



ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA

Slide form copyright  
2019 ©

## Металлургия и свариваемость алюминиевых сплавов

15 октября 2020 г.

Д.н. Симоне РУСКА  
IIS Group (Итальянский институт сварки)

# Введение

- Алюминий и его сплавы используются в производстве из-за их небольшого веса, хорошей коррозионной стойкости и свариваемости. Хотя обычно они имеют низкую прочность, некоторые из более сложных сплавов могут иметь механические свойства, эквивалентные сталям.
- Определены различные типы алюминиевых сплавов и даны рекомендации по изготовлению компонентов без ухудшения коррозионных и механических свойств материала и без появления дефектов в сварном шве.

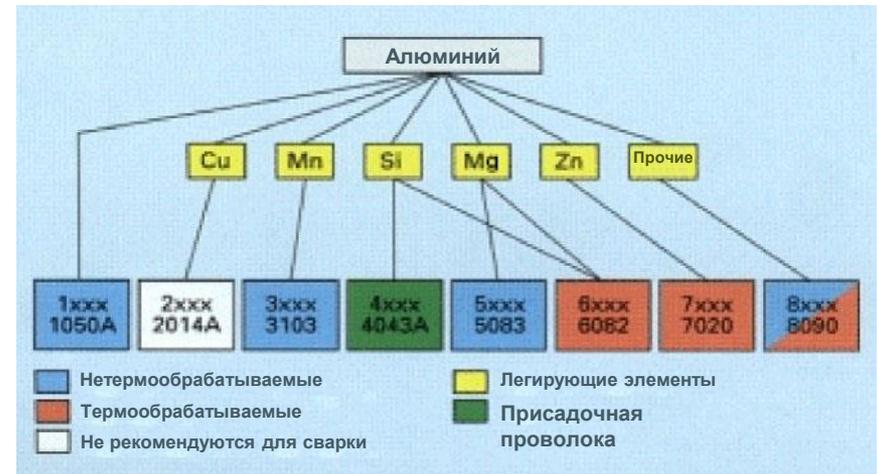


Airbus A380



## Типы материалов

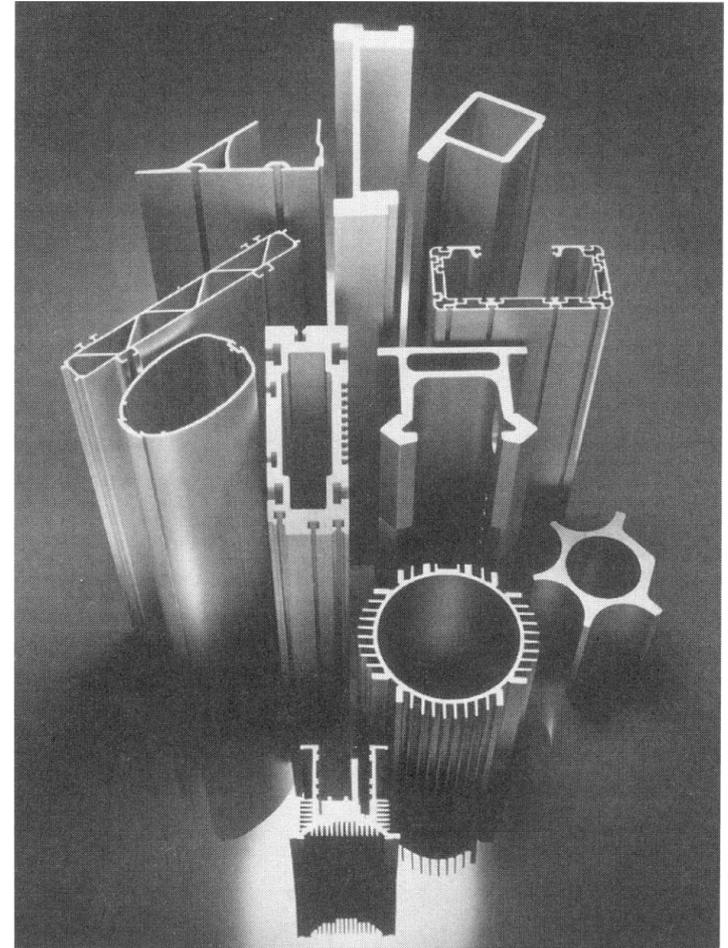
- Поскольку чистый алюминий относительно мягкий, для получения ряда механических свойств добавляются небольшие количества легирующих элементов.
- Сплавы делятся на группы по основным легирующим элементам
- Сплавы можно дополнительно классифицировать в зависимости от того, как легирующие элементы развивают механические свойства:
  - Термически неупрочняемые сплавы
  - Термически упрочняемые сплавы



Серии алюминиевых сплавов

## Термически неупрочняемые сплавы

- Прочность материала зависит от эффекта наклёпа и твёрдо-растворного упрочнения таких легирующих элементов, как магний и марганец;
- Легирующие элементы в основном встречаются в сплавах серий 1xxx, 3xxx и 5xxx.
- При сварке эти сплавы могут потерять эффект наклёпа, что приводит к размягчению зоны термического влияния (ЗТВ), прилегающей к сварному шву.

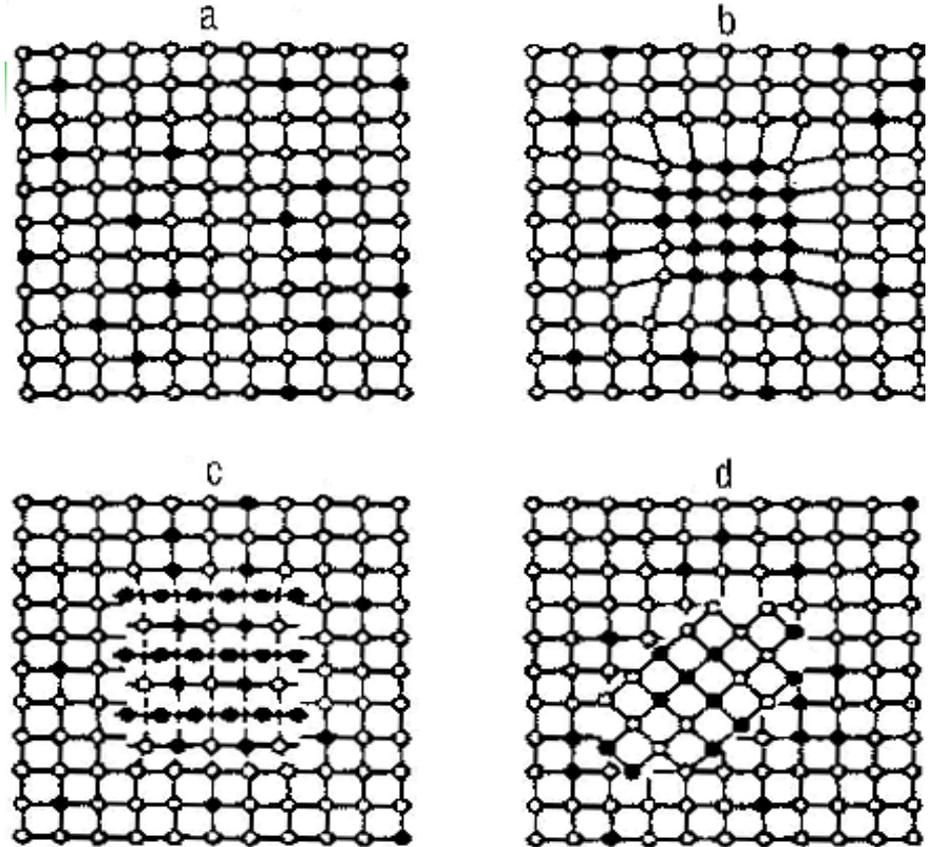


## Термически упрочняемые сплавы

- Твёрдость и прочность материала зависят от состава сплава и термообработки для получения тонкого диспергирования легирующих компонентов.

