

Жаростійкі та жароміцні сталі та сплави

Згідно другого закону термодинаміки коефіцієнт корисної дії будь-якого теплового перетворювача енергії визначається виразом $\text{ККД} = 1 - T_2/T_1$, де другий член представляє собою співвідношення температури на виході T_2 до температури на вході в перетворювач T_1 . Чим вище температура на вході, тим вище ККД. Можливість підвищення температури на вході у перетворювач залежить від теплостійкості матеріалів, що використовуються.

Головними характеристиками матеріалів, що працюють при високих температурах, є жаростійкість та жароміцність.

Жароміцні та жаростійкі матеріали застосовують для виготовлення деталей устаткування, що піддають механічним навантаженням при високих температурах. Наприклад, теплові електростанції, устаткування нафтохімічних підприємств та нафтопереробної промисловості, промислові нагрівальні печі, газові турбіни та авіаційні двигуни.

Сучасні ТЕЦ використовують пар, нагрітий до 500 – 560 °С, а у деяких випадках – до 650 °С. Стаціонарні газові турбіни та повітрянагрівачі працюють при температурі більше 700 °С. Найбільш високі робочі температури в авіаційних двигунах та хімічних установках досягають 1100 °С і більше.

Жаростійкі сталі. Здатність металу здійснювати опір хімічній корозії у сухому газовому середовищі при високих температурах називається *жаростійкістю* або *окалиностійкістю*. Залізо з киснем може утворювати оксиди трьох видів: FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃. До 500 – 600 °С окалина складається переважно з щільного шару оксидів Fe₂O₃ та Fe₃O₄, що утруднює дифузію атомів кисню та металу. Вище 600 °С відбувається розтріскування цих оксидів та замість них захист металу здійснюється лише рихлим оксидом FeO, що полегшує доступ кисню до поверхні металу. Нагрівання більше 600 °С призводить до інтенсивного окиснення сплавів на основі заліза (рис. 1).

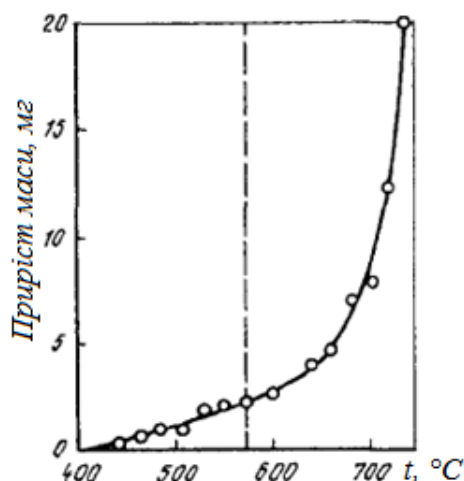


Рис. 1. Залежність швидкості окиснення заліза від температури.

Основним фактором, що впливає на жаростійкість, є хімічний склад металу, який визначає захисні властивості оксидної плівки. В табл. 1 приведена порівняльна оцінка жаростійкості ряду чистих металів, що визначена за 5-бальною шкалою швидкості окиснення у повітряному середовищі в інтервалі робочих температур.

Крихкий оксид магнію практично не захищає метал при нагріванні. Магній не тільки швидко окисляється, але і легко запалюється при нагріванні, завдяки чому використовується у піротехніці.

Оксиди металів другої групи при нагріванні руйнуються як за рахунок сублімації у випадку Mo та W, так і завдяки розчиненню в металі кисню, що входить до їх складу (Ti, Zr).

При підвищенні температури понад певної межі зростає дефективність оксидів металів третьої групи. Для технічного заліза гранична робоча температура нагрівання в повітряному середовищі складає 560 °C.

Метали четвертої групи, завдяки щільній оксидній плівці з високими захисними властивостями при нагріванні, мають хорошу жаростійкість. Хром та алюміній, поряд з кремнієм, використовують для підвищення жаростійкості легованих сталей (табл. 1). Оксид легуючого елементу повинен бути щільним, не схильним до розтріскування при нагріванні, мати високі температури сублімації та плавлення.

