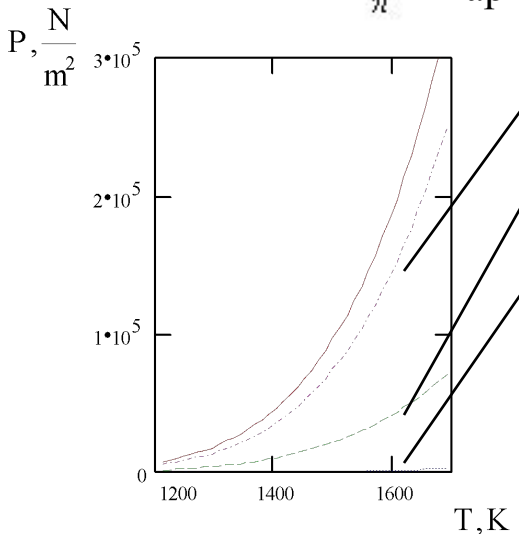
материалы: Al+6%Mg, Al+1%Mg+4.5%Zn, 5 kW, 1cm/c



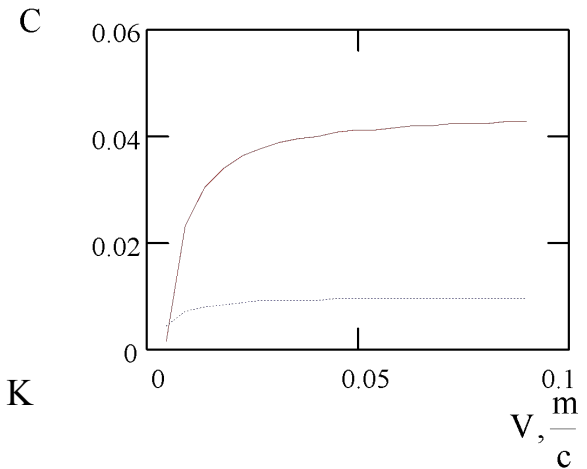
Концентрация Mg вдоль оси шва



Парциальные давления компонентов



Средние концентрации примесей в шве

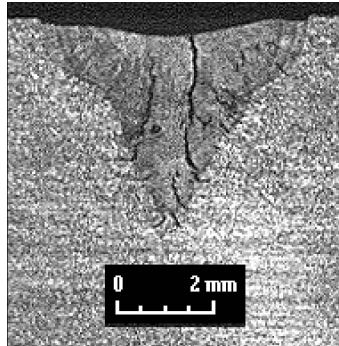


Без учета испарения и диффузии

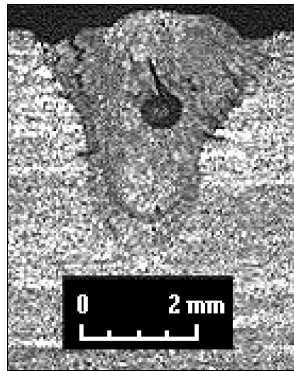
С учетом испарения и диффузии



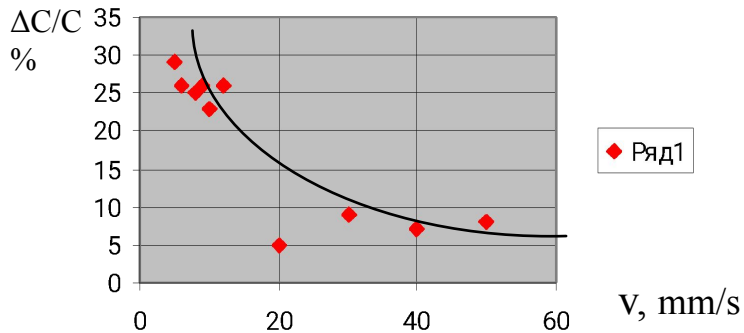
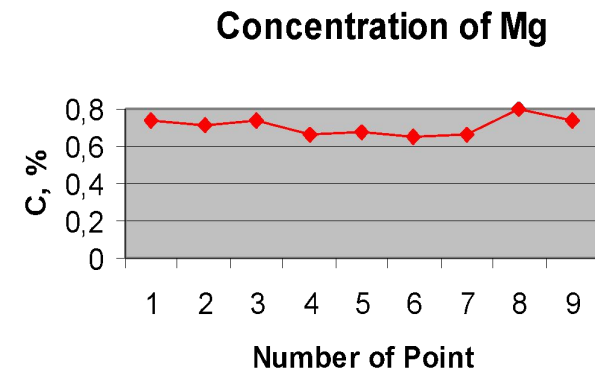
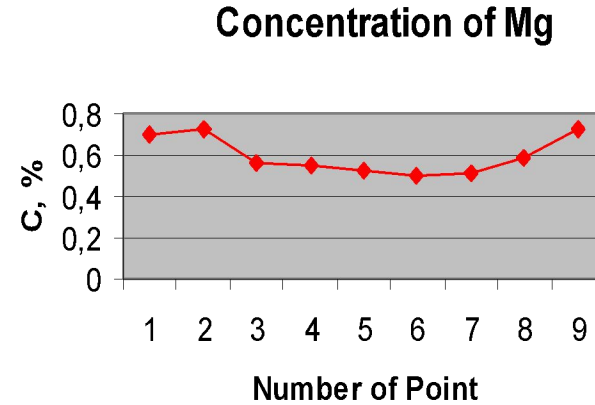
# Экспериментальная проверка результатов математического моделирования



