شرکت پشتیبانی ساخت و تهیه کالای نفت تهران

آشنایی با پره های توربین گازی

مدیریت پشتیبانی ساخت و تعمیرات ماشین آلات دوار

بسم الله الرحمن الرحیم

شرکت ملی نفت ایران

شرکت پشتیبانی
ساخت و تهیه
کالای نفت تهران

آشنایی با پره‌های توربین های گازی

۱ـ مقدمه	۵
۲ـ توربین گازی	۵
۳ـ پره‌های توربین گازی	۸
۳ـ۱ـ پره‌های ثابت	۸
۳ـ۲ـ پره‌های متحرک	۱۱
۴ـ مواد ساخت پره‌های توربین	۱۱
۵ـ مراحل تدوین دانش فنی و ساخت پره	۱۳
۵–۱– شناسایی پره	۱۳
۵–۲– تهیه شمش سوپرآلیاژ	۱۳
۵–۳– طراحی و ساخت قالب فلزی	۱۳
۵–۴– طراحی و ساخت گیج‌های کنترل ابعادی	۱۳
۵–۵ طراحی سیستم راهگاهی	۱۳
۵–۶– تهیه قالب‌های سرامیکی	۱۳
۵–۷– ریخته‌گری پره	۱۴
۵–۸– کنترل کیفی	۱۴
۵–۹– انجام عملیات فشار داغ (جِنَب)	۱۴
۵–۱۰– ایجاد کانال‌های خنک کننده	۱۴
۵–۱۱– ماشینکاری	۱۴
۵–۱۲– پوشش‌دهی	۱۵
۵–۱۳– عملیات حرارتی	۱۵
۵–۱۴– شات پین	۱۵
۵–۱۵– ردیف‌چینی و بسته‌بندی	۱۵
۶ـ آشنایی با شرکت مهندسی موادکاران	۱۵

۱- مقدمه

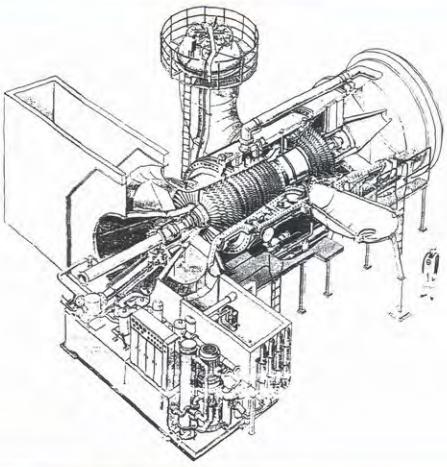
توربین‌های گازی در صنایع نفت و گاز به طور عمده در زمینه‌های پمپ و انتقال نفت و گاز و همچنین تامین برق کاربرد دارند. وجود ۶۵۰ دستگاه توربین‌گازی با بیش از ۳۶ مدل در صنایع نفت و گاز ایران تاکنون (سال ۱۳۸۳) و پیش‌بینی افزایش تعداد آنها در سال‌های آتی از یک طرف و ارزبری بالا و محدودیت‌های موجود در تامین قطعات بویژه پره‌های توربین‌گازی از بازارهای خارجی از طرف دیگر، لزوم تامین قطعات توربین‌های‌گازی از بازارهای داخلی و حمایت از تولیدکنندگان داخلی را بیش از پیش می‌طلبید. جدول ۱، انواع و تعداد توربین‌های گازی موجود در صنایع نفت و گاز ایران را نشان می‌دهد.

تضمین کیفیت پره‌های توربین گازی به لحاظ حساسیت و استراتژیک بودن آنها برای مصرف‌کنندگان و همچنین پیچیدگی این قطعات به لحاظ شرایط کاری خاص آنها، تولید این قطعات‌را مستلزم دستیابی به سطح بالایی‌از دانش فنی و تکنولوژی می‌نماید که خوشبختانه این پتانسیل در داخل کشور وجود دارد. امید است با اعتقاد راسخ به خودباوری و توانمندی‌های مهندسین و متخصصین داخلی و تجهیزات و امکانات موجود در کشور بتوان در راستای خودکفایی گام‌های مؤثری را برداشت.

۲- توربین گازی

توربین‌های گازی زمینی جهت تبدیل انرژی سوخت به شکل‌های دیگری از انرژی اعم از الکتریکی یا مکانیکی طراحی و ساخته می‌شوند. یک توربین گازی اصولاً متشکل از یک بخش ژنراتورگازی‌و یک بخش تبدیل قدرت می‌باشد. بخش ژنراتور گازی شامل کمپرسور، محفظه احتراق و توربین می‌باشد.

در یک توربین گازی، هوا توسط قسمت‌کمپرسور از اتمسفر مکیده می‌شود.کمپرسور دارای ردیف‌های‌متناوبی ازپره‌های متحرک و ثابت می‌باشد که عملکرد آنها باعث فشرده شدن هوای ورودی می‌شود.