- термическая обработка на твёрдый раствор и закалка
- естественное или искусственное старение

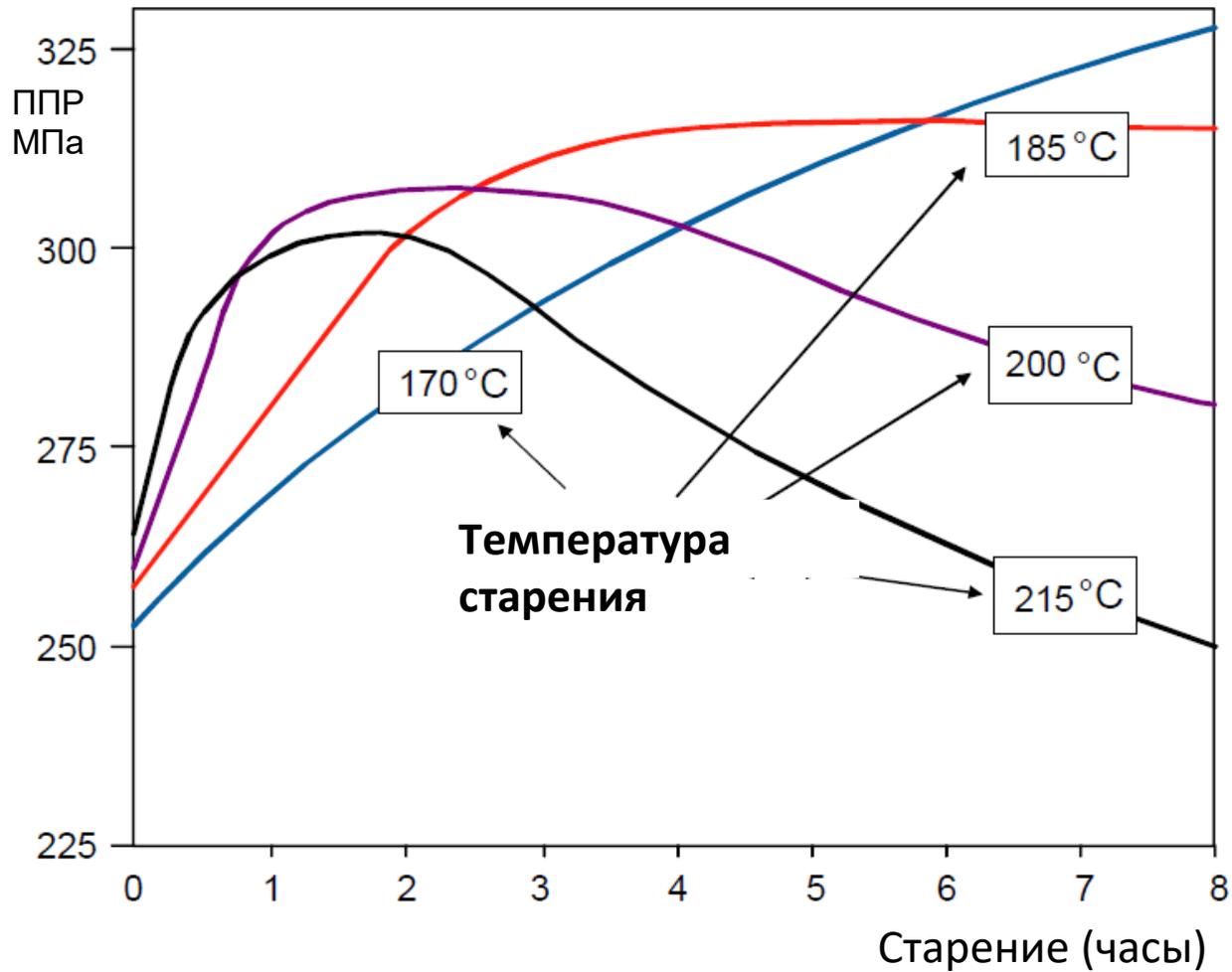
- Основные легирующие элементы определены в сериях 2xxx, 6xxx и 7xxx.
- Сварка плавлением перераспределяет упрочняющие компоненты в ЗТВ, что локально снижает прочность материала.



Примеры сплавов



# Старение



# Механические свойства

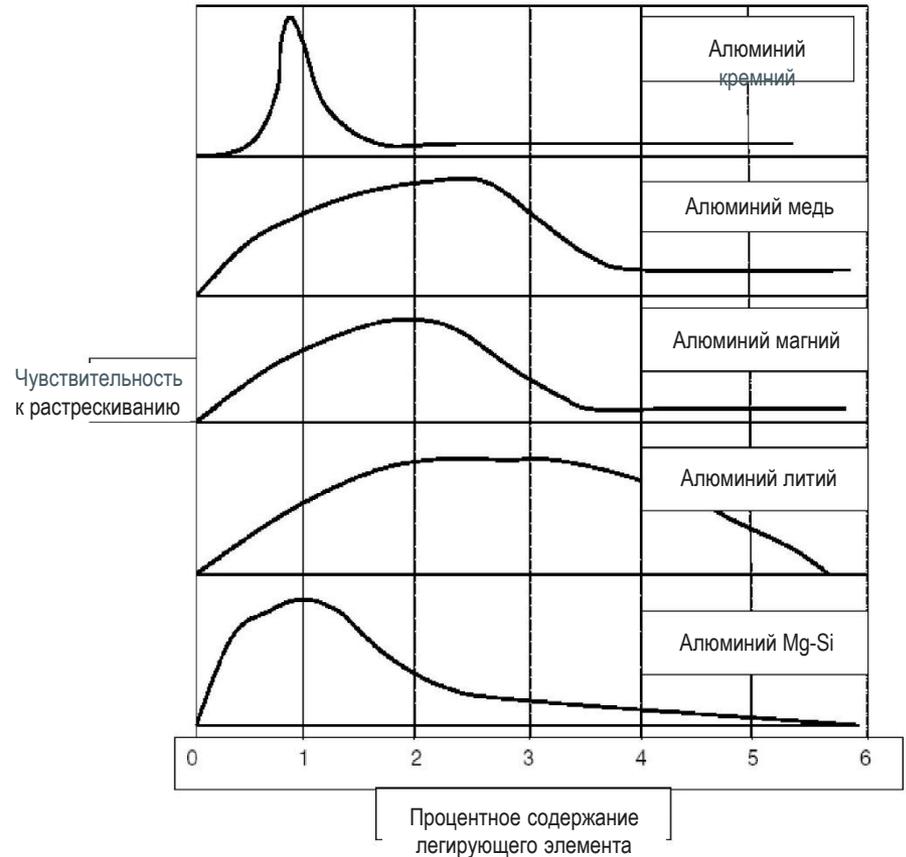
Сплав	Состояние	Предел прочности на разрыв Rm (МПа)	Предел текучести Rs 0,2 (МПа)	Относит. удлинение A5 (%)	Твёрдость по Бриннелю HB (минимальная)
1050A	0/H111	65 - 95	20 - 55	40	20
	H24	110-150	90 - 145	9	33
	H18	> 140	> 120	3	42
2011	T3	370	285	12	95
	T8(T6)	395	315	10	105
2030/2007	T8	370 470	250 - 330	7	110
2017A	T4	> 390	> 245	13	110
	T451	> 390	>250	12	110
2024	T3	> 440	> 290	13	123
	T351	> 430	> 290	11	123
3003	H34				
5005	H24	145 - 185	> 1 10	8	47
5454	H24	297	225	5	179
5754	0/H111	190 - 240	> 80	20	52
	H32	220 - 270	>130	14	63
	H24	240 - 280	> 160	10	70
5154 A	H32	270	185	7	83
	H24	300	240	6	95
5086	0/H111	240 - 310	> 100	18	65
	H32	275 - 335	> 185	12	80
	H116	> 275	> 195	10	81
5083	0/H111	275 - 350	> 125	17	73
	H32	305 - 380	> 215	10	89

Сплав	Состояние	Предел прочности на разрыв Rm (МПа)	Предел текучести Rs 0,2 (МПа)	Относит. удлинение A5 (%)	Твёрдость по Бриннелю HB (минимальная)
6060	T5	215-270	160 - 230	12	70
6012	T6	350	320	10	105
6061	T6	> 290	> 240	10	88
	T651	> 290	> 240	9	88
6082	T4	> 205	> 110	16	58
	T451	> 205	> 110	14	58
	T6	> 310	> 260	10	95
	T651	> 295	> 240	8	92
7020	T6	> 350	> 280	10	104
	T651	> 350	> 280	10	104
7075	T6	> 540	> 470	8	162
	T651	> 540	> 470	8	162