Лазерная сварка  
Al+1%Mg+4.5%Zn  
v=6 мм/с



Лазерная сварка  
Al+1%Mg+4.5%Zn  
v=40 мм/с



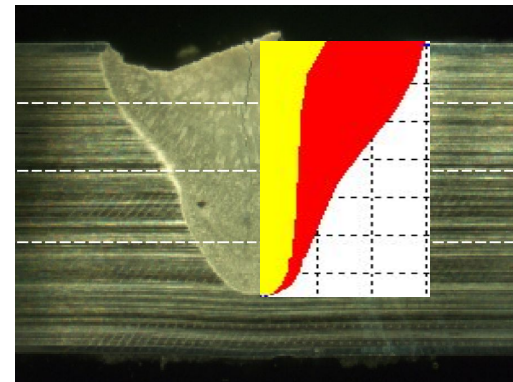
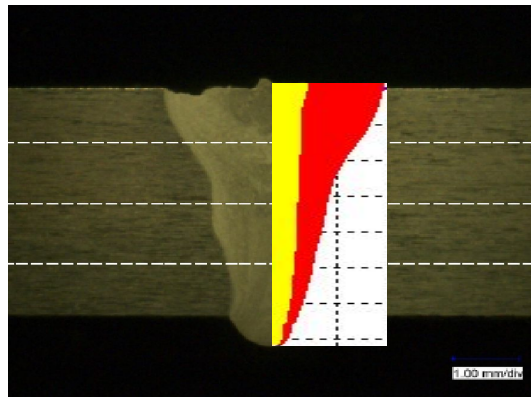
Сравнение экспериментов по испарению Mg с расчетами

# Экспериментальная проверка результатов математического моделирования

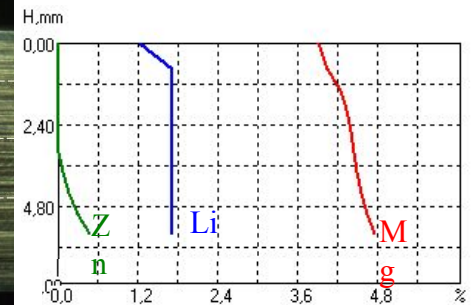
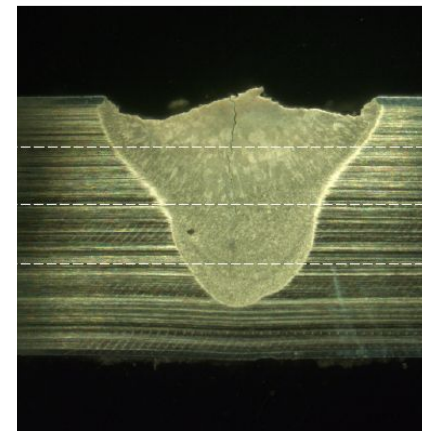
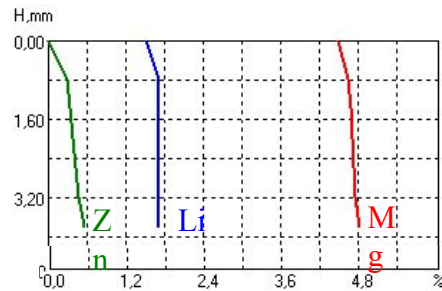
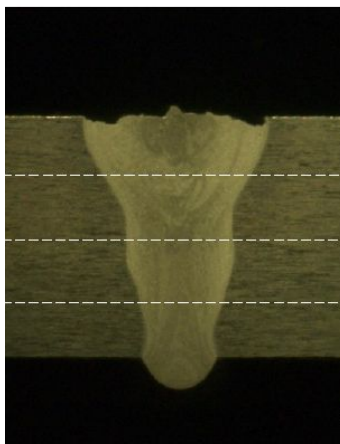