جدول ۱ - انواع توربین گازی موجود در صنایع نفت و گاز ایران

No	Manufacture	Model	South Fields		N.I.G.C		Pipeline Affairs		Offshore		Petrochem.		Refineries		Total
			Power	QTY.	Power	QTY.	Power	QTY.	Power	QTY.	Power	QTY.	Power	QTY.	QTY.
1	Solar	Saturn	1000-1300	30			1000-1300	16	1000	9					55
2		Centaur	4000-4500	68	4500	3	4000	33	4000	3					107
3		Taurus					6500	8							8
4		Mars	12600	3			12600	2	1260	9					14
5	ABB-ALSTOM	TA 1500	1500	26			1500	8	1500	11					45
6		TA 1750	1750	60			1750	33	1750	10					103
7		TB 4000	4000	23	4000	3	4000	11							37
8		TB 5000	5000	1			5000	4					5000	3	8
9		TD 4000	4000	7					4000	4					11
10		Typhon			4850(kw)	6	6500	6							12
11		Tornado							8448	2					2
12		Alsthom6541													
13	Rolls Royce	EM 610B											42Mw	1	1
14		EM 85			6.5Mw	8									8
15		Avon 1533-35	18000	50	9.5-13	16					9 Mw	1			67
16		Olympus			20 Mw	5	26000	2			11 Mw	1			8
17	Sulzer	S1SN(6311)							4024	5					5
18		S 7	14000	8			13400	18							26
19	Coper Rolls	501k	12Mw	3											3
20	Alison	501k					4000	5					2.5 Mw	2	7
21	Kongsberg	SG2			1.5	2	1300	2							4
22	Neveski	gtk10-3			10 Mw	34									34
23	Sumy	GPU16			16Mw	14									14
24	Nouvo pignone	MS 5002C			28.3Mw	9									9
25		PGT5					6700	15							15
26		MS 6000											30Mw	3	3
27	Dresser Rand	D990			4.8 Mw	7									7
28	Mitsubishi										10 Mw	2			2
29	MAN	THM 1203							7110	6					6
30	Werkspoor	W72M	8500	12											12
31	Toshiba	13D									64Mw	4			4
32	Hitachi	5321									25 Mw	2			2
33		6541									38 Mw	3			3
34	Westing house	W101G			8Mw	4					12 Mw	5	7 Mw	1	10
35	GHH	GTAN91100									19Mw	1			1
36	Av Co	FT 25					3000	1							1

بخشی از هوای فشرده وارد محفظه احتراق شده با سوخت مخلوط می‌گردد. احتراق حاصل از سوخت و هوای فشرده منجر به تولید گازهایی با دماهای بالا می‌گردد که وارد قسمت توربین می‌شود. توربین نیز شامل چند ردیف از پره‌های ثابت و متحرک می‌باشد. گازهای داغ حین ورود به قسمت توربین به پره‌های ثابت که به شکل نازل می‌باشند برخورد می‌کنند. در این حالت فشار گازها کاهش یافته و سرعت آنها افزایش می‌یابد. سپس گازهای داغ به پره‌های متحرک برخورد نموده و در اثر برخورد با ایرفویل پره‌ها، سبب چرخش مجموعه پره، دیسک و شفت می‌گردند.
بخشی از کار تولید شده در توربین جهت چرخش کمپرسور به کار می‌رود و باقیمانده آن به تجهیزات از توربین منتقل می‌شود.
در انتهای قسمت توربین، ردیف‌های اضافی از پره‌ها وجود دارد که فشار گازها توسط آنها به حالت اولیه در موقع ورود به کمپرسور برمی‌گردد. این ردیف‌های اضافی از پره‌ها در صورت‌مجزا بودن‌از ردیف‌های اولیه توربین، خودیک توربین مجزا در نظر گرفته می‌شوند که تحت عنوان توربین قدرت (Power Tubine) معروف هستند. در توربین‌های گازی با یک چنین طراحی به آن بخش از توربین که بلافاصله بعد از محفظه احتراق قرار گرفته توربین کمپرسور (Compressor Turbine) اطلاق می‌شود.
توربین‌های گازی با توان بالا که عمدتاً به منظور تولید برق طراحی شده‌اند و اصطلاحاً به آنها Generator Drive گفته می‌شود دارای بخش‌توربین قدرت نمی‌باشند. اماتوربین‌های گازی که به منظور انتقال نفت وگاز طراحی شده‌اند و به‌آنها Mechanical Driveگفته می‌شود شامل بخش‌توربین قدرت می‌باشند. در صنایع نفت و گاز ایران از هر دو گروه توربین گازی مذکور وجود دارد. به عنوان نمونه، توربین گازی مدل MS 6001B برای تولید برق، توربین گازی مدل Type S7 و TA1750 برای انتقال نفت و مدل EM 85 برای انتقال گاز مون‌د استفاده قرارگرفته‌اند. شکل۱ نمونه‌ای از توربین‌گازی نوع Mechanical Drive را که در مناطق جنوب ایران در زمینه انتقال نفت موردبهره‌برداری قراردارد را نشان‌می‌دهد. این مدل از توربین‌گازی دارای بخش توربین قدرت می‌باشد.

شکل ۱ ـ توربین گازی مدل Type S7 ساخت شرکت Sulzer

۳ـ پره‌های توربین گازی

یک توربین گازی در قسمت‌های کمپرسور و توربین (توربین کمپرسور یا توربین قدرت) دارای یک یا چندردیف ازپره‌های ثابت و متحرک می‌باشد. پره‌های ثابت و متحرک در توربین‌های گازی مختلف دارای طراحی‌های مختلفی می‌باشند.

با توجه به اینکه‌پره‌های قسمت‌توربین به لحاظ شرایط کاری نسبت به پره‌های قسمت کمپرسور بیشتر دچار تخریب می‌شوندو سهم عمده‌ای از تقاضای بازار برای‌پره‌های قسمت توربین می‌باشد مطالب ارائه شده عمدتاً مربوط به این پره‌ها می‌باشد.

