

## **Stale żaroodporne**

Stal żaroodporne to stale o strukturze austenitycznej, ferrytyczno - austenitycznej i ferrytycznej. Do podstawowych stopów żaroodpornych należą stopy ferrytyczne (Fe-Cr), które są jednak podatne na przemiany strukturalne podczas długotrwałego użytkowania w wysokiej temperaturze. W takich warunkach eksploatacji zdecydowanie wyższą stabilność strukturalną wykazują stale austenityczne.

Stale żaroodporne wykazują dobrą odporność na utlenianie i działanie gorących gazów oraz spalin w temperaturze wyższej od 550°C. Odpowiednio zrównoważony skład chemiczny oraz dodatki aluminium i krzemu powodują, że stal w atmosferze utleniającej chrom tworzy na powierzchni ochronną warstwę tlenków. Ponadto warstwa tlenków chroni przed niekorzystnym oddziaływaniem siarki zawartej w atmosferze eksploatacji. W atmosferach redukujących, gdzie nie powstaje tlenek, wysokie stężenie niklu przeciwdziała nawęgleniu i naazotowaniu stali, ale zwiększa podatność na szkodliwe działanie siarki.

Żaroodporność ściśle związana ze skłonnością stali do tworzenia zgorzeli w wysokiej temperaturze, może być polepszona przez dodatek pierwiastków ziem rzadkich takich jak cer (Ce), który powoduje, że ochronna warstwa tlenków jest mniej podatna na złuszczenie się powodujące ubytek materiału podczas użytkowania.

Żaroodporność i związana z nią maksymalna temperatura pracy ( $T_a$ ) materiału zależy w dużym stopniu od warunków oddziaływania środowiska. Podczas zastosowania w gorącym powietrzu można ją przyjmować jako maksymalną temperaturę pracy, lecz nie w sytuacji, gdy atmosfera pracy będzie inna niż gorące powietrze. W takim przypadku szybkość utleniania się stali może być znacznie większa, zależnie od jej składu chemicznego i w rezultacie może doprowadzić do obniżenia maksymalnej temperatury pracy nawet o 200°C.

Kolejne niebezpieczeństwo jest związane z eksploatacją w zakresie temperatury 600 - 950°C, gdzie występuje niebezpieczeństwo wydzielenia się fazy sigma i węglików, co powoduje zubożenie w chrom i przyczynia się do kruchości stali oraz zmniejszenia jej żaroodporności. Stale o strukturze ferrytycznej są szczególnie podatne na kruchość związaną z wydzieleniem węglików w zakresie temperatury 350 - 550°C.

Żarowytrzymałość- zdolność do wytrzymywania obciążeń mechanicznych w wysokiej temperaturze powyżej 550°C jest ściśle związana z odpornością na pełzanie stali. Żarowytrzymałość podwyższają pierwiastki stopowe takie jak Mo, W, V, Co, a także Ti, Cr i Si, a ponadto może być zwiększana w wyniku umocnienia zgniotowego oraz utwardzania wydzieleniowego stali.

Orientacyjny skład chemiczny (tab. 1), warunki obróbki cieplnej oraz wybrane własności mechaniczne (tab. 2) i fizyczne (tab. 3) stali żaroodpornych austenitycznych, ferrytyczno - austenitycznych i ferrytycznych opracowano na podstawie normy PN-EN 10095:2002.

## Literatura

- [1]. PN-EN 10095:2002, Stale i stopy żaroodporne.