Al-Li

*Формирование сварного соединения*



*Испарение легирующих компонентов*

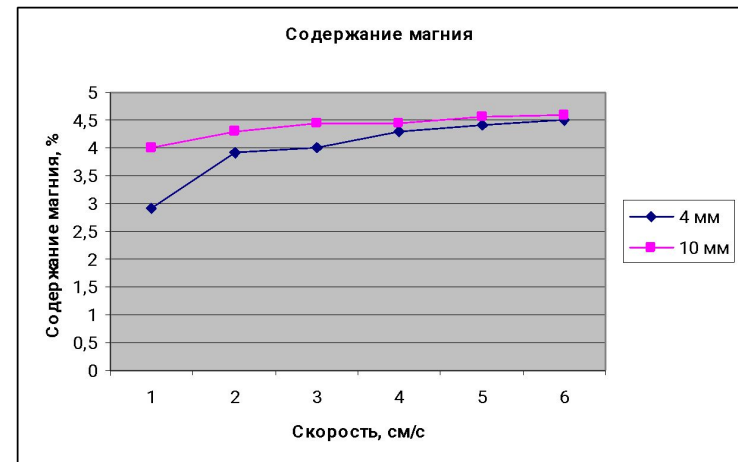
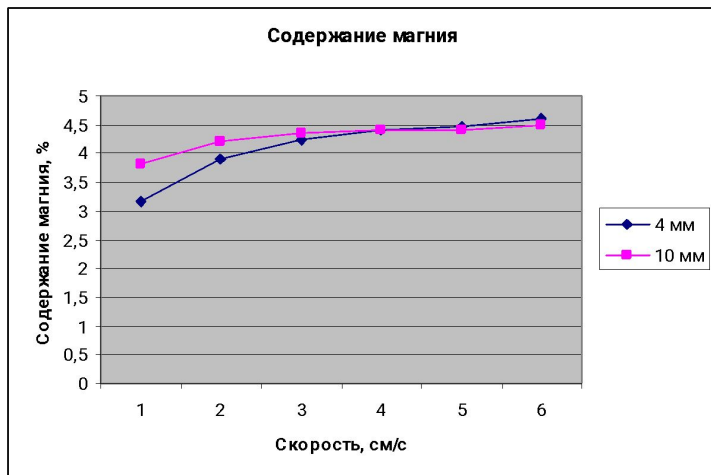
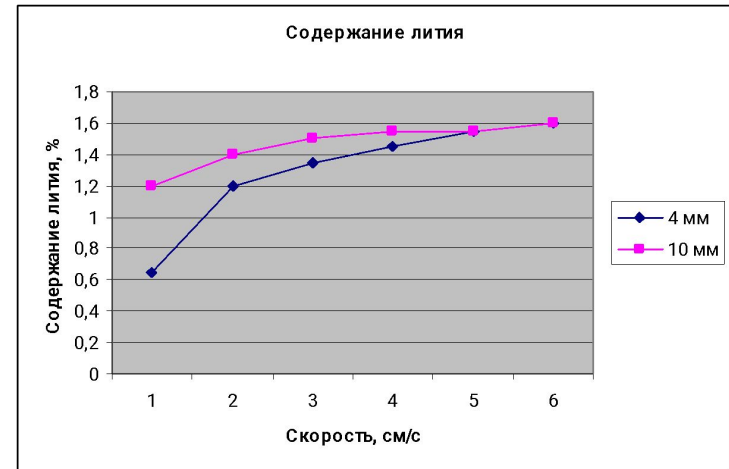
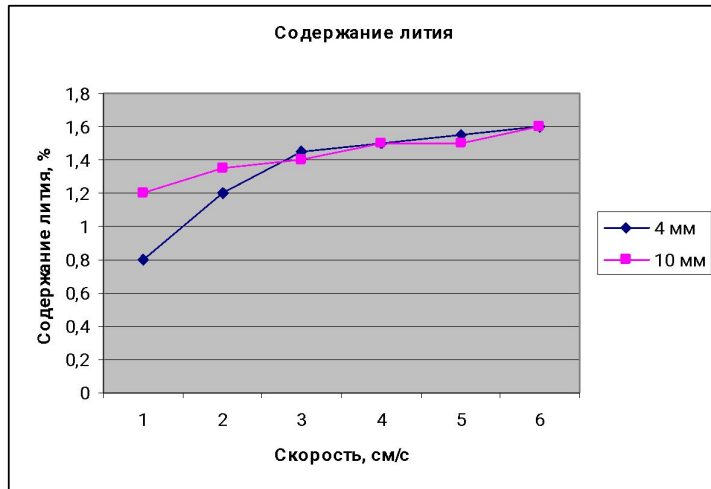