۳ـ۱ـ پره‌های ثابت

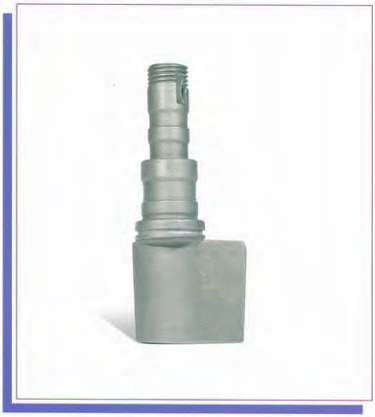
پره‌های‌ثابت وظیفه سرعت‌دهی به‌گازهای ورودی به توربین را دارند. محصولات احتراق که دارای فشار بالایی می‌باشند در مسیر ایجاد شده توسط پره‌های ثابت، در اثر افت فشار، افزایش سرعت پیدا کرده و همچنین جهت مناسب برای برخورد به پره‌های متحرک را پیدا می‌کنند.

شرایط کاری پره‌های ثابت به گونه‌ای است که در معرض تنش‌های گریز از مرکز نمی‌باشند ولی به دلیل آنکه گازهای ورودی به توربین دارای دما و فشار بالایی هستند امکان از بین رفتن سریع این پره‌ها بویژه پره‌های ردیف اول در اثر خسارت‌های ناشی از اکسیداسیون و خوردگی، خزش، خستگی سیکل پایین و سایر موارد وجود دارد.

پره‌های ثابت با توجه به شرایط کاری در توربین‌های مختلف و همچنین ردیف‌های مختلف یک توربین دارای جنس و طراحی متنوعی‌می‌باشند. پره‌های‌ثابت درشکل‌های مختلف به صورت تکی و یا سگمنت ۲ با چند تایی طراحی و ساخته می‌شوند. معمولاً پره‌های ثابت ردیف‌های جلویی جهت محافظت و خنک‌کاری دارای‌پوشش و یا کانال و سوراخ‌های هوا می‌باشند. شکل‌های۲ و۳طراحی‌های مختلفی ازپره‌های ثابت در توربین‌های مدلEM85 و مدل Centaur را نشان

شکل ۲ـ الف ـ پره ثابت ردیف ۱ توربین کمپرسور (CT) ـ توربین گازی Ruston-EM85

شکل ۲ـ الف ـ پره ثابت ردیف ۲ توربین کمپرسور (CT) ـ توربین گازی Ruston-EM85



شکل ۲ ـ ج ـ پره ثابت ردیف ۱ توربین
قدرت (PT) ـ توربین گازی Ruston-EM85

شکل ۲ ـ د ـ پره ثابت ردیف ۲ توربین
قدرت (PT) ـ توربین گازی Ruston-EM85

شکل۳ ـ الف ـ پره ثابت (سگمنت) ردیف ۱ توربین
کمپرسور(CT) توربین گازی Solar - Cenataur

شکل۳ ـ ب ـ پره ثابت (سگمنت) ردیف ۱ توربین
قدرت (PT) توربین گازی Solar - Cenataur

شکل ۳ ـ پره متحرك ردیف ۱ کمپرسور
توربین (CT) ـ توربین گازی Sulzer - Type S7

شکل ۴ ـ پره متحرك ردیف ۱ کمپرسور
توربین (CT) ـ توربین گازی Rolls Royce - Avon

شکل ۵ ـ الف ـ پره متحرك ردیف ۱ کمپرسور
توربین (CT) ـ توربین گازی Ruston - Tb4000

شکل ۵ ـ ب ـ پره متحرك ردیف ۱ کمپرسور
توربین (CT) ـ توربین گازی Ruston - Tb4000

می‌دهد. همچنین تصاویری از انواع پره‌های ثابت تولید شده (مهندسی معکوس) در شرکت موادکاران در انتهای کتابچه ارائه شده است.

۳-۲- پره‌های متحرک

پره‌های متحرک‌توربین با تبدیل انرژی‌درونی‌گازهای ورودی به انرژی مکانیکی موجب چرخش روتور و به دنبال آن کمپرسور می‌شوند.

پره‌های متحرک نیز مانند پره‌های ثابت به دلیل تماس با گازهای با دما و فشار بالا در معرض انواع خرابی‌ها می‌باشند. پره‌های متحرک علاوه بر اینکه تحت تنش‌های ناشی از برخورد گازهای داغ به سطح ایرفویل قرار دارند در معرض تنش‌های گریز از مرکز شدید بواسطه سرعت دورنی بالای محور توربین (چندین هزار دور در دقیقه) نیز می‌باشند و بنابراین تنش‌های وارد بر پره‌های متحرک بیشتر از تنش‌های وارد بر پره‌های ثابت می‌باشد.

پره‌های متحرک در مدل‌های مختلف توربین گازی و همچنین در ردیف‌های مختلف یک نوع مدل‌توربین به دلیل شرایط کاری مختلف دارای جنس و طراحی‌های متنوعی می‌باشند. اکثر پره‌های متحرک از ۳ قسمت اصلی ایرفویل (Air Foil) شنگ (Shank) و ریشه (Root) تشکیل می‌شوند. برخی از پره‌های توربین علاوه بر این موارد دارای قسمت شرود (Shroud) نیز می‌باشند. شکل‌های۳ و۴ نمونه‌هایی‌از پره‌های متحرک توربین گازی بدون شرود و دارای شرود را نشان می‌دهند. در شکل ۴ قسمت‌های مختلف پره متحرک نشان شده است.همچنین تصاویری از انواع پره‌های متحرک تولید شده (مهندسی معکوس) در شرکت موادکاران در انتهای کتابچه ارائه شده است.