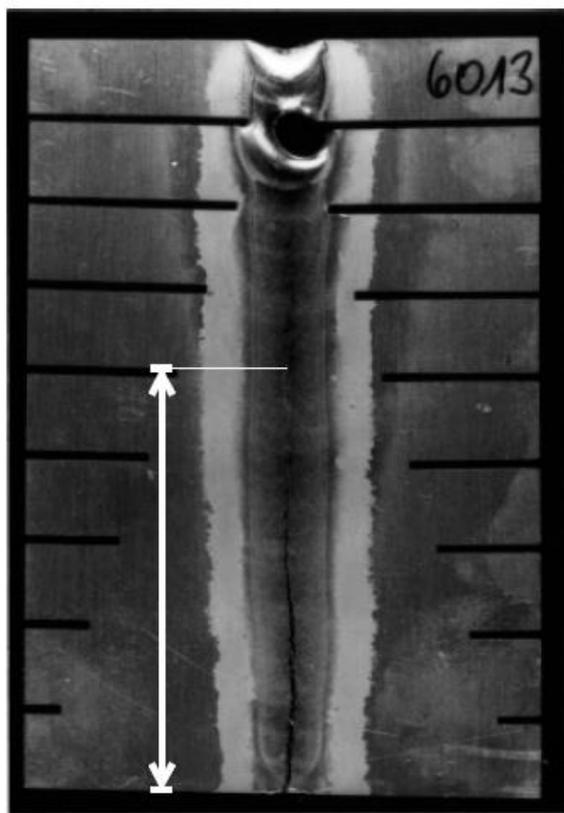


## Сварочные присадки

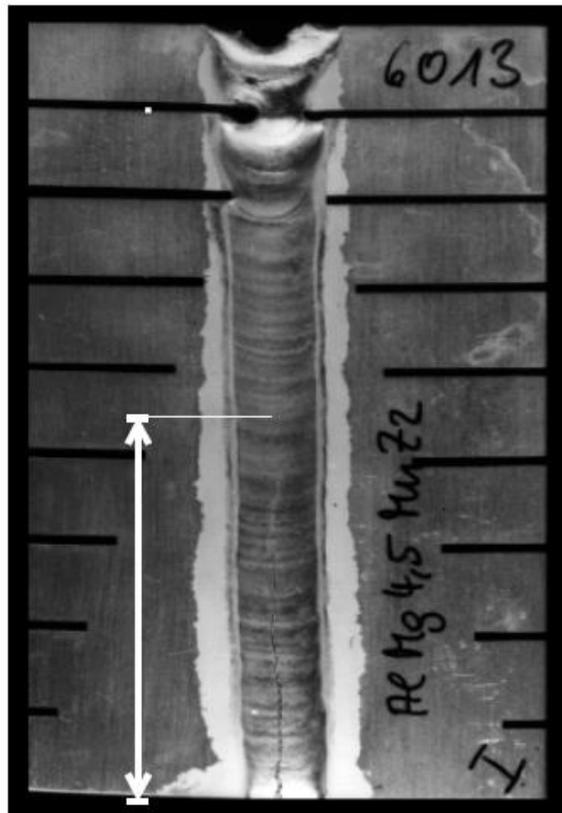
- Выбор определяется:
  - свариваемостью основного металла
  - минимальными механическими свойствами металла сварного шва
  - коррозионной стойкостью;
  - требованиями к анодному покрытию



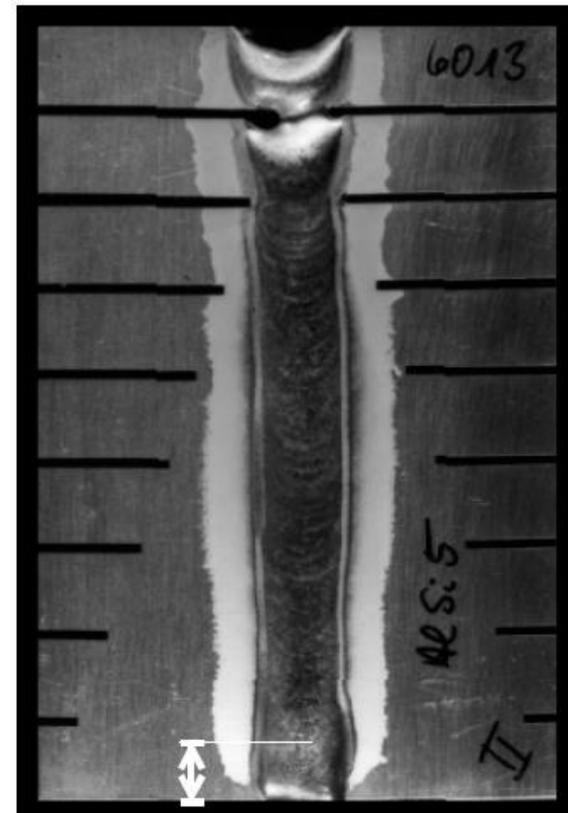
## Чувствительность к образованию горячих трещин



Без присадочного материала



Присадочный материал: AlMg4,5MnZr



Присадочный материал: AlSi5

Проба Хоулкрофта: AA 6013 T6 (AlMgSiCu), 2,5 мм

## Присадочные материалы

- Варианты выбора состава присадочного металла для различных свариваемых сплавов для технологий сварки TIG и MIG указаны в стандарте EN 1011-4:2000

Тип	Обозначение сплава	Химическое обозначение	Примечания
Тип 1	R-1450 R-1080A	Al 99.5Ti Al 99.8	Ti снижает склонность металла сварного шва к растрескиванию за счет упрочнения зерна
Тип 3	R-3103	Al Mn1	
Тип 4	R-4043A R-4046 R-4047A R-4018	Al Si5 Al Si10Mg Al Si12(A) Al Si7Mg	Присадочные сплавы типа 4 окисляются при анодировании или атмосферном воздействии, приобретая тёмно-серый цвет, интенсивность которого увеличивается с увеличением содержания Si. Поэтому эти присадочные металлы не обеспечивают хорошее цветовое соответствие с деформируемыми сплавами основного металла.
			Эти сплавы специально используются для предотвращения растрескивания при затвердевании в швах с высоким коэффициентом растворения и сильным сжатием
Тип 5	R-5249 R-5754  R-5556A R-5183 R-5087 R-5356	Al Mg2Mn0.8Zr Al Mg3  AlMg5.2Mn AlMg4.5Mn0.7(A) AlMg4.5MnZr AlMg5Cr(A)	Если хорошая коррозионная стойкость и соответствие цвета являются важными аспектами, то содержание Mg в присадочном металле должно соответствовать содержанию Mg в основном металле. Если важными аспектами являются высокая прочность сварного шва и прочность на разрыв, то следует использовать присадочный металл с содержанием Mg от 4,5% до 5%.  Cr и Zr снижает склонность металла сварного шва к растрескиванию за счёт упрочнения зерна, Zr снижает риск возникновения горячих трещин.
ПРИМЕЧАНИЕ 1 Номера типов 1, 3, 4 и 5 соответствуют первой цифре обозначения сплава.			
ПРИМЕЧАНИЕ 2 Эта таблица будет доступна до тех пор, пока не будет выпущен новый стандарт на присадочный металл.			



# Присадочные материалы: EN 1011-4

Основной металл											
Al	4 1 4										
AlMn	4 или 5 1 4	3 или 4 3 4									
AlMg <1% <sup>a</sup>	4 или 5 1 4	4 4 4	4 4 4								
AlMg 3%	4 или 5 5 <sup>d</sup> 4 or 5	5 5 <sup>wh</sup> или 3 4	5 5 <sup>d</sup> 4	5 5 <sup>d</sup> 5							
AlMg 5% <sup>b</sup>	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5						
AlMgSi <sup>c</sup>	4 или 5 5 4	4 или 5 5 4	4 или 5 5 4	5 5 4	5 5 4	5 или 4 5 4					
AlZnMg	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5				
AlSiCu <1% <sup>e, f</sup>	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4			
AlSiMg <sup>e</sup>	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4		
AlSiCu <sup>e, f</sup>	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	
AlCu <sup>c</sup>	Nr <sup>g</sup>	Nr <sup>g</sup>	Nr <sup>g</sup>	Nr <sup>g</sup>	Nr <sup>g</sup>	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	Nr <sup>g</sup> Nr <sup>g</sup> 4
Основной металл	Al	AlMn	AlMg<1%	AlMg3%	AlMg5%	AlMgSi	AlZnMg	AlSiCu<1%	AlSiMg	AlSiCu	AlCu