# Экспериментальная проверка результатов математического моделирования



мощность излучения 3500 Вт, фокальный радиус 0,3 мм

мощность излучения 3000 Вт, фокальный радиус 0,3 мм



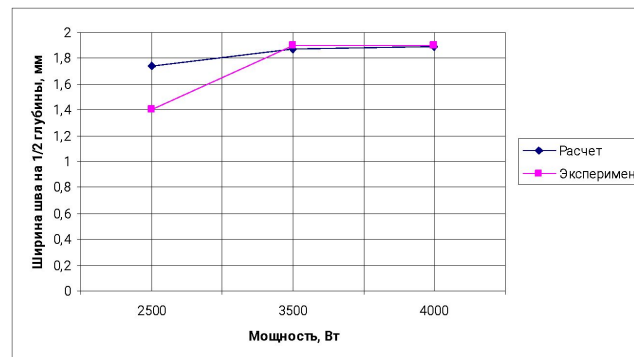
# Экспериментальная проверка результатов математического моделирования



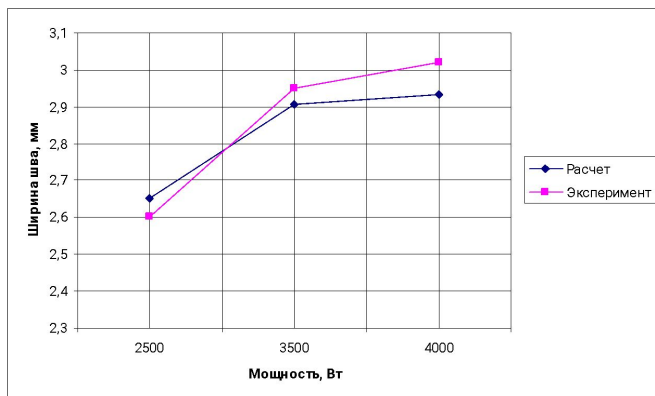
### Изменение глубины шва при лазерной сварке



### Изменение ширины шва на середине глубины проплавления при лазерной сварке



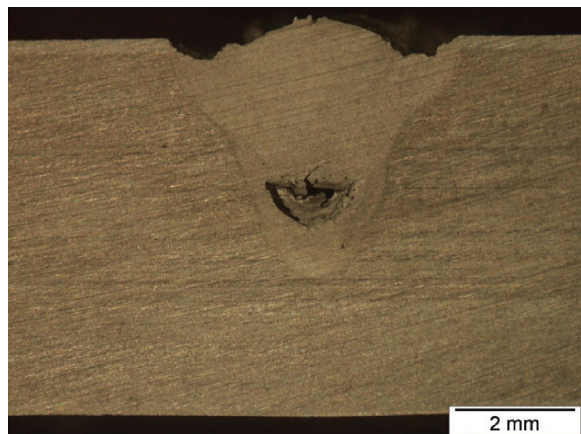
### Изменение ширины шва на поверхности образца при лазерной сварке



Материал - алюминиевый сплав 1424. Мощностью излучения - 2,5...4 кВт, скорость сварки - 0,5...3 м/мин. Фокусное расстояние - 250 мм. Диаметр луча на поверхности - 0,6 мм. При лазерно-дуговой сварке сила тока - 100-150 А, напряжение на дуге 20-25 В, диаметр электрода диаметром 1 мм.