Таблиця 1 –

Жаростійкість металів на повітрі при робочих температурах

Бал	Метал	Оцінка жаростійкості			Визначальний фактор
		якісна	температурний інтервал, °C	швидкість окиснення, г/(м ² ·год)	
1	Mg	Дуже погана	500 – 600	$10^{-1} - 10^1$	Крихка оксидна плівка
2	Nb, Mo, W, Ti, Zr	Погана	700 – 800	$10^1 - 10^3$	Руйнування (деградація) оксидної плівки
3	Cu, Fe, Ni, Co	Задовільна	500 – 600 700 – 800	$10^{-3} - 10^{-1}$ $10^{-1} - 1,0$	Висока дефективність порівняно щільної оксидної плівки
4	Al, Zn, Sn, Pb, Cr, Be	Хороша	400 – 600 700 – 800	Менше 10^{-6} $10^{-4} - 10^{-3}$	Щільна оксидна плівка
5	Ag, Au, Pt	Відмінна	–	–	Низька спорідненість до кисню

Враховуючи, що високий вміст алюмінію та кремнію сприяє окрихчуванню та погіршує технологічну пластичність при обробці тиском, основним легуючим елементом в жаростійких сталях є хром. Жаростійкі властивості зростають зі збільшенням його вмісту в сталі. Сталь, що містить 5 % Cr, зберігає окислостійкість до 600 °C (15X5), 9 % (40X9C2) – до 800 °C, 17 % (08X17T) – до 900 °C. Хромисті марки сталей відносяться до сталей феритного класу.

Жароміцні сталі. Жароміцністю називається здатність матеріалу здійснювати опір деформації та руйнуванню при високих температурах.

Основними критеріями жароміцності металів є границя повзучості та границя тривалої міцності. Криві тривалої міцності та повзучості наведені на рис. 2.

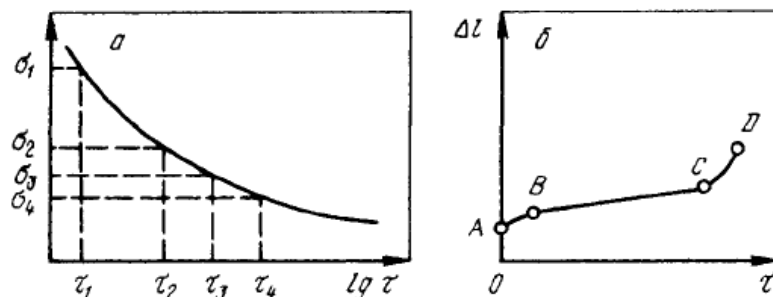


Рис. 2. Криві тривалої міцності (а) та повзучості (б).

Границею тривалої міцності називають напруження, яке призводить до руйнування зразка при заданій температурі за певний час, що відповідає умовам експлуатації виробів. Границю тривалої міцності позначають σ_{τ}^t , де індекси t і τ вказують температуру ($^{\circ}\text{C}$) та час випробувань (год.).

Границею повзучості називають напруження, що викликає задану сумарну деформацію за певний час при заданій температурі. Границю повзучості позначають $\sigma_{\delta/\tau}^t$, де t – температура, $^{\circ}\text{C}$; δ – сумарне подовження, %; τ – час, год. Для деталей, що тривалий час працюють при підвищених температурах, задається звичайно швидкість повзучості на встановленій стадії процесу, наприклад 0,1 % за 10^4 год. Або 10^5 год.

Термін служби, на який розрахована машина або механізм, визначає вибір критерію жароміцності та матеріалу для їх виготовлення.

У відповідності з деякими рекомендаціями термін служби низки жароміцних конструкції в залежності від призначення складає (год.):

Ракети та їх силові установки	1
Силові установки літаків-винищувачів	100
Силові установки громадянських літаків	1000
Газові турбіни локомотивів та суден	10000
Газові турбіни стаціонарних силових установок	30000
Парові турбіни стаціонарних силових установок	100000

Якщо надійність роботи конструкції залежить від її деформації при повзучості, то характеристикою жароміцності є границя повзучості, яка визначає швидкість встановленої повзучості на ділянці BC (рис. 2, б) при заданих температурі та напруженні. Якщо лімітуючим фактором надійності конструкції є небезпека руйнування деталі, то критерієм жароміцності є границя тривалої міцності, що визначає час до руйнування при заданому напруженні та температурі.

У попередньо навантажених кріпильних деталях (болти, гайки, шпильки) повзучість при підвищених температурах сприяє релаксації напружень, що призводить до послаблення натягу та утворення зазору. Випробування на релаксацію проводять з метою визначення швидкості релаксації напружень при певному навантаженні та підвищеній температурі. При випробуваннях зразок навантажують до заданого значення пружної деформації, а після витримки протягом певного часу при заданій температурі навантаження знімають і проводять замірювання залишкової частини пружної деформації. За різницею значень початкової та кінцевої пружної деформації визначають пластичну деформацію. Критерієм опору релаксації є падіння напружень за час τ при заданій температурі $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma$, де σ_0 , σ – початкове та кінцеве напруження. Релаксаційну стійкість можна визначати випробуванням кільцевих зразків, в яких початкове напруження створюється клином, який вставляється у прорізь.

