

AISI 316, 316L, 316Ti

Обозначение по международным стандартам

Международный стандарт	Американский ASTM A240	Европейский EN 10088-2, EN 10095	Российский ГОСТ 5632-72
Обозначение марки	AISI 316	1.4401	07X18H13M2
		1.4404	03X17H14M2
	AISI 316 L	1.4432	03X17H14M3
		1.4435	03X17H14M3
	AISI 316 Ti	1.4571	10X17H13M2T

Применяемые стандарты и одобрения

AMS 5511
ASTM A 240
ASTM A 666
MIL-S-4043

Классификация

AISI 316 и L - сталь конструкционная криогенная
AISI 316 Ti - сталь коррозионно-стойкая обыкновенная

Применение

- Специализированное промышленное оборудование в химической, продовольственной, бумажно-целлюлозной, горнодобывающей, фармацевтической и нефтехимической отраслях экономики в т.ч. резервуары (танки), трубы, насосы
- Строительная промышленность: архитектурные компоненты, кровля, и т.д.
- Теплообменники: бытовые и промышленные

Основные характеристики

- хорошее сопротивление коррозии в кислотах хлоридах
- низкая чувствительность к крекингowej коррозии
- превосходное сопротивление межкристаллитной коррозии (даже после сварки - для **AISI 316L**)
- отличная свариваемость
- высокая податливость
- превосходная обрабатываемость

Химический состав (% к массе)

стандарт	марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
ASTM A240	AISI 316	≤0.080	≤0.75	≤2.0	≤0.045	≤0.030	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00

стандарт	марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
ASTM A240	AISI 316L	≤0.030	≤0.75	≤2.0	≤0.045	≤0.030	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00

стандарт	марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
ASTM A240	AISI 316Ti	≤0.080	≤0.75	≤2.0	≤0.045	≤0.030	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 2.50	5 x (C + N) - 0.7

Механические свойства

AISI 316	Сопротивление на разрыв (σ_b), Н/мм ²	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), Н/мм ²	Предел текучести ($\sigma_{1,0}$), Н/мм ²	Относительное удлинение (σ), %	Твердость по Бринеллю (НВ)	Твердость по Роквеллу (HRB)
В соответствии с EN 10088-2	≥520	≥220	≥260	≥45	-	-
В соответствии с ASTM A 240	≥515	≥205	-	≥40	217	85
AISI 316L	Сопротивление на разрыв (σ_b), Н/мм ²	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), Н/мм ²	Предел текучести ($\sigma_{1,0}$), Н/мм ²	Относительное удлинение (σ), %	Твердость по Бринеллю (НВ)	Твердость по Роквеллу (HRB)
В соответствии с EN 10088-2	≥520	≥220	≥260	≥45	-	-
В соответствии с ASTM A 240	≥485	≥170	-	≥40	217	88

AISI 316Ti	Сопротивление на разрыв (σ_B), Н/мм ²	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), Н/мм ²	Предел текучести ($\sigma_{1,0}$), Н/мм ²	Относительное удлинение (σ), %	Твердость по Бринеллю (HB)	Твердость по Роквеллу (HRB)
В соответствии с EN 10088-2	≥520	≥220	≥260	≥45	-	-
В соответствии с ASTM A 240	≥485	≥170	-	≥40	217	88

Механические свойства при высоких температурах (AISI 316, AISI 316Ti)

Все эти значения относятся только к **AISI 316** и **AISI 316 Ti**. Для **AISI 316L** значения не приводятся, т.к. её прочность заметно уменьшается при температуре выше 425 °С.

Сопротивление на разрыв при повышенных температурах (AISI 316, AISI 316Ti)

Температура (°С)	600	700	800	900	1000
Сопротивление на разрыв (при растяжении), Н/мм ²	460	320	190	120	70

Максимальные рекомендуемые температуры эксплуатации

Температура образования окалины:

Непрерывное воздействие 925°С

Прерывистые воздействия 870°С

Физические свойства (AISI 316L)

Физические свойства	Условные обозначения	Единица измерения	Температура	Значение
Плотность	d	-	4°С	8.0
Температура плавления		°С		1440
Удельная теплоемкость	c	J/kg.K	20°С	500
Тепловое расширение	k	W/m.K	20°С	15

Физические свойства	Условные обозначения	Единица измерения	Температура	Значение
Средний коэффициент теплового расширения	α	$10^{-6} \cdot K^{-1}$	20-100°C	16.0
			20-300°C	17.0
			20-500°C	18.0
Электрическое удельное сопротивление	ρ	$\Omega mm^2/m$	20°C	0.75
Магнитная проницаемость	μ	в 0.80 kA/m	20°C	1.005
Модуль упругости	E	MPa x 10^3	20°C	200

Сопротивление коррозии

Общая Коррозия

Стали марок **AISI 316**, **316L** являются наиболее стойкими из всех нержавеющей сталей 300-ой серии к атмосферным и другим умеренным типам коррозии. Все среды, в которых рекомендуется применять стали 300-ой серии, не представляют опасности для молибденсодержащих сортов. Одно известное исключение - азотная кислота, которая служит для них сильным окислителем.