# Исследования технологических процессов лазерной и лазерно-дуговой сварки легких сплавов на основе алюминия

Возможные дефекты при сварке алюминиевых сплавов:

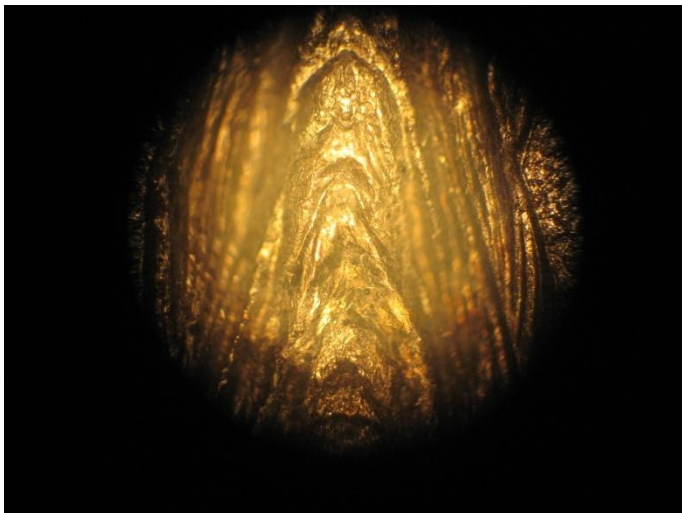


Поры и несплошности  
Подрезы



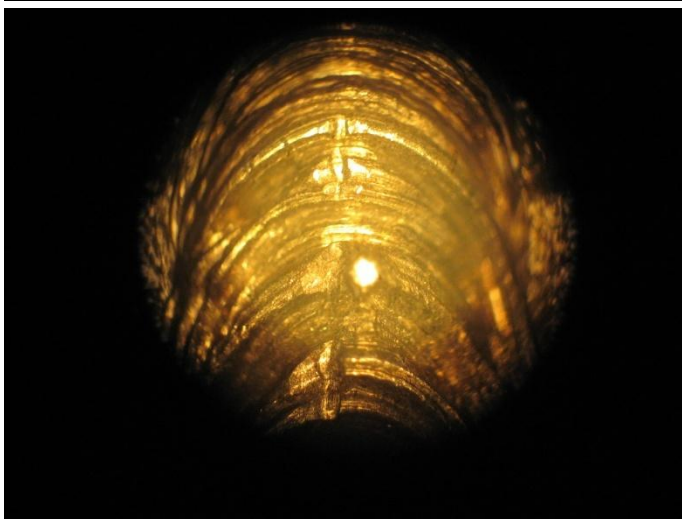
Трещины

# Исследования технологических процессов лазерной и лазерно-дуговой сварки легких сплавов на основе алюминия



Сплав 1424

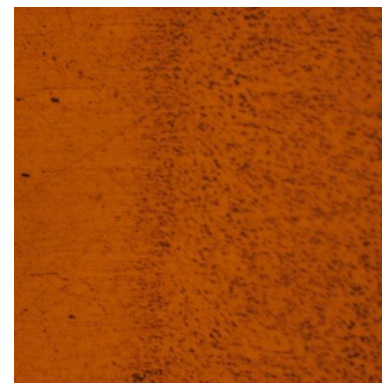
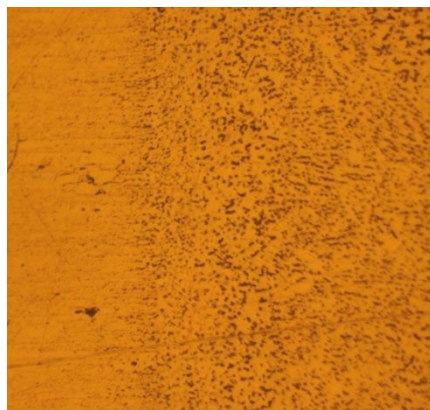
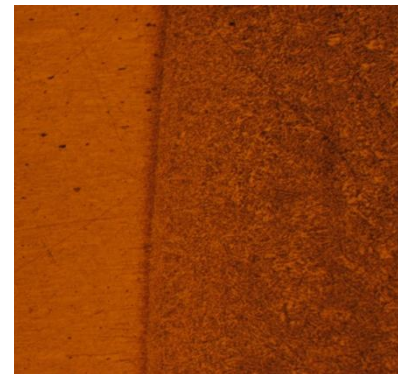
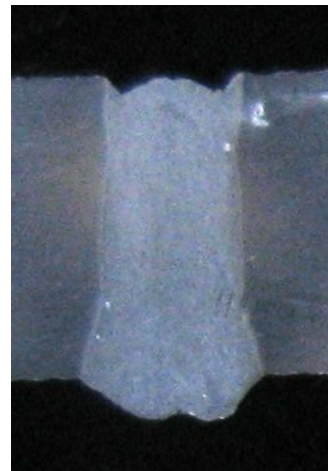
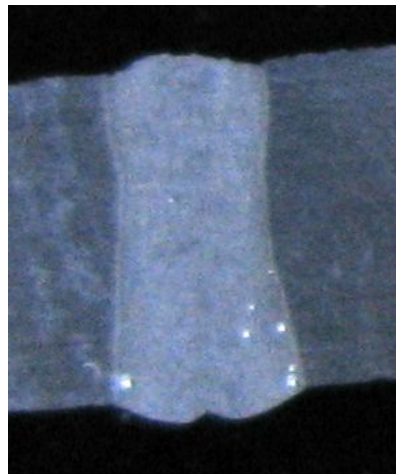
Поверхность верхнего валика