۴- مواد ساخت پره‌های توربین

پره‌های قسمت توربین (توربین کمپرسور و توربین قدرت) بدلیل کار در درجه حرارت بالا و محیط خورنده و اعمال شوک‌های حرارتی، تنش‌های خستگی (در ریشه پره‌های متحرک)،تنش‌های ضربه‌ای(ناشی از برخورد ذرات‌خارجی) و سایر تنش‌ها دارای شرایط کاری بسیار سخت بوده و در معرض انواع خرابی‌ها قرار دارند. بر این اساس، ساخت پره‌های توربین نیازمند بکارگیری مواد ساخت مناسب، طراحی مناسب (طراحی‌کانال و سوراخ‌های هوا جهت خنک کاری پره‌ها / یا استفاده از پوشش) و همچنین بکارگیری امکانات تجهیزات و روش‌های ساخت و تولید ویژه‌ای می‌باشد.

با توجه به شرایط‌کاری این پره‌ها، معیارهایی که در انتخاب مواد آنها مطرح می‌باشد عبارتند از:

- **مقاومت به خزش**
- **مقاومت به خستگی**
- **مقاومت به اکسیداسیون**
- **مقاومت به خوردگی**
- **مقاومت به سایش**
- **مقاومت به ضربه**
- **قابلیت ریخته‌گری**
- **قابلیت جوشکاری**

سوپر آلیاژها به دلیل دارا بودن خواص سازگاربا شرایط‌کاری و تولید پره‌ها سال‌هاست که به عنوان مواد ساخت پره‌های توربین شناخته شده‌اند و همچنان به موازات پیشرفت در طراحی و ساخت توربین‌های جدید، تحقیقات در زمینه توسعه سوپرآلیاژها نیز ادامه دارد.

سوپرآلیاژها قابلیت کار در دما و تنش مکانیکی بالا و در محیط‌های خورنده را داشته و عموماً بر پایه یکی از عناصر نیکل، کبالت و آهن می‌باشند. سوپر آلیاژهای پایه نیکل بدلیل داشتن ترکیب بهینه‌ای از خواص مورد اشاره در بالا نسبت به ۲ گروه دیگر از اهمیت بیشتری برخوردارند.

جدول ۲ جنس پره‌های قسمت توربین (توربین کمپرسور و توربین قدرت)انواع توربین‌های‌گازی مورد استفاده درصنایع نفت و گاز ایران را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول۲ مشاهده می‌شوداکثر پره‌ها ازجنس سوپرآلیاژ می‌باشند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی‌این سوپر آلیاژها در انتهای کتابچه ارائه شده است.

جدول ۲ ـ آلیاژ پره‌های توربین‌های گازی مورد استفاده در صنایع نفت و گاز ایران

No	Model	Compressor Turbine			Power Turbine		
		St.No	Blades Materials	Vanes Materials	St.No	Blades Materials	Vanes Materials
1	TA1750	2	IN738	1st:IN939 2nd:IN738	2	Nimonic 80A	IN713LC
2	EM85	2	Nimonic 80A	IN738	2	1st:Nimonic80A 2nd:S.Steel	S.Steel
3	TB4000 TB5000	2	IN738	1st:IN939 2nd:IN738	2	Nimonic 80A	Nimocast 90
4	Saturn	2	Mar-M-421	1st: X45M 2nd: N-155	1	Inco713	N-155
5	Centaur	2	Mar-M-421	X 45M	1	713 cast alloy	N-155
6	Mars	2	Inco 792	FSX 414	2	Waspaloy	N-155
7	Type S7	4	IN 738LC Nimonic80A	IN 738LC Nimonic90	2	Nimonic80A	Nimonic80A
8	Avon	3	1st:IN 738 2nd:Nimonic115 3rd:Nimonic105	1st:X-40 2nd:Nimonic242 3rd:Nimonic242			
9	TF25	2	1st: C101 2nd:Mar-M-421	1st:X-40 2nd: N-155	1	Inco713	Inco713
10	501KC	2	IN 738LC	X-40			
11	MS5002B	1	IN 738LC	FSX 414	1	U500	N-155
12	MS6001B	3	1st: GTD111 2nd: IN738 3rd: U500	FSX 414			
13	GT-10B	2	IN792	1st:IN792 2nd: IN939	2	IN792	1st:IN939 2nd: IN738

توجه: اطلاعات این جدول از مجله GTW ستخراج شده است که مربوط به سال‌های ۸۶ ـ ۱۹۸۵ میلادی می‌باشد. بنابراین امکان تغییر جنس پره‌ها در سال‌های اخیر وجود دارد.

۵ـ مراحل تدوین دانش فنی و ساخت پره

۵-۱- شناسایی پره

دراین مرحله‌با استناد به مدارک‌و یا پره‌ای فابریک شناسایی متالوژیکی و مکانیکی پره صورت می‌پذیرد. در شاخه شناسایی متالوژیکی موارد جنس، نوع پوشش، خواص مکانیکی، متالوگرافی و میزان‌عیوب داخلی پره مورد ارزیابی قرار گرفته و با مقایسه نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی پره فابریک و استانداردها و مدارک معتبر سازندگان، شناسنامه این پره اقتباس می‌گر دد، این شناسنامه در ادامه تولید در کنترل کیفی پره‌های تولید شده مورد استناد قرار می‌گیرد.

همچنین درمرحله شناسایی‌مکانیکی پره، نقشه‌های دقیقی از ایرفویل و شنگ پره توسط CMM و ریشه پره توسط Profile Projector تهیه شده و پره میانه برای ساخت قالب فلزی انتخاب می‌گردد، تلرانس‌های ابعادی ایرفویل و ریشه پره با توجه به استانداردهای کنترل ابعادی موجود و اندازه‌گیری پره‌های فابریک اقتباس شده و نقشه کامل شده فابریک تهیه می‌گردد.

- تهیه شمش سوپر آلیاژ

سوپر آلیاژهای مورد نیاز از سازندگان معتبر خارجی خریداری می‌گردد.