**Tablica 1**

Orientacyjny skład chemiczny oraz zamienniki stali żaroodpornych austenitycznych, ferrytyczno - austenitycznych i ferrytycznych

EN 10088		Zamiennik			Stężenie pierwiastków, % <sup>(1)</sup>						
Znak stali	Numer	AISI/ASTM	PN	GOST	C	Cr	Ni	Si	Mn	N	inne
<b>Stale żaroodporne austenityczne</b>											
X6CrNiSiNcCe19-10	1.4818	S 30415	-	-	0,04 - 0,08	18,0 - 20,0	9,0 - 11,0	1,0 - 2,0	≤1,0	0,12 - 0,20	Ce:0,03 - 0,08
X15CrNiSi 20-12	1.4828	309	H20N12S2	20Ch20N14S2	≤0,20	19,0 - 21,0	11,0 - 13,0	1,5 - 2,5	≤2,0	≤0,11	
X12CrNi 23-13	1.4833	309S	-	-	≤0,15	22,0 - 24,0	12,0 - 14,0	≤1,0	≤2,0	≤0,11	
X9CrNiSiNcCe21-11-2	1.4835	S 30815	-	-	0,05 - 0,12	20,0 - 22,0	10,0 - 12,0	1,4 - 2,5	≤1,0	0,12 - 0,20	Ce:0,03 - 0,08
X15CrNiSi 25-21	1.4841	314	H25N20S2	20Ch25N20S2	≤0,20	24,0 - 26,0	19,0 - 22,0	1,5 - 2,5	≤2,0	≤0,11	
X8CrNi 25-21	1.4845	310S	H23N18	20Ch23N18	≤0,10	24,0 - 26,0	19,0 - 22,0	≤1,5	≤2,0	≤0,11	
X6NiCrSiNcCe35-25	1.4854	-	-	-	0,04 - 0,08	24,0 - 26,0	34,0 - 36,0	1,2 - 2,0	≤2,0	0,12 - 0,20	Ce:0,03 - 0,08
X12NiCrSi35-16	1.4864	330	H16N36S2	-	≤0,015	15,0 - 17,0	33,0 - 37,0	1,0 - 2,0	≤2,0	≤0,11	
X25CrMnNiN25-9-7	1.4872				0,20 - 0,30	24,0 - 26,0	6,0 - 8,0	1,0	8,0-10,0	0,2 - 0,4	
X10NiCrAlTi32-21	1.4876	N 08800	-	-	≤0,12	19,0 - 23,0	30,0 - 34,0	≤1,0	≤2,0	-	Al:0,15 - 0,60; Ti:0,15 - 0,60
X6NiCrNbCe32-27	1.4877	-	-	-	0,04 - 0,08	26,0 - 28,0	31,0 - 33,0	≤0,3	≤1,0	≤0,11	Al≤0,025; Ce:0,05 - 0,10; Nb:0,60 - 1,00
X8CrNiTi18-10	1.4878	321H	-	12Ch18N10T	≤0,10	17,0 - 19,0	9,0 - 12,0	≤1,0	≤2,0	-	Ti: min: (5 x C); max: 0,80
X10NiCrSi35-19	1.4886	-	-	-	≤0,15	17,0 - 20,0	33,0 - 37,0	1,0 - 2,0	≤2,0	≤0,11	-
X10NiCrSiNb35-22	1.4887	-	-	-	≤0,15	20,0 - 23,0	33,0 - 37,0	1,0 - 2,0	≤2,0	≤0,11	Nb:1,00 - 1,50
<b>Stale żaroodporne ferrytyczno - austenityczne</b>											
X15CrNiSi25-4	1.4821	-	-	-	0,1 - 0,2	24,5 - 26,5	3,50 - 5,50	0,8 - 1,50	≤2,00	≤0,11	-
<b>Stale żaroodporne ferrytyczne</b>											
X10CrAlSi7	1.4713	-	H6S2	-	≤0,12	6,0 - 8,0	-	0,50 - 1,00	≤1,00	-	Al: 0,50 - 1,00
X10CrAlSi13	1.4724	-	H13JS	10Ch13SJJu	≤0,12	12,0 - 14,0	-	0,70 - 1,40	≤1,00	-	Al: 0,70 - 1,20
X10CrAlSi18	1.4742	-	H18JS	15Ch18SJJu	≤0,12	17,0 - 19,0	-	0,70 - 1,40	≤1,00	-	Al: 0,70 - 1,20
X10CrAlSi25	1.4762	446	H24JS	-	≤0,12	23,0 - 26,0	-	0,70 - 1,40	≤1,00	-	Al: 1,20 - 1,70
X18CrN28	1.4749	-	-	-	0,15 - 0,20	26,0 - 29,0	-	≤1,00	≤1,00	0,15 - 0,25	-
X3CrAlTi18-2	1.4736	-	-	-	≤0,04	17,0 - 18,0	-	≤1,00	≤1,00	-	Ti:[4x(C+N)+0,2] - 0,80; Al: 1,70 - 2,10