Вплив структури на жароміцність сплавів. До температур порядку $0,5T_{пл}$ деформація повзучості визначається стабільністю дислокаційної структури. При більш високих температурах активізуються дифузійні процеси, відбувається розчинення скупчень атомів легуючих елементів та домішок, що послаблює ступінь закріплення дислокацій і полегшує їх переміщення по кристалу. В цих умовах опір повзучості буде визначатись силами міжатомного зв'язку.

Міцність міжатомних зв'язків більшості металів недостатня при високих температурах. Для підвищення жароміцності необхідно знизити рухомість дислокацій та уповільнити дифузію. ГЦК решітка твердого розчину аустенітної

сталі на відміну від феритної сталі з решіткою ОЦК характеризується більш щільним пакуванням атомів. Завдяки цьому коефіцієнт дифузії для γ -заліза з ГЦК решіткою приблизно на два порядки менше, ніж для α -заліза з ОЦК решіткою. Зокрема, цим пояснюється те, що швидкість повзучості сталі різко змінюється при температурі перетворення ОЦК – ГЦК. Аустенітні сталі з ГЦК решіткою мають значно більш високу жароміцність у порівнянні зі сталями з ОЦК решіткою.

Утворення перешкод переміщенню дислокацій досягається застосуванням матеріалів, що зміцнені дисперсними частинками. Зміцнюючими фазами в жароміцних сталях є спеціальні карбіди, в нікелевих сплавах – виділення γ' -фази з регулярною решіткою типу $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al}, \text{Nb}, \text{Ta})$. В сплавах, що зміцнені великою кількістю γ' -фази, деформація обумовлена зсувом в частках цієї фази, тому такі сплави характеризуються високою міцністю та в'язкістю. Гетерогенна структура з дисперсними частками в сталях досягається після гартування та відпуску, а в жароміцних сплавах – після гартування та старіння.

Міцність міжатомних зв'язків в кристалічній решітці зростає при легуванні елементами з високою температурою плавлення – Cr, Mo, W, Nb, Ta. Крім того, ці елементи знижують коефіцієнт самодифузії та зсувають температуру рекристалізації в область більш високих температур, що також сприяє зростанню жароміцності.

На швидкість повзучості чинять вплив розміри зерен сплаву. Відомий позитивний вплив дрібнозернистої структури на міцність при низьких температурах. При високих температурах, коли механізм повзучості в основному обумовлений дифузією, навпаки, швидкість повзучості знижується при збільшенні зерна. Границі зерен зменшують опір повзучості. Це викликане тим, що границі зерен є джерелами дислокацій. Вони полегшують рухомість дислокацій, дифузію вакансій та зернограничні ковзання. Зерна переміщуються відносно один одного вздовж загальних границь у вузькій пограничній області. Помітне зміщення зерен при повзучості призводить до утворення та зростання

клиновидних тріщин і пустот на границях. При збільшенні довжини тріщини концентрація напружень у її вершини зростає, що у свою чергу сприяє інтенсифікації зростання тріщини, а в результаті – інтеркристалітному руйнуванню.

Грубозернистість характерна для жароміцних сплавів. В ідеалі їх структура взагалі не повинна мати границь зерен і повинна складатися з одного монокристалу. Така структура монокристалу отримана для ряду турбінних лопаток відповідального призначення.

Жароміцність сплавів кольорових металів та сталей. Ефективність використання літаків та ракет передбачає максимальне зниження їх маси. Хоча легкі сплави на основі алюмінію, магнію та титану мають погану жароміцність у порівнянні зі сталями, їх застосовують у літальних апаратах для роботи в умовах середніх температур (табл. 2).