۵-۳- طراحی و ساخت قالب فلزی

این مرحله یکی از اساسی‌ترین مراحل ساخت پره می‌باشد زیرا که تامین کننده ابعاد نهایی پره که از دقت‌های بسیار بالایی برخوردار می‌باشد است. همانگونه که در قسمت شناسایی پره اشاره شد نقشه دقیق استخراج شده از پره، مبنای ساخت قالب فلزی قرار می‌گیرد ولی‌می‌بایست درصد انقباض موم و فلز در این قالب در نظرگرفته شود. با توجه به اینکه ممکن است مبردهای مومی قبل از تزریق در داخل قالب فلزی قرار بگیرد محاسبه میزان انقباض نواحی مختلف مدل مومی از فعالیت‌های بسیار پیچیده می‌باشد، جهت تایید و در خط تولید قرار گرفتن قالب فلزی، اولین قطعات ریخته‌گری شده از این قالب‌ها و خود قالب فلزی توسط CMM اندازه‌گیری و ارزیابی می‌شوند.

۵-۴- طراحی و ساخت گیج‌های کنترل ابعادی

گیج‌های کنترل ابعادی مختلفی در مراحل ساخت پره مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از مرحله شناسایی مکانیکی پره و تهیه نقشه‌های‌کامل پره این فعالیت شروع شده و با توجه به شکل و اندازه پره معمولاً سه سری گیج کنترل ابعادی مهیا می‌گردد:

الف ـ گیج‌های کنترل ابعادی موم
ب ـ گیج‌های کنترل ابعادی پره ریختگی
ج ـ گیج‌های کنترل ابعادی ریشه و قسمت‌های ماشینکاری شده‌گیج‌های کنترل موم و پره ریختگی مجهز به ساعت‌های اندازه‌گیری با دقت صدم میلی‌متر گیج‌های کنترل ابعادی ریشه در حد میکرون می‌باشد.

۵-۵ طراحی سیستم راهگاهی

بمنظور حصول بهترین شیب انجمادی و ساختار کریستالی داخلی و دانه‌بندی سطحی، سیستم راهگاهی پره طراحی شده و خوشه‌های مومی و سپس سرامیکی تهیه می‌گردد، بعد از ذوب‌ریزی، طرح مواد مورد ارزیابی خواص متالوژیکی و مکانیکی قرار گرفته و در صورت لزوم تغییراتی در آن اعمال می‌گردد.

۵-۶- تهیه قالب‌های سرامیکی

قالب فلزی تزریق موم در این مرحلع بکار گرفته شده و پره مومی تهیه می‌گردد.پره‌های‌مومی از خارج شدن از قالب در صورت لزوم در قالب‌های نگهدارنده موم قرار گرفته تا کاملاً بصورت‌کنترل‌شده سرد شوند. موم‌ها سپس توسط‌گیج‌های کنترل ابعادی خاصی کنترل شده و·موم‌هایی که از نظر ابعادی‌مورد تایید قرار می‌گیرند در سیستم راهگاهی مونتاژ شده و خوشه مومی تشکیل شده در خط دوغاب‌دهی سرامیکی قرار می‌گیرد. بعد از نشاندن حدود ۱۰ لایه سرامیک برروی این خوشه‌ها، آنها را در دستگاه اتوکلاو قرار داده تا موم آنها تخلیه گردد. سپس خوشه‌های سرامیکی در دمای بالاترازC·1000 پخت می‌شوندتا استحکام لازم جهت ریخته‌گری را کسب نمایند.

۵-۷- ریخته‌گری پره

ریخته‌گری پره‌ها به روش ریخته‌گری دقیق در خلاء صورت می‌پذیرد. به این منظور از کوره VIM (Vacuum Induction Melting) استفاده شده و قالب‌های سرامیکی قبل از ریخته‌گری پیشگرم می‌شوند. هر دوی مراحل پیش‌گرم و ریخته‌گری، در خلاء انجام می‌گردد. طی چند مرحله ریخته‌گری آزمایشی و ارزیابی خواص متالوژیکی و مکانیکی و ابعادی پره‌ها شرایط دمای ذوب ریزی، دمای گرم، سرعت باررریزی و نحوه سرد کردن پره بعد از ذوب‌ریزی تعیین شده و تثبیت می‌گردد. بمنظور کنترل ابعادی پره ریختگی از گیج‌های ساعتی ساخته شده استفاده شده و ابعاد پره ریختگی با توجه به شناسنامه موم همان پره مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین آزمایش‌های FPI، رادیوگرافی، دانه‌بندی، متالوگرافی، کشش و خزش پره‌های ریخته‌گری شده به منظور ارزیابی شرایط ریخته‌گری در این مرحله صورت می‌پذیرد.

۵-۸- کنترل کیفی

بعد از تثبیت شرایط ریخته‌گری،پره‌ها در بچ‌های مشخص ریخته‌گری می‌شوند و آزمایش‌های کنترل کیفی آنها صورت می‌پذیرد تا پره‌های تایید شده به مراحل بعدی تولید ارسال شوند، آزمایش‌های کنترل کیفی به دوگروه تقسیم می‌شوند آزمایش‌های غیر مخرب و آزمایش‌های مخرب.