<sup>(1)</sup> S: ≤0,010-0,015; P: ≤ 0,020-0,045;

**Tablica 2**

Warunki obróbki cieplnej oraz wybrane własności mechaniczne stali żaroodpornych austenitycznych, ferrytyczno - austenitycznych i ferrytycznych w stanie po obróbce ciepłej

EN 10088		Temperatura obróbki cieplnej, °C <sup>(1)</sup> / chłodzenie	Umowna granica plast. w temp. 20°C R <sub>p0,2</sub> MPa	Wytrzymałość na rozciąganie R <sub>m</sub> , MPa	Wydłużenie A% min.	Maksymalna temperatura pracy w powietrzu T <sub>a</sub> , °C	Czasowa wytrzymałość na pełzanie R <sub>z/10 000h</sub> , MPa				
Znak stali	Numer						600°C	700°C	800°C	900°C	1000°C
<b>Stale żaroodporne austenityczne</b>											
X6CrNiSiNcCe19-10	1.4818	1020 - 1120	290	600 - 800	40	1050	157	63	25	10	4
X15CrNiSi 20-12	1.4828	1050 - 1150	230	550 - 750	30	1000	120	36	18	8,5	-
X12CrNi 23-13	1.4833	1050 - 1150	210	500 - 700	35	1000	120	36	18	8,5	-
X9CrNiSiNcCe21-11-2	1.4835	1020 - 1120	310	650 - 850	40	1150	157	63	27	13	7
X15CrNiSi 25-21	1.4841	1050 - 1150	230	550 - 750	30	1150	130	40	20	10	-
X8CrNi 25-21	1.4845	1050 - 1150	210	500 - 700	35	1050	130	40	18	8,5	-
X6NiCrSiNcCe35-25	1.4854	1100 - 1150	300	650 - 850	40	1170	127	56	28	15	8
X12NiCrSi35-16	1.4864	1020 - 1120	230	550 - 750	30	1100	125	45	20	8	-
X25CrMnNiN25-9-7	1.4872	1050 - 1150	500	850 - 1050	-	1150	-	45	12	5	-
X10NiCrAlTi32-21	1.4876	1050 - 1150	170	450 - 680	30	1100	152	68	30	10	-
X6NiCrNbCe32-27	1.4877	1050 - 1150	180	500 - 750	-	1150	175	80	24	10	3,5
X8CrNiTi18-10	1.4878	1020 - 1120	190	500 - 720	40	850	142	48	15	-	-
X10NiCrSi35-19	1.4886	1050 - 1150	270	500 - 650	-	1100	130	55	26	13	-
X10NiCrSiNb35-22	1.4887	1050 - 1150	270	500 - 650	-	1100	130	55	26	13	-
<b>Stale żaroodporne ferrytyczno - austenityczne</b>											
X15CrNiSi25-4	1.4821	1000 - 1100	400	600 - 850	12	1100	35	9,5	4,3	1,9	-
<b>Stale żaroodporne ferrytyczne</b>											
X10CrAlSi7	1.4713	780 - 840	220	420 - 620	15	800	35	9,5	4,3	1,9	-
X10CrAlSi13	1.4724	800 - 860	250	450 - 650	15	850	35	9,5	4,3	1,9	-
X10CrAlSi18	1.4742	800 - 860	270	500 - 700	15	1000	35	9,5	4,3	1,9	-
X10CrAlSi25	1.4762	800 - 860	280	520 - 720	15	1150	35	9,5	4,3	1,9	-
X18CrN28	1.4749	800 - 860	280	500 - 700	15	1100	35	9,5	4,3	1,9	-
X3CrAlTi18-2	1.4736	870 - 930 <sup>(2)</sup>	280	500 - 650	25	1000	35	9,5	4,3	1,9	-