Таблиця 2 –

Жароміцність сплавів на основі алюмінію, магнію, титану

Сплав	Масова доля легуючого елемента, %	Температура, °C		σ_{100} , МПа
		застосування, рекомендована	випробування	
На основі Al	6,3 Cu; 0,6 Mn; 0,15 Ti	250 – 300	300	80
Д20	6 – 9 Al ₂ O ₃	300 – 500	500	45
САП-1	5,8 Cu; 0,8 Mn; 1,0 Ni;	250 – 300	300	95
АЛ33	0,2 Zr; 0,2 Ce			
На основі Mg	2,5 – 3 Nd; 0,5 Zr	150 – 200	200	~100
МА12	1,6 – 2,3 Nd; 0,6 Zn;	250 – 300	300	50
МА19	0,7 Zr; 1,7 Y			
На основі Ti	6,5 Al; 3,3 Mo; 0,3 Si	450 – 500	500	500
BT8	6,5 Al; 3,3 Mo; 0,25 Si;	500 – 550	550	400
BT9	1,6 Zr			
BT18	7,5 Al; 11 Zr; 0,7 Mo;	550 – 600	600	200
	1 Nd; 0,3 Si			

При робочих температурах нижче 400 – 450 °С немає необхідності використовувати жароміцні матеріали. В цих умовах можуть успішно робити звичайні конструкційні сталі.

Розрізняють наступні види жароміцних конструкційних сталей.

1. *Перлітні сталі.* Сталі перлітного класу використовують для виготовлення кріплення, труб, паропроводів, пароперегрівачів та колекторів енергетичних установок, що тривалий час працюють при температурах 500 – 550 °С. Перлітні сталі містять відносно малі кількості вуглецю і зазвичай леговані хромом, молібденом та ванадієм (марки 12ХМ, 12Х1МФ). Сталі цього класу використовують у загартованому або нормалізованому та високовідпущеному стані.

2. *Мартенситні сталі.* Сталі мартенситного класу використовують для виготовлення деталей енергетичного устаткування (лопатки, діафрагми, турбінні диски, ротори), які тривалий час працюють при температурах 600 – 620 °С. Сталі більш значно леговані хромом, а також вольфрамом, молібденом, ванадієм (марки 15Х11МФ, 15Х12ВНМФ). Висока жароміцність цих сталей досягається при гартуванні від 1000 – 1050 °С у маслі на мартенсит з послідовним відпуском на сорбіт або троостит.

Клапани вихлопу двигунів внутрішнього спалювання невеликої та середньої потужності виготовляють з сильхромів – хромокремнистих сталей мартенситного класу типу 40Х9С2, 40Х10С2М. Клапани більш потужних двигунів виготовляють з аустенітних сталей.

3. *Аустенітні сталі.* З цих сталей виготовляють ротори, диски, лопатки газових турбін, клапани дизельних двигунів, що працюють при температурах 600 – 700 °С. Хромонікелеві аустенітні сталі для збільшення жароміцності додатково легують вольфрамом, молібденом, ванадієм, ніобієм, бором та іншими елементами. До жароміцних сталей аустенітного класу відносяться сталі 09Х14Н16Б, 09Х14Н19В2БР, 45Х14Н14В2М.

Термообробка цих сталей складається з гартування та старіння при температурах вище експлуатаційних. При старінні виникає виділення з

аустеніту дрібнодисперсних надлишкових фаз, що додатково збільшує опір сталі повзучості.

В табл. 3 наведені головні властивості деяких російських жароміцних сталей.

Більш високі робочі температури (до 1000 – 1100 °С і більше) витримують так звані суперсплави, що виплавлені на основі елементів VIII групи періодичної системи – нікелеві, кобальтові, залізонікелеві сплави. Їх застосовують при виготовленні газотурбінних двигунів для аерокосмічних та промислових енергоустановок. Для роботи при ще більш високих температурах застосовують тугоплавкі метали та керамічні матеріали.

Таблиця 3 –

Властивості жароміцних сталей (ГОСТ 5632 – 72)

Марка	Середні доля основних легуючих елементів, %	Температура, °С		Жароміцні властивості		
		макси-мальна робоча	початку інтенсив-ного окиснення	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Темпера тура випробу-вання, °С
Перлітні сталі						
12X1МФ	0,12 С; 0,1 Cr; 0,3 Мо; 0,2 V	570 - 585	600	140	84	560
25X2М1Ф	0,25 С; 2,3 Cr; 1 Мо; 0,4 V	520 - 550	600	160 - 220	70	550
Мартенситні сталі						
15X5М	До 0,15 С; 5,2 Cr; 0,5 Мо;	600	650	100	40	540
Аустенітні сталі						
12X18Н10Т	До 0,12 С; 18 Cr; 10 Ni; 0,5 Ti	600	850	80 - 100	30 - 40	660
10X11Н20Т3Р	До 0,10 С; 11 Cr; 20 Ni; 2,6 Ti; 0,02 В	700	850	400	—	700