آزمایش‌های غیرمخرب برروی تمامی پره‌ها صورت می‌پذیرد و شامل آزمایش‌های بازدید چشمی، FPI، رادیوگرافی، دانه‌بندی سطحی و کنترل ابعادی می‌باشد. آزمایش‌های مخرب نیزشامل کشش، خزش، آنالیزشیمیایی و متالوگرافی هستند. نمونه‌های استاندارد آزمایش‌های کشش و خزش از داخل پره‌ها و یا بصورت AS Cast تهیه شده و در دمای محیط و دماهای بالا (تا c۹۸۰۰) موردآزمایش قرارمی‌گیرند. همچنین یک پره از یک بچ ریختگی به طور کامل تخریب شده و در نواحی‌مختلف ایرفویل و ریشه توسط میکروسکوپ و دستگاه آنالیز تصویر، عیوب انقباضی و ناخالصی‌های آن مورد بررسی قرارمی‌گیرند. آنالیز شیمیایی نمونه‌ای از هر بچ ریختگی نیز توسط دستگاه کوانتومتر یا XRF و دستگاه‌های دقیق دیگراندازه‌گیری می‌شود. درتمامی موارد آزمایش‌های غیر مخرب و مخرب، معیارهای‌کنترل کیفی از استانداردهای معتبر جهانی در مورد پره‌های توربین و سوپر آلیاژهای مورد نظر اقتباس می‌شود. کنترل ابعادی پره توسط گیج‌های ساعتی و گیلیون گیج صورت می‌پذیرد. این گیج‌ها توسط پره فابریک مبنا کالیبره می‌شوند و تلرانس‌های ابعادی مورد قبول از پره‌های فابریک و استانداردهای کارخانه‌های سازنده پره اقتباس می‌شود.

۵-۹- انجام عملیات فشار داغ (HIP)

پره‌های تایید شده در کنترل کیفی جهت بالا بردن ضریب اطمینان و کاهش پراکندگی خواص و نهایتاً افزایش طول عمر، جهت عملیات HIP به خارج از کشور ارسال می‌شوند.

۵-۱۰- ایجاد کانال‌های خنک کننده

برخی از پره‌ها بدلیل کارکرد در شرایط‌کاری دمای بالا، نیاز به کانال‌های خنک کننده دارندکه ازدو روش ماهیچه‌گذاری و STEM استفاده می‌گردد. در روش STEM کانال‌های خنک کننده پره توسط دستگاه STEM ایجاد می‌گردند. درروش ماهیچه‌گذاری نیز ازماهیچه‌های سرامیکی‌که بعضاً در داخل محلول‌های شیمیایی‌خاصی حل می‌گردند استفاده می‌گردد. سطوح این کانال‌ها دارای زبری خاصی است که بازدهی خنک‌کنندگی پره‌ها را افزایش می‌دهد. دستگاه STEM در ایران موجود نمی‌باشد و پره‌ها جهت سوراخ کاری مستقیماً بعد از عملیاتHIP در خارج کشور به محل‌کارخانه مورد نظر جهت سوراخ‌کاری ارسال می‌شوند. فعالیت‌های تبادل اطلاعات فنی، ساخت فیکسچرها و سوراخ کاری پره‌های آزمایشی تا بدست آوردن پارامترهای ماشینکاری توسط شرکت سفارش دهنده پیگیری می‌گردد و به محض حصول نتیجه مطلوب، سوراخ‌کاری پره‌های هرست انجام می‌گیرد.

۵-۱۱- ماشینکاری

ریشه پره‌های توربین گازی از دقت ابعادی بسیار بالایی برخوردار هستند و کلاس دقت آنها در حد میکرون است. با توجه به سختی و چقرمگی سوپرآلیاژ، ماشینکاری ریشه پره از روش‌های معمول امکان‌پذیر نیست و معمولاً در تمام دنیا از دستگاه سنگ‌زنی خزشی استفاده می‌شود.

بمنظور سنگ‌زنی خزشی لازم است پره در فیکسچرهای بسیار صلب قرار گیرد تا در اثر نیروهای بالای سنگ‌زنی هیچگونه ارتعاشی در پره صورت نپذیرد. در روش سنگ‌زنی خزشی در هر پاس می‌توان‌چند میلیمتر باربرداری انجام داد و سنگ نیز بطور پیوسته توسط تیزکن تیز می‌گردد تا تلرانس ابعادی قطعه حفظ شود. بعد از سنگ‌زنی، ابعاد پره

توسط گیج‌های کنترل ابعادی شامل پین گیج‌ها، گیج برو و نرو و گیج توازی سطوح وکیفیت سطوح آن توسط FPI مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.
مراحل سنگ‌زنی شامل سنگ‌زنی کاج ریشه، بغل‌ها و سرپره می‌باشد.

۵-۱۲- پوشش‌دهی

قسمت ایرفویل بعضی از پره‌ها توسط پوشش‌های PVD با نفوذی از نوع 22RT پوشش‌دهی می‌شوند. امکانات داخلی و خارجی برای انجام این فرآیندها موجود می‌باشد.

۵-۱۳- عملیات حرارتی

بمنظور بهینه‌کردن ساختار متالوژیکی پره، عملیات حرارتی حل‌سازی جزیی و پیرسازی بر روی پره‌ها صورت می‌پذیرد. این عملیات در کوره‌های تحت خلاء و یا در اتمسفر با گاز محافظ انجام می‌شود.

۵-۱۴- شات پین

بمنظور حذف اثرات مضر سنگ‌زنی خزشی، ریشه پره‌ها بعد از عملیات حرارتی شات‌پین می‌شوند. این‌عملیات نیز توسط دستگاه خاص صورت می‌پذیرد. این دستگاه توسط چندین نازل ساچمه‌هایی با سایز مشخص را با فشار و زاویه مشخص بر روی سطوح ماشینکاری شده می‌باشد تا با ایجاد تنش فشاری سطحی، عمر خستگی ریشه را افزایش دهد.