<sup>(1)</sup> Stale austenityczne i ferrytyczno - austenityczne: wyżarzanie z przesycaaniem, stale ferrytyczne: wyżarzanie. Rodzaj chłodzenia: woda, powietrze

<sup>(2)</sup> Rodzaj chłodzenia: powietrze

**Tablica 3**

Wybrane własności fizyczne stali żaroodpornych austenitycznych, ferrytyczno - austenitycznych i ferrytycznych

EN 10088		Średni współczynnik rozszerzalności cieplnej w temp. między 20°C÷200°C, 10 <sup>-6</sup> x K <sup>-1</sup>	Średni współczynnik rozszerzalności cieplnej w temp. między 20°C÷400°C, 10 <sup>-6</sup> x K <sup>-1</sup>	Przewodność cieplna w temp. 20°C, W/m x K	Jednostkowa pojemność cieplna w 20°C, J/kg x K	Elektryczny opór właściwy w temp. 20°C, Ω x mm <sup>2</sup> /m	Gęstość w temp. 20°C, Kg/cm <sup>3</sup>
Znak stali	Numer						
<b>Stale żaroodporne austenityczne</b>							
X6CrNiSiNcCe19-10	1.4818	16,5	18,0	15,0	500	0,85	7,8
X15CrNiSi 20-12	1.4828	16,5	17,5	15,0	500	0,85	7,9
X12CrNi 23-13	1.4833	16,0	17,5	15,0	500	0,78	7,9
X9CrNiSiNcCe21-11-2	1.4835	17,0	18,0	15,0	500	0,85	7,8
X15CrNiSi 25-21	1.4841	15,5	17,0	15,0	500	0,90	7,9
X8CrNi 25-21	1.4845	15,5	17,0	15,0	500	0,85	7,9
X6NiCrSiNcCe35-25	1.4854	15,5	16,5	11,0	450	1,00	7,9
X12NiCrSi35-16	1.4864	15,0	16,0	12,5	550	1,00	8,0
X25CrMnNiN25-9-7	1.4872	16,5	18,0	14,5	500	0,75	7,8
X10NiCrAlTi32-21	1.4876	15,0	16,0	12,0	550	1,00	8,0
X6NiCrNbCe32-27	1.4877	15,5	16,5	12,0	450	0,96	8,0
X8CrNiTi18-10	1.4878	17,0	18,0	15,0	500	0,73	7,9
X10NiCrSi35-19	1.4886	15,5	16,0	12,0	460	1,00	8,0
X10NiCrSiNb35-22	1.4887	15,5	16,0	12,0	460	1,00	8,0
<b>Stale żaroodporne ferrytyczno - austenityczne</b>							
X15CrNiSi25-4	1.4821	13	-	17,0	500	0,90	7,7
<b>Stale żaroodporne ferrytyczne</b>							
X10CrAlSi7	1.4713	11,5	12,0	23,0	450	0,70	7,7
X10CrAlSi13	1.4724	10,5	11,5	21,0	500	0,75	7,7
X10CrAlSi18	1.4742	10,5	11,5	19,0	500	0,93	7,7
X10CrAlSi25	1.4762	10,5	11,5	17,0	500	1,10	7,7
X18CrN28	1.4749	10,0	11,0	17,0	500	0,70	7,7
X3CrAlTi18-2	1.4736	10,5	10,8	21,0	500	0,60	7,7