Таблица выбора присадочных металлов в соответствии со стандартом EN 1011-4



# Присадочные материалы: AWS D8.14

Для сварки этих сплавов →		2036	5052 5454	5182 5754	6005 6005A 6061 6063 6082 6116 6463	6009 6010 6111 6016 6022	Al-Si Отливки		Al-Mg Отливки	7003 7004 7005
с этими сплавами ↓	319.0						356.0 443.0	511.0 512.0 513.0 514.0 535.0		
7003, 7004, 7005	NR	NR	5356 5183	5356 5183	NR	NR	NR	4043 5183 5356	5556 5183	
Отливки Al-Mg 511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0	NR	5356	5356 5183	5356	NR	NR	NR	4043 5183 5356		
Al-Si Отливки	356.0 443.0	4145 4010	4043 4010	NR	4043 4010	4340 4010	4145	4043 4010		
	319.0	4145 2319	4043	NR	4145 4043	4145 4043	4145 4043	4145		
6009, 6010, 6111 6016, 6022	4145	5356	5356	4043	4043					
6005, 6005A, 6061, 6063, 6082, 6116, 6463	4145	5356 4043	5356	5356 5183						
5182, 5754	NR	5356	5356 5183							
5042, 5454	NR	5356 5183 5554								
2036	4145 2319									

- Этот стандарт в большей степени ориентирован на конкретную область/отрасль применения

Примечания:

Таблица выбора присадочных металлов в соответствии со стандартом AWS D8.14



# Присадочные материалы: EN ISO 18273

- Устанавливает требования к классификации сплошных проволок и прутков для сварки плавлением алюминия и алюминиевых сплавов

Обозначение		Химический состав в % (м/м) <sup>a b</sup>													
Цифровое	Химическое	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V	Ti	Zr	Al <sub>min</sub>	Be	Прочие, каждый	Прочие, всего
АЛЮМИНИЙ-НИКОБЕГИРОВАНИЕ СЛАВЫ															
Al 1080A	Al 99,8(A)	0,20	0,25	0,04	0,03	0,03	–	0,04	V 0,05	0,03	–	99,70	0,0003	0,03	–
Al 1188	Al 99,88	0,06	0,06	0,005	0,01	0,01	–	0,03	Ga 0,03 V 0,05	0,01	–	99,88	0,0003	0,01	–
Al 1100	Al 99,0Cu	Si + Fe 0,95		0,05 – 0,20	0,05	–	–	0,10	–	–	–	99,00	0,0003	0,05	0,15
Al 1200	Al 99,0	Si + Fe 1,00		0,05	0,05	–	–	0,10	–	0,05	–	99,00	0,0003	0,05	0,15
Al 1450	Al 99,5Ti	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	–	0,07	–	0,10 - 0,20	–	99,50	0,0003	0,03	–
АЛЮМИНИЙ-МЕДЬ															
Al 2319	AlCu6MnZrTi	0,20	0,30	5,8 – 6,8	0,20 – 0,40	0,02	–	0,10	V 0,05 – 0,15	0,10 – 0,20	0,10 – 0,25	Rem	0,0003	0,05	0,15
АЛЮМИНИЙ-МАРГАНЕЦ															
Al 3103	AlMn 1	0,50	0,7	0,10	0,9 - 1,5	0,30	0,10	0,20	–	Ti + Zr 0,10	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
АЛЮМИНИЙ-КРЕМНИЙ															
Al 4009	AlSi5Cu1Mg	4,5 – 5,5	0,20	1,0 – 1,5	0,10	0,45 – 0,6	–	0,10	–	0,20	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4010	AlSi7Mg	6,5 – 7,5	0,20	0,20	0,10	0,30 – 0,45	–	0,10	–	0,20	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4011	AlSi7Mg0,5Ti	6,5 – 7,5	0,20	0,20	0,10	0,45 – 0,7	–	0,10	–	0,04 – 0,20	–	Rem	0,04 – 0,07	0,05	0,15
Al 4018	AlSi7Mg	6,5 - 7,5	0,20	0,05	0,10	0,50 - 0,8	–	0,10	–	0,20	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4043	AlSi6	4,5 - 6,0	0,8	0,30	0,05	0,05	–	0,10	–	0,20	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4043A	AlSi6(A)	4,5 - 6,0	0,6	0,30	0,15	0,20	–	0,10	–	0,15	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4046	AlSi10Mg	9,0 - 11,0	0,50	0,03	0,40	0,20 - 0,50	–	0,10	–	0,15	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4047	AlSi12	11,0 - 13,0	0,8	0,30	0,15	0,10	–	0,20	–	–	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4047A	AlSi12(A)	11,0 - 13,0	0,6	0,30	0,15	0,10	–	0,20	–	0,15	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4145	AlSi10Cu4	9,3 – 10,7	0,8	3,3 – 4,7	0,15	0,15	0,15	0,20	–	–	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 4643	AlSi4Mg	3,6 – 4,6	0,8	0,10	0,05	0,10 – 0,30	–	0,10	–	0,15	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ															
Al 5249	AlMg2Mn0,8Zr	0,25	0,40	0,05	0,50 - 1,1	1,8 - 2,5	0,30	0,20	–	0,15	0,10 - 0,20	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 5554	AlMg2,7Mn	0,25	0,40	0,10	0,50 – 1,0	2,4 – 3,0	0,05 – 0,20	0,25	–	0,05 – 0,20	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 5654	AlMg3,5Ti	Si + Fe 0,45		0,05	0,01	3,1 – 3,9	0,15 – 0,35	0,20	–	0,05 – 0,15	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 5654A	AlMg3,5Ti	Si + Fe 0,45		0,05	0,01	3,1 – 3,9	0,15 – 0,35	0,20	–	0,05 – 0,15	–	Rem	0,0005	0,05	0,15
Al 5754*	AlMg3	0,40	0,40	0,10	0,50	2,8 - 3,6	0,30	0,20	–	0,15	–	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 5356	AlMg5Cr(A)	0,25	0,40	0,10	0,05 - 0,20	4,5 - 5,5	0,05 - 0,20	0,10	–	0,06 - 0,20	–	Rem	0,0003	0,05	0,15



# Присадочные материалы: EN ISO 18273

Обозначение сплава		Химический состав в % (м/м) <sup>a b c</sup>													
Цифровое	Химическое	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V	Ti	Zr	Al <sub>min</sub>	Be	Прочие, каждый	Прочие, всего
Al 5356A	AlMg5Cr(A)	0,25	0,40	0,10	0,05 - 0,20	4,5 - 5,5	0,05 - 0,20	0,10	-	0,06 - 0,20	-	Rem	0,0005	0,05	0,15
Al 5556	AlMg5Mn1Ti	0,25	0,40	0,10	0,50 - 1,0	4,7 - 5,5	0,05 - 0,20	0,25	-	0,05 - 0,20	-	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 5556C	AlMg5Mn1Ti	0,25	0,40	0,10	0,50 - 1,0	4,7 - 5,5	0,05 - 0,20	0,25	-	0,05 - 0,20	-	Rem	0,0005	0,05	0,15
Al 5556A	AlMg5Mn	0,25	0,40	0,10	0,8 - 1,0	5,0 - 5,5	0,05 - 0,20	0,20	-	0,05 - 0,20	-	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 5556B	AlMg5Mn	0,25	0,40	0,10	0,8 - 1,0	5,0 - 5,5	0,05 - 0,20	0,20	-	0,05 - 0,20	-	Rem	0,0005	0,05	0,15
Al 5183	AlMg4,5Mn0,7(A)	0,40	0,40	0,10	0,50 to 1,0	4,3 - 5,2	0,05 - 0,25	0,25	-	0,15	-	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 5183A	AlMg4,5Mn0,7(A)	0,40	0,40	0,10	0,50 to 1,0	4,3 - 5,2	0,05 - 0,25	0,25	-	0,15	-	Rem	0,0005	0,05	0,15
Al 5087	AlMg4,5MnZr	0,25	0,40	0,05	0,7 to 1,1	4,5 - 5,2	0,05 - 0,25	0,25	-	0,15	0,10 - 0,20	Rem	0,0003	0,05	0,15
Al 5187	AlMg4,5MnZr	0,25	0,40	0,05	0,7 to 1,1	4,5 - 5,2	0,05 - 0,25	0,25	-	0,15	0,10 - 0,20	Rem	0,0005	0,05	0,15

a Единичные значения, приведённые в таблице, являются максимальными значениями, за исключением Al.

b Результаты округляются до того же числа значимых цифр, что и в указанном значении, с использованием правила а приложения В стандарта ISO 31-0:1692.