AISI 316 является значительно более стойкими к серной кислоте, чем любые другие хром-никельсодержащие марки. При температурах около 50 °C **AISI 316** стойка к этой кислоте в концентрации до 5 процентов. В температурах до 40°C и выше 60°C эта марка имеет превосходное сопротивление более высоким концентрациям. В местах конденсации сернистых газов она является намного более стойкой, чем другие типы. Однако следует тщательно следить за безопасной концентрацией.

Содержание молибдена в стали **AISI 316** обеспечивает сопротивление окислению в большинстве применяемых окружающих средах. Как показывают лабораторные исследования, сплав обеспечивает превосходное сопротивление кипению 20%-ой фосфорной кислоты. Он также широко используется в горячих органических и жирных кислотах, поэтому часто применяется в изготовлении и обработке некоторых продуктов и фармацевтических изделий.

AISI 316 и **AISI 316L** могут одинаково хорошо применяться в средах, где существует риск возникновения межкристаллитной коррозии. Использование низкоуглеродистой **AISI 316L** предпочтительно в деталях, при изготовлении которых применяется сварка.

Степень защиты металла в кислотных средах

Температура, °C	20						80					
Концентрация, % к массе	10	20	40	60	80	100	10	20	40	60	80	100
Серная кислота	0	1	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2

Температура, °C	20						80					
Азотная кислота	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2
Фосфорная кислота	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2
Муравьиная кислота	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0

0 - высокая степень защиты - Скорость коррозии менее чем 100 мкм/год

1 - частичная защита - Скорость коррозии от 100 до 1000 мкм/год

2 - нет защиты - Скорость коррозии более чем 1000 мкм/год

Атмосферные воздействия

Сравнение **AISI 316** с другими металлами в различных атмосферах
(Скорость коррозии рассчитана при 5-летнем воздействии).

Окружающая среда	Скорость коррозии (мкм/год)		
	AISI 316	Алюминий-3S	Углеродистая сталь
Сельская	0.0025	0.025	5.8
Морская	0.0076	0.432	34.0
Индустриальная Морская	0.0051	0.686	46.2

Коррозионностойкость в кипящих химикалиях для AISI 316L

Кипящая среда	Скорость коррозии (мм/год)
20%-ая уксусная кислота	0.003
45%-ая муравьиная кислота	0.531 - 0.594
1%-ая соляная кислота	0.024 - 1.615
10%-ая щавелевая кислота	1.130 - 1.224
20%-ая фосфорная кислота	0.015 - 0.027
10%-ая сульфаминовая кислота	3.030 - 3.155

Кипящая среда Скорость коррозии (мм/год)

10%-ая серная кислота	16.137 - 16.718
10%-й бисульфат натрия	1.427 - 1.816
50%-ая гидроокись натрия	1.971 - 2.169

Питтинговая коррозия

Сопротивление **316** сталей к питтинговой коррозии в присутствии хлорида увеличено более высоким содержанием хрома(Cr), молибдена(Mo), и азота (N). Относительная мера питтингостойкости определяется параметром, вычисляемым как **PREN = Cr+3.3Mo+16N**. PREN для сталей **AISI 316** и **AISI 316L**(PREN=24.2) выше, чем для [AISI 304](#) (PREN=19.0), что отражает лучшую питтингостойкость за счет присутствия молибдена.

Как показано в таблице ниже, лучшую стойкость к питтинговой коррозии обеспечивает более высокое содержание молибдена в сплаве.

CCCT (Критическая Температура Щелевой Коррозии) и **CPT** (Критическая Температура Питтинговой Коррозии) скоррелированы с PREN.

Сталь марки [AISI 304](#) может сопротивляться питтинговой (щелевой) коррозии в воде, содержащей приблизительно до 100 ppm хлоридов, в то время как для **AISI 316** и AISI 317 этот показатель составляет до 2000 и 5000 ppm хлоридов, соответственно.

Хотя эти сплавы использовались в морской воде (19 000 ppm хлоридов), они не рекомендуются для такого использования. Для применения в морской воде разработан сплав с 6.2 % Mo и 0.22 % N. Однако применение этих марок в аэрозольной морской среде (фасады зданий около океана) и загрязненной городской среде (крыши, дымоходы) возможно.