Поверхность обратного валика

# Исследование влияния сканирования ЛЛ на порообразование

8 кВт, 130 мм/с



Без сканирования

10 пор диаметром 0,05...0,15 мм

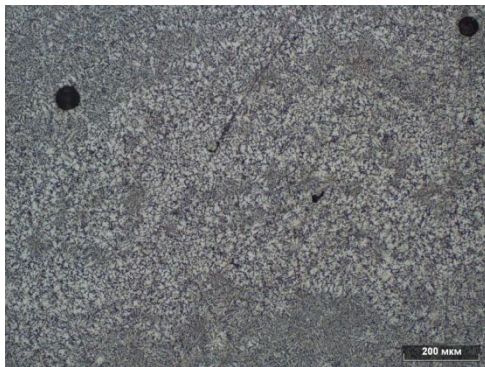
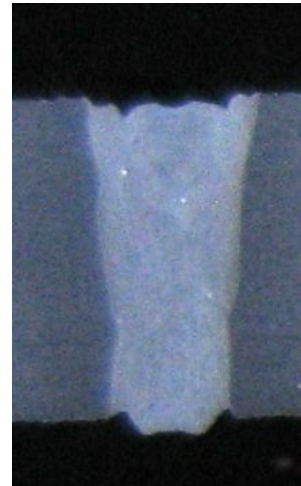
Со сканированием

400 Гц, 0,2 мм

4 поры диаметром 0,05 мм

# Исследование влияния сканирования ЛЛ на порообразование

4 кВт, 60 мм/с



Без сканирования

12 пор диаметром 0,05 мм

Со сканированием

400 Гц, 0,2 мм

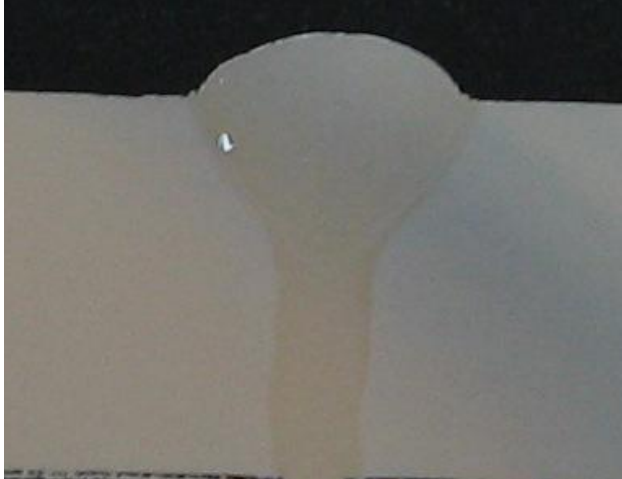
5 пор диаметром 0,05 мм



# Испытания опытных образцов сварных соединений

УЗК, трещинообразование, мех. испытания,  
коррозия

Результаты испытаний образцов на  
статическое растяжение и расчета  
разупрочнения



Временное сопротивление основного  
металла  $\sigma_{\text{в.о.м.}}$  - 450 МПа

$a$  - начальная толщина образца;

$b$  - начальная ширина образца;

$F$  - начальная площадь поперечного сечения  
образца;

$\sigma_{\text{в.}}$  - временное сопротивление;

$P$  - усилие, предшествующее разрыву  
образца.