۵-۱۵- ردیف‌چینی و بسته‌بندی

در آخرین مرحله، پره‌ها بالانس وزنی شده و توسط برنامه کامپیوتری ردیف چینی می‌شوند و همراه مدارک کنترل کیفی در بسته‌بندی مناسب تحویل کارفرما خواهند شد.

۶- آشنایی با شرکت مهندسی موادکاران

در داخل کشور تعدادی از شرکت‌ها در حال ساخت پره‌های توربین‌های گازی می‌باشند که از بین آنها می‌توان به شرکت مهندسی موادکاران اشاره نمود، شرکت مهندسی موادکاران از اوایل سال ۷۰ به صورت‌جدی شروع به مطالعه سوپرآلیاژها و ساخت‌پره‌های توربین نموده است و درحال حاضر پره‌های ردیف اول و دوم توربین فریم ۵ طرحGE، پره‌های ردیف اول و دوم و سوم توربین سولزرS7 و سولار سنتار، پره‌های ردیف اول و دوم توربین رستن 4000TB، پره‌های ردیف‌های اول، دوم، سوم و چهارم توربین BBC، پره متحرک ردیف اول توربین فریم۶ طرح GE و پره‌های ثابت توربین رستن EM85 و پره‌های تورک کنورتور توربین میتسوبیشی و پره متحرک یک توربین ۲۰۰ کیلوواتی در خط تولید شرکت قرار دارند. همچنین مرحله تدوین تکنولوژی و نمونه‌سازی پره پیشرفته فریم ۹ پایان یافته و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است و پره‌های متحرک ردیف اول و دوم توربین رویزرولز مدل Avon، پره‌های متحرک ردیف دوم و سوم توربین فریم ۶ طرح GE و رویزرولز Avon نیز در مرحله تدوین تکنولوژی و نمونه‌سازی می‌باشند. این‌شرکت توانسته‌تاکنون ریخته‌گری ۱۰۶ ست پره را به پایان برساند که از این میان ۴۷ ست پره از انواع مختلف را به طرفین قرارداد خود تحویل داده و پیش بینی می‌گردد که تا پایان سال ۱۳۸۳، ۲۵ ست دیگر نیز به کارفرمایان محترم تحویل گردد. فعالیت‌های انجام شده بر روی مهندسی معکوس ۲۱ مدل پره مختلف توان مهندسی شرکت را در زمینه تدوین دانش فنی و نمونه‌سازی به میزان خوبی بالا برده است. در مسیر تولید پره در این شرکت پارامترهای مربوط به ریخته‌گری پره‌هاکاملاً شناخته شده‌اند و روند ریخته‌گری روتین می‌باشد و عمده فعالیت‌های اخیر معطوف روتین کردن ماشینکاری و پوشش پره‌ها بوده است. مسلماً در انجام پروژه‌هایی که فن‌آوری در درجه اول اهمیت آنها قرار دارد نیروی انسانی مجرب و تجهیزات مناسب دو محور موفقیت پروژه محسوب می‌شود. جدول ۳ لیستی از تجهیزات موجود در شرکت موادکاران در زمینه ساخت پره‌های توربین گازی را نشان می‌دهد. تصاویری از پره‌های ساخته شده در شرکت موادکاران نشان داده شده است.
شکل ۶ نیز پیمانکاران خارجی شرکت موادکاران و فعالیتهای آنها را معرفی می‌نماید.

جدول (۳)- تجهیزات مورد استفاده برای ساخت قطعات در شرکت موادکاران

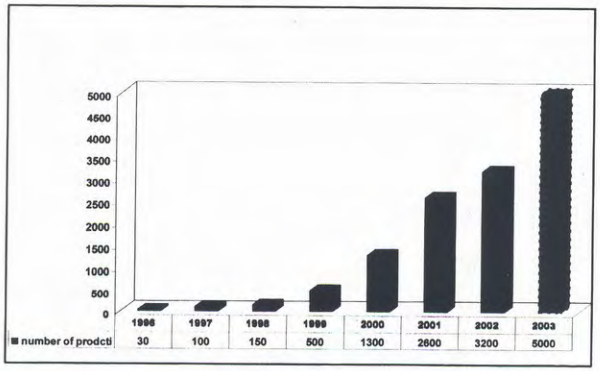
ردیف	نام تجهیزات	تعداد	شرایط
۱	کوره ریخته گری خلاء یک چمبره	۱	فعال
۲	کوره ریخته گری خلاء دو چمبره	۱	در دست تهیه
۳	بویلر نگهدارنده موم و بازیافت موم	۳	فعال
۴	دستگاه تزریق موم	۱	فعال
۵	دستگاه اتوکلاو	۱	فعال
۶	کوره پخت قالب سرامیکی و ماهیچه	۲	فعال
۷	خط کامل ساخت قالب سرامیکی	۱	فعال
۸	خط تولید ماهیچه به روش تزریقی و Slipcast و حلقه سرامیکی و Pouring cup	۱	فعال
۹	دستگاه سنگ خزشی	۱	فعال
۱۰	دستگاه فرم دهی سر پره	۱	فعال
۱۱	دستگاه وایرکات دقیق	۱	فعال
۱۲	دستگاه اسپارک	۱	فعال
۱۳	دستگاه شات پین	۱	فعال
۱۴	دستگاه سند بلاست	۱	فعال
۱۵	دستگاه تمیز کاری بادی و برقی	۸	فعال
۱۶	دستگاه برش	۲	فعال
۱۷	کوره پیش گرم قالب سرامیکی	۳	فعال
۱۸	کوره پیش گرم بزرگ قالب سرامیکی	۱	در دست ساخت
۱۹	دستگاه اندازه گیری CMM	۱	فعال
۲۰	دستگاه اندازه گیری Profile Projector	۱	فعال
۲۱	تجهیزات رادیو گرافی 400,250KV	۲	فعال
۲۲	تجهیزات رادیو گرافی مایکرو فوکال 320KV	۱	در حال راه اندازی
۲۳	تجهیزات بررسی با مایعات نافذ (FPI)	۱	فعال
۲۴	تجهیزات پوشش‌دهی پلاتین آلومیناید (22RT)	۱	فعال
۲۵	دستگاه خستگی حرارتی با نمونه جلنی	۱	فعال
۲۶	کوره خلاء $1100^{o}C$	۱	فعال