Марка	Композиция			PREN ¹	CCCT ² (°C)	CPT ³ (°C)
	Cr	Mo	N			
AISI 304	18.0	-	0.06	19.0	<-2.5	-
AISI 316	16.5	2.1	0.05	24.2	<-2.5	15
AISI 904L	20.5	4.5	0.05	36.2	20	40

- ¹ Pitting Resistance Equivalent — Эквивалент Сопротивления питтинговой коррозии, включая азот, $PREN = Cr + 3.3Mo + 16N$
- ² Critical Crevice Corrosion Temperature — Критическая Температура Щелевой Коррозии, CCCT, в соответствии с ASTM G-48B (6%FeCl₃ в течение 72 часов, с щелями)
- ³ Critical Pitting Temperature — Критическая Температура Питтинговой Коррозии, CPT, в соответствии с ASTM G-48A (6%FeCl₃ в течение 72 часов)

Межкристаллитная коррозия

Содержание углерода в **AISI 316** может вызвать сенсбилизацию от теплового режима в местах сварных швов и зонах их термического влияния. По этой причине использование низкоуглеродистой стали **AISI 316L** предпочтительно в деталях, при изготовлении которых применяется сварка. «Низкий углерод» увеличивает время, необходимое для осаждения «вредных» карбидов хрома, но не прекращает реакцию их осаждения на длительное время в данном диапазоне температур.

Тест на МКК (Межкристаллитную коррозию)

ASTM A 262 Оценочные испытания	Состояние металла	Скорость коррозии (мм/год)	
		AISI 316	AISI 316 L
Practice B (Метод B) (гептагидрат сульфата железа - Серная кислота)	Обычный	0.9	0.7
	Сваренный	1.0	0.6
	Обычный	Без трещин на изгибе	Без трещин
Practice E (Метод E) (пентагидрат сульфата меди - Серная кислота)	Сваренный	Незначительные трещины на сварном шве (недопустимо)	Без трещин
	Обычный	Расслоение ступенчатое	Расслоение ступенчатое
Practice A (Метод A) (Травление щавелевой кислотой)	Сваренный	Глубокое растрескивание (недопустимо)	Расслоение ступенчатое

Растрескивание (Крекинговая коррозия) под напряжением

Аустенитные сплавы под воздействием напряжения восприимчивы коррозионному растрескиванию (SCC) в галоидных соединениях. Хотя **316-е** сплавы несколько более стойкие к SCC из-за содержания молибдена, они все равно являются весьма восприимчивыми.

Причины SCC:

- присутствие ионов галоидного соединения (вообще хлоридов);
- остаточные напряжения при растяжении;
- температуры выше 50 °C.

Напряжения могут возникнуть из-за деформации сплава в холодном состоянии во время формования, или ротационной вытяжки, или в процессе сварки, из-за возникновения напряжения от смены тепловых циклов.

Уровни напряжения могут быть снижены путем отжига или термической обработкой после деформации в холодном состоянии.

Низкоуглеродистый материал **AISI 316L** - лучший выбор при эксплуатации при воздействии напряжений, которые способствуют возникновению межкристаллитной коррозии.

Скорость растрескивания в зависимости от условий окружающей среды

Окружающая среда	AISI 316	AISI 316L
42%-ый Хлорид Магния, Кипение	Растрескивание 4-24 часа	Растрескивание 21-45 часа
33%-ый Хлорид Лития, Кипение	Растрескивание 48-569 часов	Растрескивание 21-333 часа
26%-ый Хлорид Натрия, Кипение	Растрескивание 530-940 часов	Без изменений 1002 часа
40%-ый Хлорид Кальция, Кипение	Растрескивание 144-1000 часов	-
Морское побережье, Окружающая Температура	Без изменений	Без изменений

Сварка

- Сталь легко свариваемая
- После сварки термическая обработка не требуется
- Сварные швы должны быть механически или химически очищены от окалины, затем пассивированы

Формовка

AISI 316/316L, являясь чрезвычайно прочной, упругой и пластичной, с легкостью находит множество применений. Типичные действия включают изгиб, формирование контура, волочение, ротационную вытяжку и т.д. В процессе формовки можно использовать те же машины и, чаще всего, те же инструменты, что и для углеродистой стали, но здесь требуется на 50-100% больше силы. Это связано с высокой степенью упрочнения при формовке аустенитной стали, что в некоторых случаях является отрицательным фактором.

число Эриксона характеристика обрабатываемости листового металла давлением	LDR предельный коэффициент вытяжки
11.0-11.5 (мм)	2.00-2.05 (мм)

Обработка

Отжиг

Диапазон температуры отжига $1050^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ сопровождается последующим быстрым охлаждением на воздухе или в воде. После отжига необходимо травление и пассивирование.

Отпуск

200-400 $^{\circ}\text{C}$ с последующим воздушным охлаждением

Травление (очистка поверхности)

- Смесь Азотной кислоты и фтористоводородной/плавиковой кислоты (10 % HNO_3 + 2% HF) при комнатной температуре или 60 $^{\circ}\text{C}$
- Серно-азотная кислотная смесь (10 % H_2SO_4 + 0.5 % HNO_3) при 60 $^{\circ}\text{C}$
- Паста для очистки от окалины в зоне сварки

Пассивация

- 20-25 % раствор HNO_3 при 20 $^{\circ}\text{C}$
- Пассивирующие пасты для зоны сварки