Маркировка	$a$ , mm	$b$ , mm	$F$ , mm <sup>2</sup>	$P$ , Н	$\sigma_{\text{в.св.ш.}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в.св.ш.ср}}$ , МПа	Разупрочнение,%
37	2,03	15,01	30,47	11449	376	375	17
	2,02	15,01	30,32	11352	374		
38	10,04	20,02	201	76340	380	380	16
	10,03	20,02	200,8	76445	381		
39	2,05	15,04	30,83	11613	377	376	16
	2,04	15,04	30,68	11542	376		
40	2,03	15,02	30,49	11429	375	376	17
	2,04	15,02	30,64	11527	376		
41	10,05	20,04	201,40	76583	380	380	16
	10,05	20,03	201,30	76273	379		
42	2,02	15,03	30,36	11189	369	368	18
	2,01	15,02	30,19	11086	367		
Образец - свидетель	2,05	15,02	30,79	13856	450	450	0
	2,04	15,02	30,64	13788	450		

## Испытания опытных образцов сварных соединений

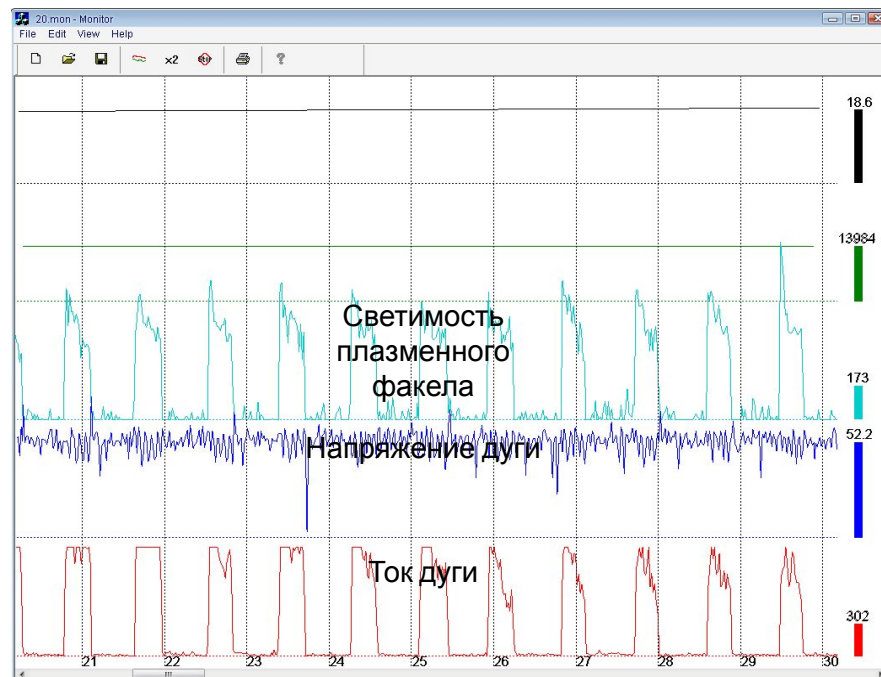
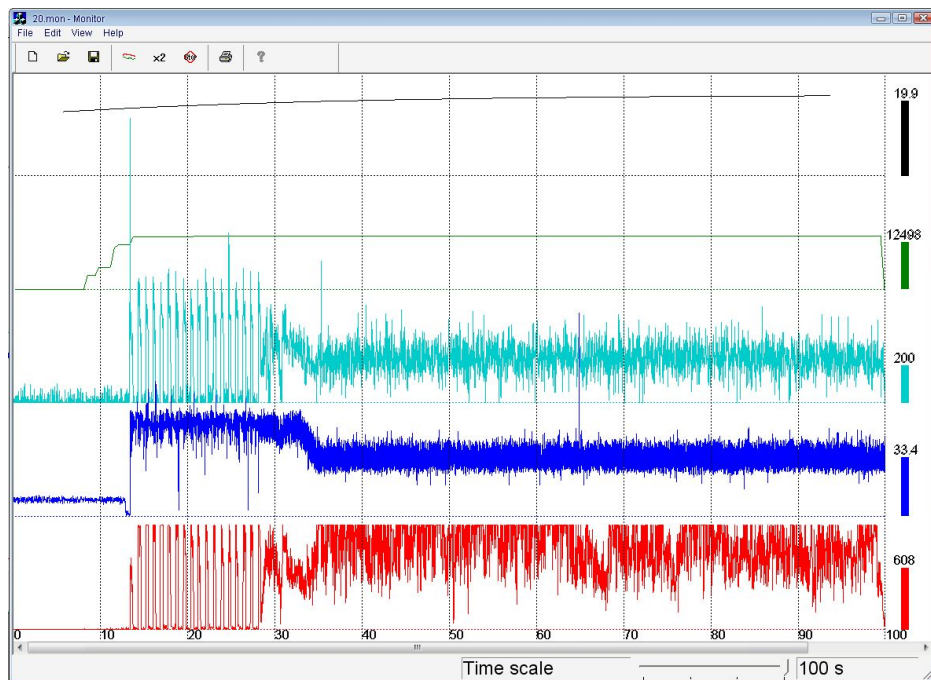
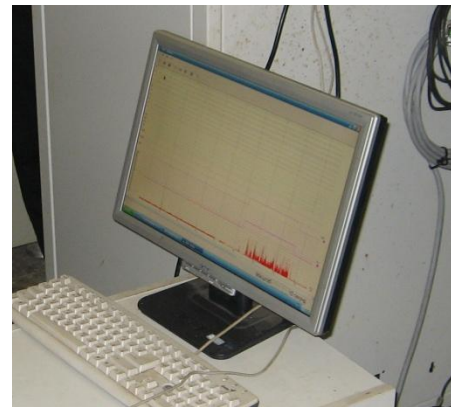
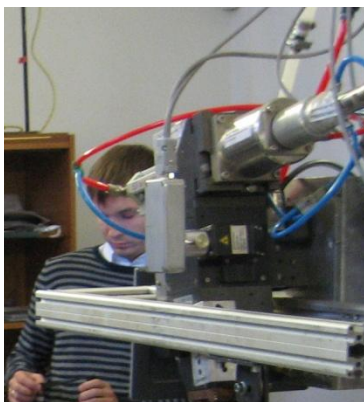
### Результаты измерений величины зерна в зависимости от скорости сварки