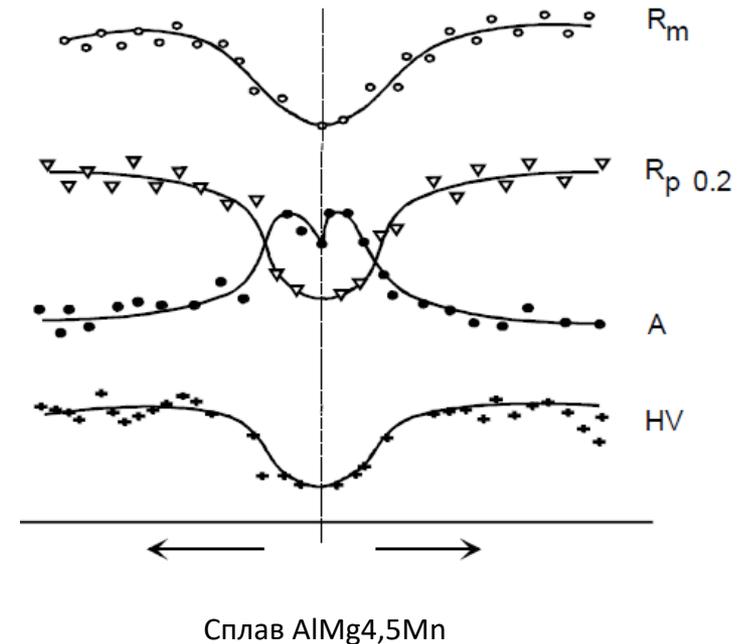
c В сплаве Al 5754 также ограничена суммарное содержание (Mn + Cr): от 0,10 до 0,6.

ПРИМЕЧАНИЕ: Сварочные материалы, не перечисленные в Таблице, могут быть обозначены символом Al Z. В скобках может быть добавлено обозначение химического символа, установленное изготовителем



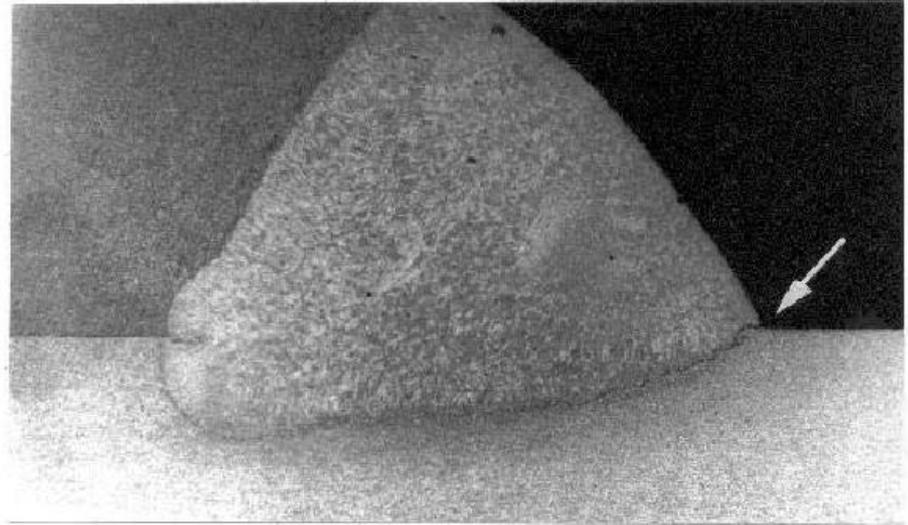
## Механические свойства сварного соединения

- Наиболее критической является **зона термического влияния (ЗТВ)** из-за эффекта разупрочнения:
  - В нагартованных полуфабрикатах свойства ожидаются такими же как в отожженном состоянии.
  - У термически упрочняемых сплавов может наблюдаться снижение механических свойств в зависимости от:
    - Условий термической обработки сплава;
    - Предварительного нагрева / температура металла шва перед наложением последующего слоя
    - Способа сварки
    - Подводимого тепла
- Свойства металла сварного шва зависят от выбранного сварочного материала
- Этот аспект специально учитывается в требованиях к проектированию, которые в целом включают критерии для отражения этого явления.



## Дефекты сварки

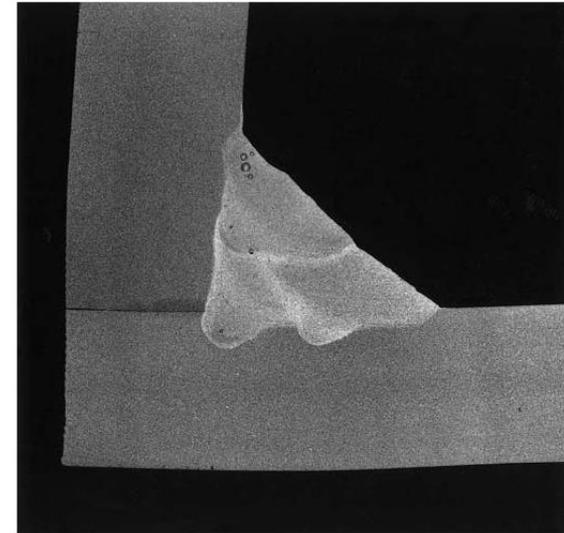
- Алюминий и его сплавы можно легко сваривать при соблюдении соответствующих мер предосторожности. При сварке плавлением наиболее часто встречаются такие дефекты сварных швов, как:
  - пористость
  - растрескивание
  - неправильный профиль сварного шва



Оксидные включения в угловом шве

# Пористость

- Основной причиной пористости является поглощение водорода в сварочной ванне, водород образует дискретные поры в затвердевающем металле сварного шва, вызванные быстрым охлаждением сварного шва за счет теплопроводности
- Для минимизации риска следует тщательно очищать поверхность материала и присадочной проволоки.
  - Механическая чистка: очистка проволочной щёткой (со щетиной из нержавеющей стали), для удаления поверхностных оксидов и загрязнений поверхность можно зачистить скребком или напильником; перед механической очисткой поверхность следует обезжирить.
  - Растворители: погружение, распыление или протирание органическими растворителями можно использовать для удаления жира, масла, грязи и сыпучих частиц.
  - Химическое травление: для периодической очистки можно использовать раствор 5% гидроксида натрия, но после этого деталь следует промыть в  $\text{HNO}_3$  и воде для удаления продуктов реакции с поверхности.
- При сварке в защитном газе следует избегать попадания воздуха, для этого следует обеспечить эффективную газовую защиту и защитить дугу от сквозняков.



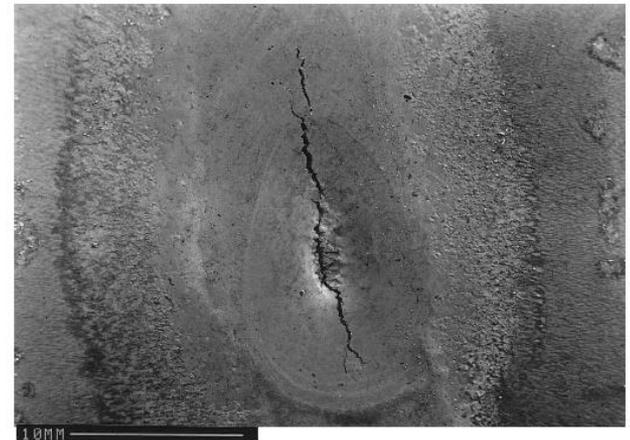
сварка MIG в аргоне, катет углового шва 15 мм, пластина толщиной 12 мм, стыковый шов между горизонтальной и вертикальной поверхностью

# Усадочные трещины

- Растрескивание возникает в алюминиевых сплавах из-за высоких напряжений, возникающих в сварном шве из-за высокого теплового расширения (вдвое больше, чем у стали), и значительного сжатия при затвердевании - обычно на 5% больше, чем в эквивалентных стальных швах.
- Основные причины возникновения усадочных трещин:
  - неправильное сочетание присадочной проволоки и основного металла
  - неправильная геометрия сварного шва
  - сварка в условиях сильного сжатия
- Риск растрескивания можно снизить, используя обычный устойчивый к растрескиванию присадочный материал (обычно из сплавов серий 4xxx и 5xxx). Недостатком является то, что прочность полученного сварного шва может быть меньше, чем у основного металла, и он может не поддаваться последующей термообработке.
- Сварной шов должен быть достаточно толстым, чтобы выдерживать усадочные напряжения.
- Кроме того, степень сжатия сварного шва может быть сведена к минимуму с помощью правильной подготовки кромок, точного подбора параметров соединения и правильной последовательности сварки.