Материал	1424				B91			
Маркировка	9	10	11	12	14	15	16	17
Скорость сварки, м/мин	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Линейное увеличение	X100	X100	X100	X100	X100	X100	X100	X100
Пересчитанный номер микроструктуры	7	8	9	10	7	8	9	10
Ориентировочный диаметр включения, мм	0,03	0,02	0,015	0,010	0,03	0,02	0,015	0,010
Средний диаметр, мм	0,031	0,022	0,016	0,011	0,031	0,022	0,016	0,011
Средний условный размер включения, мм	0,0277	0,0198	0,0138	0,0099	0,0277	0,0198	0,0138	0,0099
Средняя площадь сечения включения, мм <sup>2</sup>	0,00098	0,00049	0,000244	0,000122	0,00098	0,00049	0,000244	0,000122
Микротвердость, HV	96	98	101	105	96	98	101	105

### Результаты измерений величины зерна в зависимости от количества Mg

Материал	1424		B91	
Маркировка	12	13	17	18
Присадочная проволока	СвАМг3	СвАМг61	СвАМг3	СвАМг61
Линейное увеличение	X100	X100	X100	X100
Пересчитанный номер микроструктуры	9	10	9	10
Ориентировочный диаметр включения, мм	0,015	0,010	0,015	0,010
Средний диаметр, мм	0,016	0,011	0,016	0,011
Средний условный размер включения, мм	0,0138	0,0099	0,0138	0,0099
Средняя площадь сечения включения, мм <sup>2</sup>	0,000244	0,000122	0,000244	0,000122
Микротвердость, HV	97	105	97	105

# Мониторинг сварочного процесса



Для ознакомления с практическими возможностями применения автоматизированных сварочных комплексов, просим ознакомиться с видеофильмами, размещенными в этой теме:

- Комплекс оборудования для изготовления плоских секций;
- Сборочно-сварочный комплекс.