Пластина A6082 толщиной 3 мм  
присадочный металл 4043, TIG-  
сварка



Обработанный кратер TIG-сварки  
в сплаве A5083



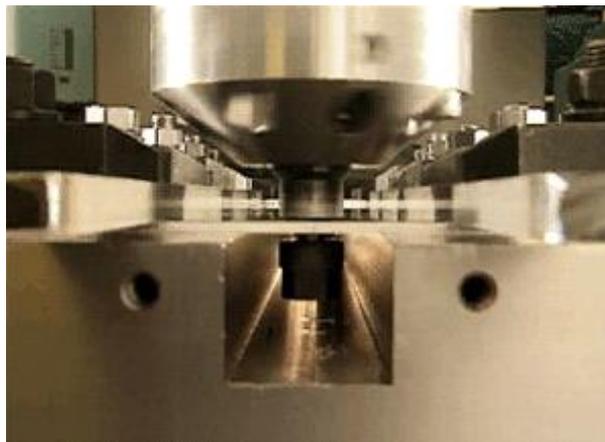
## Неправильный профиль наплавленного валика

- Неправильный выбор параметров сварки или плохая техника сварщика могут привести к дефектам профиля сварного шва, таким как:
  - непровар
  - неполное проплавление
  - подрез
- Высокая теплопроводность алюминия и быстрое затвердевание сварочной ванны делают эти сплавы особенно подверженными дефектам профиля.



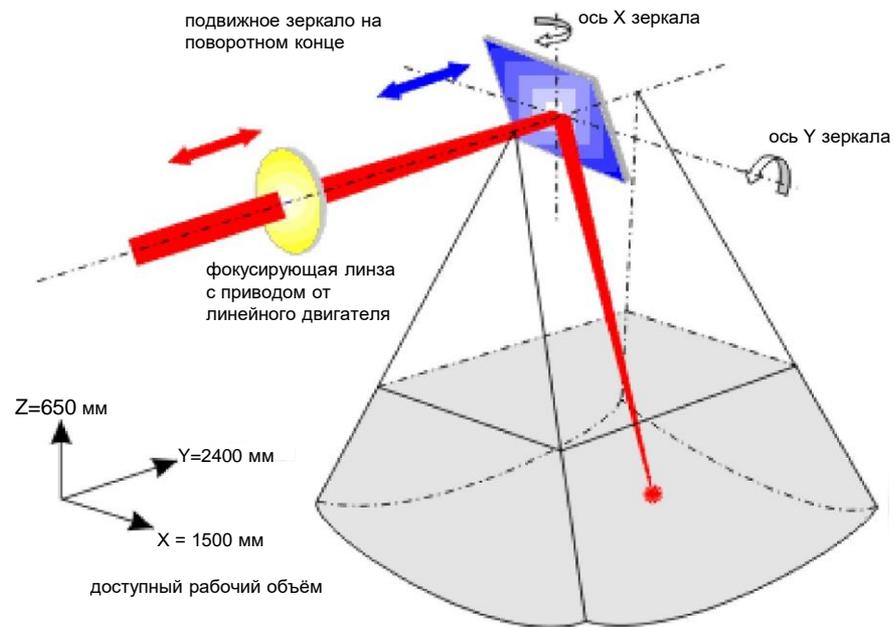
# Основные применимые процессы

- Дуговая сварка:
  - Дуговая сварка металла в защитном газе (MIG - "metal inert gas" - сварка в среде инертного к металлу защитного газа)
  - Дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе
  - Плазменно-дуговая сварка
- Сварка высокоэнергетическим пучком
  - Электронно-лучевая сварка
  - Лазерная сварка
- Твёрдофазные процессы
  - Сварка трением с перемешиванием (твёрдофазный процесс на основе динамической рекристаллизации)



# Основные применимые процессы

- Дистанционная лазерная сварка



# Порядок аттестации технологии сварки

- Ключевым документом является технологическая инструкция по сварке (WPS), в которой подробно описываются сварочные переменные, используемые для обеспечения достижения сварным соединением заданного уровня качества сварки и механических свойств.
  - Технологическая инструкция по сварке сопровождается рядом документов (например, регистрационной записью о выполнении сварного шва, протоколом неразрушающего контроля, результатами механических испытаний), которые вместе составляют квалификационную документацию на методику сварки, называемую WPQR (EN ISO 15614-2) или PQR (ASME)
- Как в европейских стандартах, так и в стандартах ASME указан ряд существенных переменных, изменение которых может отразиться либо на качестве сварного шва, либо на механических свойствах.
  - Поэтому изменение любого из основных параметров влечёт за собой аннулирование процедуры сварки и требует проведения нового испытания для официальной аттестации
  - Основные переменные подробно описаны в соответствующей инструкции и включают тип материала, процесс сварки, диапазон толщины и иногда положение шва
- Наиболее распространенным методом получения официальной аттестации является проведение испытания на официальную аттестацию, описанного в стандарте EN ISO 15614-2
  - Производитель изначально разрабатывает предварительную процедуру сварки (pWPS), которая используется одним из компетентных сварщиков производителя, чтобы доказать, что с её помощью можно выполнить сварное соединение с заданным уровнем качества сварки и механических свойств
  - Квалификационная документация на методику сварки (WPQR) - это Протокол аттестации этого сварного шва. Если Квалификационная документация на методику сварки (WPQR) одобрена экспертом, она используется для разработки одной или нескольких технологических карт сварки (WPS), которые являются основой Рабочих инструкций для сварщика



# Аттестация сварщика

- Аттестационное испытание сварщика проводится чтобы показать, что сварщик обладает необходимыми навыками для выполнения удовлетворительного сварного шва в условиях, используемых в производстве, как подробно описано в утвержденной Технологической карте сварки (WPS) или в Рабочей Инструкции
- Аттестационное испытание сварщика проводят на испытательном образце, который является репрезентативным для свариваемого соединения, оно не зависит от типа конструкции
- В некоторых случаях рекомендуется, но не обязательно проводить проверку знаний, связанных с технологией сварки (профессиональных знаний сварщиков).
- Как правило, образец, выполненный во время испытания, аттестует сварщика не только для условий, используемых в испытании, но и для всех сварных соединений, процесс выполнения которых считается более лёгким.
  - В аттестационном испытании должны быть указаны конкретные условия, называемые существенными переменными (например, тип материала, процесс сварки, тип соединения, размеры и положение сварки).
  - Область действия аттестации не обязательно ограничивается условиями, используемыми для испытания, но распространяется на группу аналогичных материалов или ряд ситуаций, которые считаются более легкими для сварки.
- В 90-х годах были приняты и изданы стандарты EN серии 287.
- В последнее время большинство из них были приняты в качестве стандартов **EN ISO 9606-X (-2 для Al)**,
  - Размеры контрольного образца (толщину, диаметры, ...) определяются проектировщиком с учётом охватываемого квалификационного диапазона



## Неразрушающий контроль (НК)

- Проверка изделия с помощью непроникающего метода определения (**NDT - неразрушающего контроля**) целостности материала, компонента или конструкции
- Более точный подход - **исследование методами неразрушающего контроля (NDE)** - позволяет количественно измерить некоторые дефекты или характеристики объекта
- Некоторые методы **позволяют НАЙТИ, ЛОКАЛИЗОВАТЬ и/или ОПРЕДЕЛИТЬ РАЗМЕР дефектов**
- Одни методы можно успешно использовать для **2-D (плоских) дефектов**, а другие - для **3-D (объёмных) дефектов**
- **Поверхностные методы** - это методы, способные обнаружить только дефекты, находящиеся на поверхности
  - некоторые из этих методов позволяют исследовать поверхность и несколько нижележащих слоев
- **Объёмные методы** - это методы, способные обнаружить дефекты, расположенные как на поверхности, так и в объёме



## Неразрушающий контроль (НК)

- Основные методы, применимые к сварным соединениям из алюминия и алюминиевых сплавов
- Поверхностные методы

**Визуальный контроль**

**Контроль проникающими веществами**

**Вихретоковая дефектоскопия**

- Объёмные методы

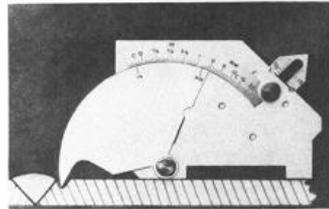
**Ультразвуковая дефектоскопия**

**Радиографический контроль**

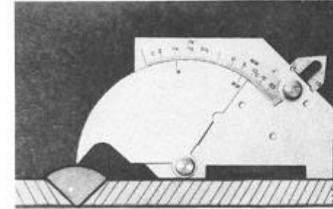


# Визуальный контроль

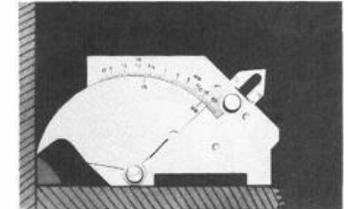
- Прямой визуальный контроль



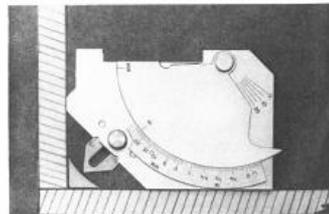
ПОДРЕЗ



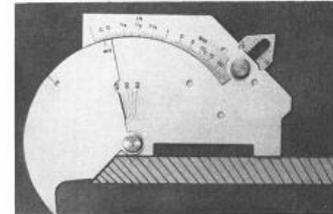
ИЗБЫТОК НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА



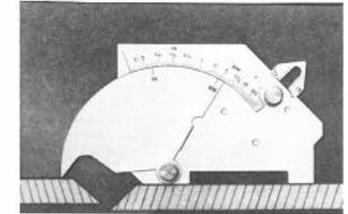
ДЛИНА КАТЕТА УГЛОВОГО ШВА



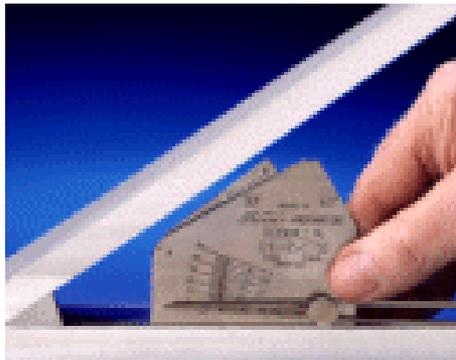
РАБОЧЕЕ СЕЧЕНИЕ УГЛОВОГО ШВА



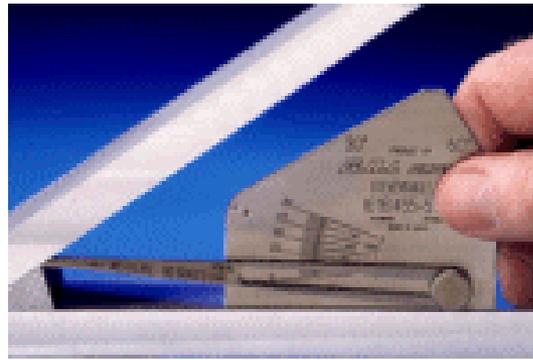
УГОЛ ПОДГОТОВКИ



СМЕЩЕНИЕ КРОМОК



Контроль угла наклона вертикального элемента



Проверка острого угла сварочного шва



Проверка тупого угла сварочного шва



## Визуальный контроль

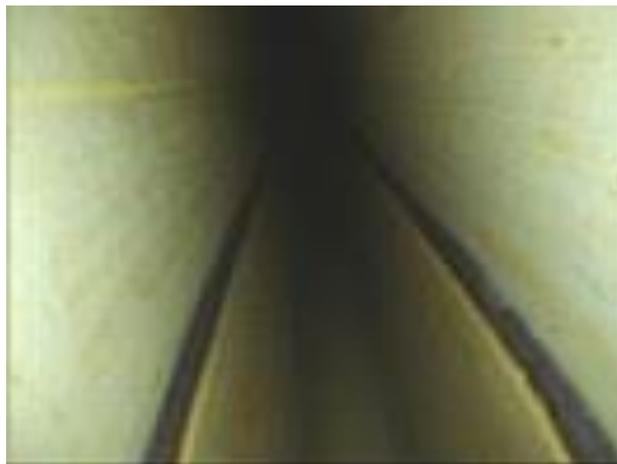
- Дистанционный визуальный контроль



Видеоэндоскоп



Зонд



Осмотр внутренних стенок лопасти

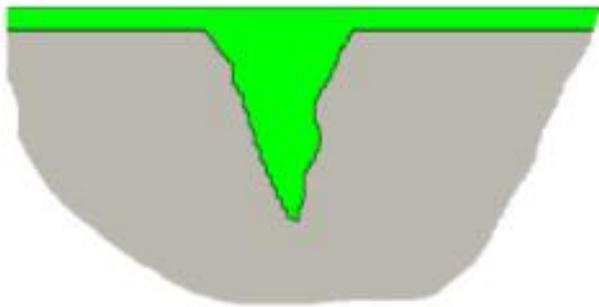


## Контроль проникающими веществами (ПВК)

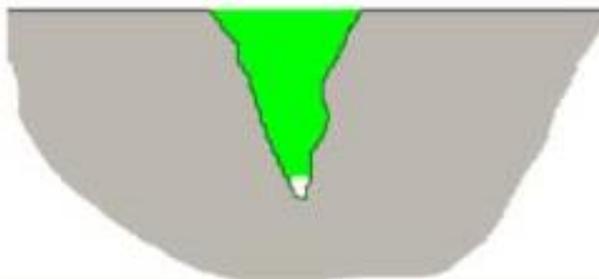
- Основы методики и процедура контроля

1) Подготовка поверхности, чистка и сушка детали

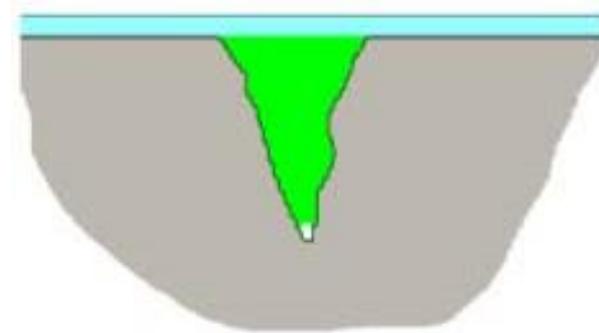
2) Нанесение проникающей жидкости



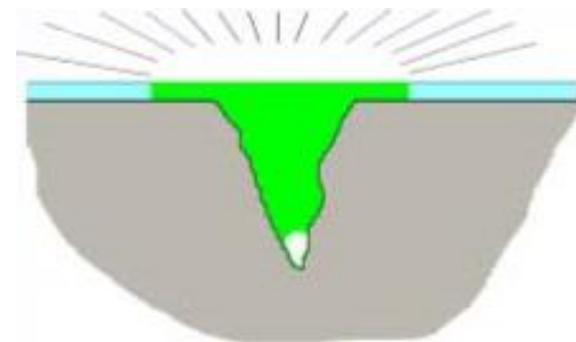
3) Удаление излишков



4) Нанесение проявляющего раствора



5) Визуальный контроль

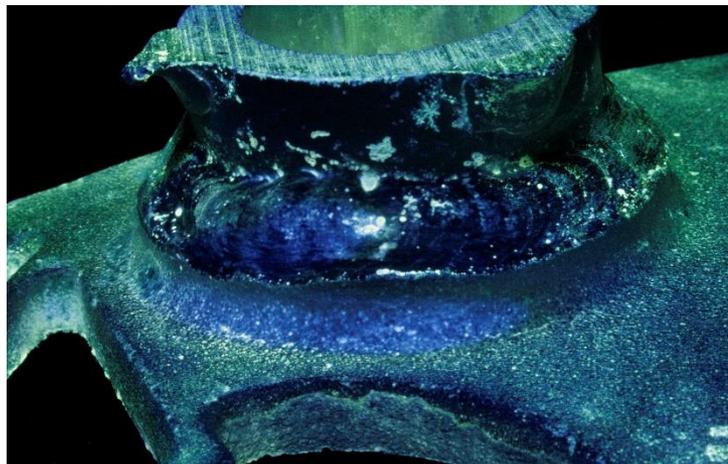


6) Заключительная очистка



## Контроль проникающими веществами (ПВК)

- Метод контроля проникающим флуоресцентным веществом
- Метод проникающих красящих веществ



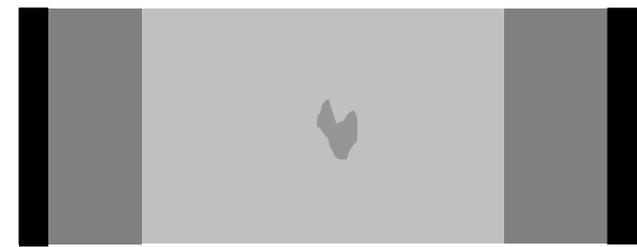
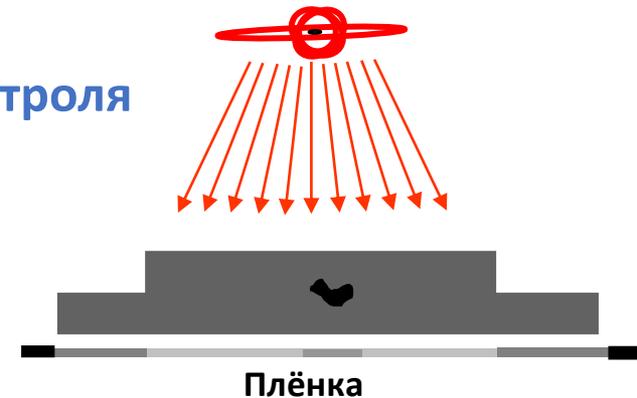
Пористость одного и того же сварного соединения, обнаруженная двумя разными методами



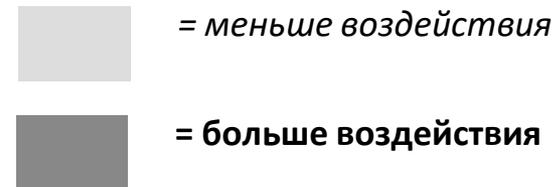
# Радиографический контроль

## • Общие принципы радиографического контроля

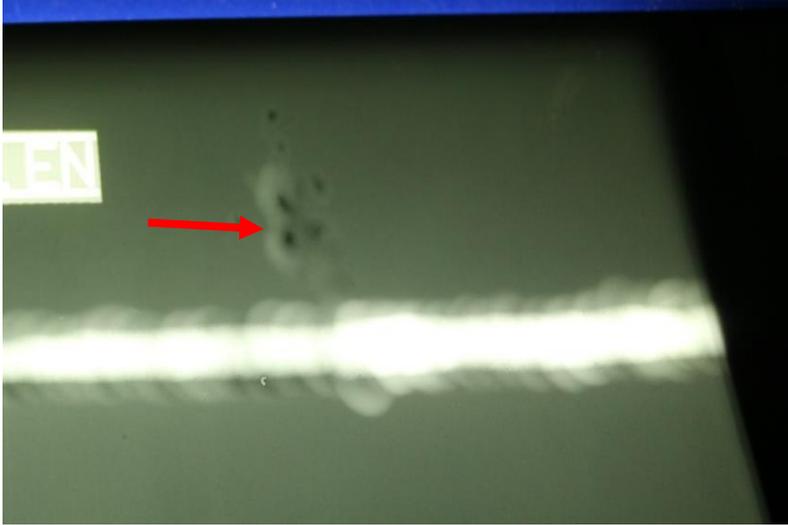
- Деталь помещается между источником излучения и плёнкой
- Более толстые и более плотные области будут задерживать больше излучения
- Темнота плёнки (**оптическая плотность**) будет меняться в зависимости от количества излучения (**дозы облучения**), достигающего плёнки через тестируемый объект
- На детектор дозы (например, на плёнку) поступит доза, которая будет обратно пропорциональна локальному поглощению (**локальная радионепроницаемость**)
- Различные значения плотности в соседних областях создают **радиографический контраст, который мы используем для выявления (дефекта)**



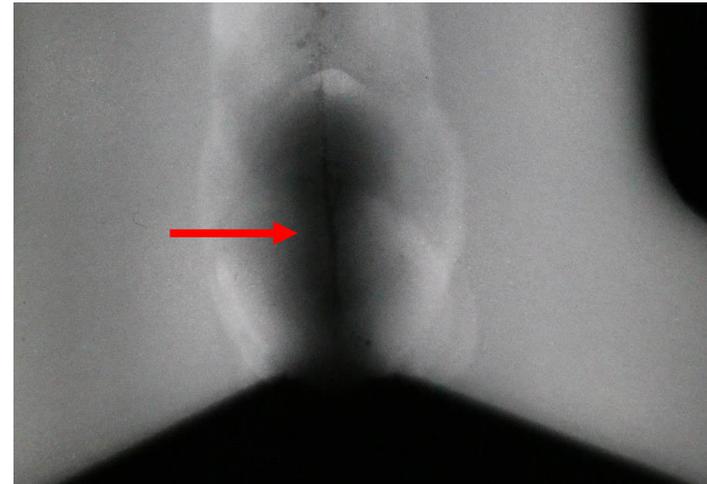
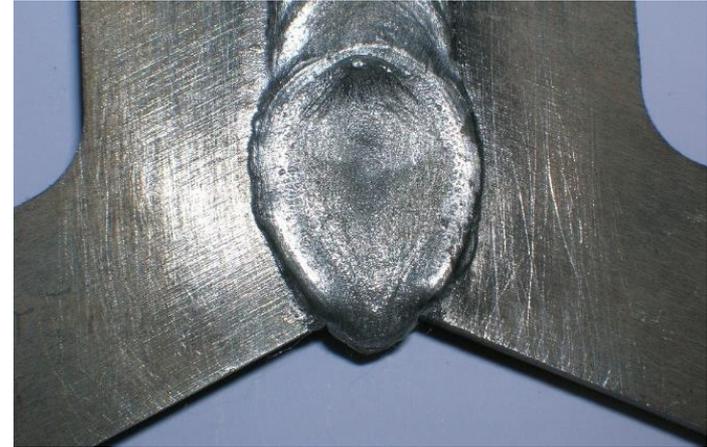
Вид проявленной плёнки сверху



## Радиографический контроль



След дуги, обнаруженный в стыковом сварном шве



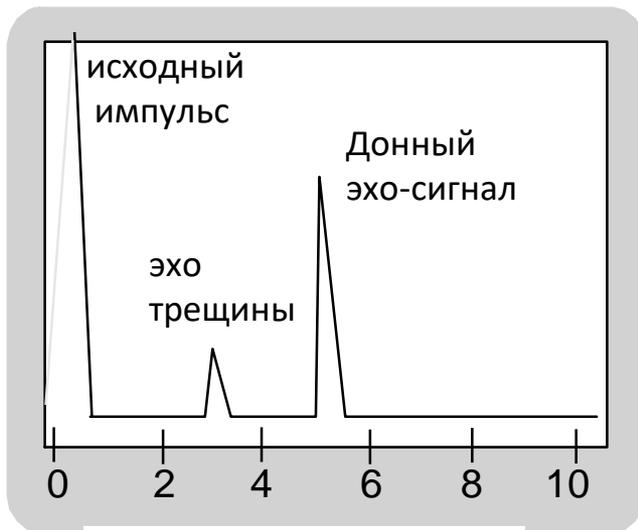
Трещина, образовавшаяся при затвердевании, обнаруженная в стыковом соединении, сваренном методом MIG



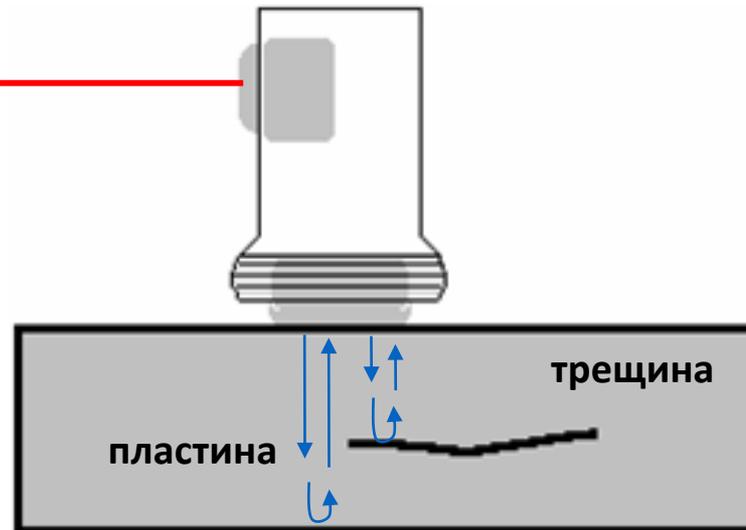
# Ультразвуковая дефектоскопия

## • Эхо-импульсный метод

- При эхо-импульсном методе контроля датчик посылает **импульс энергии**, и этот же или второй датчик **прослушивает отражённую энергию (эхо)**
- **Отражения возникают** из-за наличия разрывов и при встрече с поверхностью испытуемого изделия
- Количество отраженной звуковой энергии **отображается как функция от времени (акустический тракт металла)**, что дает инспектору информацию о размере и расположении объектов, отражающих звук



Экран эхо-импульсного дефектоскопа



Тестируемая деталь