ادامه جدول (۳)- تجهیزات مورد استفاده برای ساخت قطعات در شرکت موادکاران

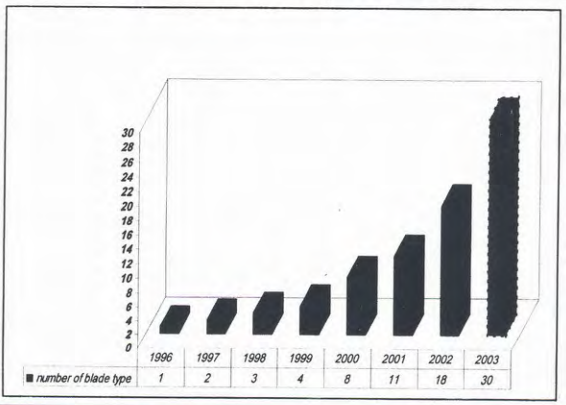
ردیف	نام تجهیزات	تعداد	شرایط
۲۷	کوره عملیات حرارتی $1250^{o}C$	۲	فعال
۲۸	دستگاه کوانتومتر	۱	فعال
۲۹	دستگاه آنالیز جذب اتمی	۱	فعال
۳۰	دستگاه آنالیز اشترو لاین	۱	فعال
۳۱	دستگاه کشش	۱	فعال
۳۲	دستگاه خزش	۱	فعال
۳۳	دستگاه سختی سنجی	۱	فعال
۳۴	تجهیزات تهیه نمونه متالوگرافی	۱	فعال
۳۵	میکروسکوپ نوری	۳	فعال
۳۶	دستگاه Image Analyser	۲	فعال
۳۷	دستگاه میکرو سختی	۱	فعال
۳۸	میکروسکوپ الکترونی	۱	فعال
۳۹	فرز CNC	۱	فعال

در ادامه نمودارهایی در خصوص تعداد پره‌های تولید شده در شرکت مهندسی موادکاران، انواع محصولات، شرکت‌های همکار خارجی و نهایتا تنوع پره‌های تولید شده در شرکت مهندسی موادکاران ارائه شده است.

Number of Manufactured Blades in Mavadkaran Eng. Company



Variety of Manufactured Gas Turbine Blades in Mavadkaran Eng. Co.



RANGE OF PRODUCTS IN MAVADKARAN Eng. COMPANY

First stage blade 10MW/300 gr

First stage blade 25MW/1.2 Kg

Second stage blade 10MW/700 gr

Third stage blade 10MW/900 gr

RANGE OF PRODUCTS IN MAVADKARAN Eng. COMPANY

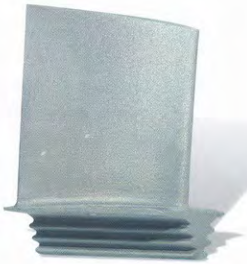
First stage blade 3MW/150 gr

Second stage blade 3MW/180 gr

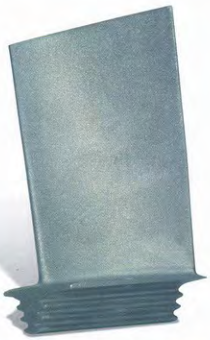
First stage blade 6.5MW/500 gr

Second stage blade 6.5MW/1.5 Kg

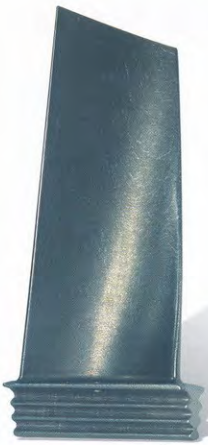
RANGE OF PRODUCTS IN MAVADKARAN Eng. COMPANY



First stage blade 3MW/70 gr



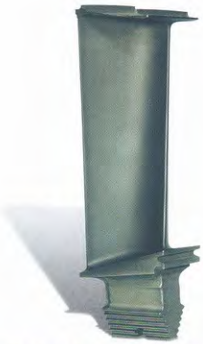
Second stage blade 3MW/80 gr



Third stage blade 3MW/90 gr

First stage blade 200KW/40 gr

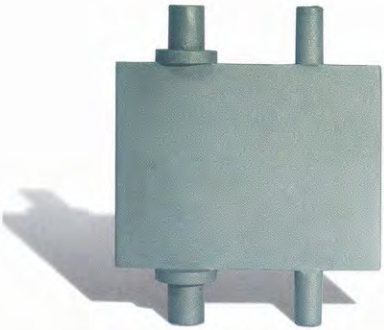
RANGE OF PRODUCTS IN MAVADKARAN Eng. COMPANY



First stage blade 12MW/300gr

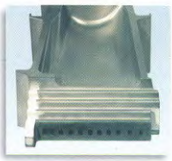
Second stage blade 12MW/500 gr

First stage blade 85MW/350 gr



Second stage blade 85MW/450 gr

RANGE OF PRODUCTS IN MAVADKARAN Eng. COMPANY



First stage blade 123MW/12.5 Kg

First stage blade 38MW/2 Kg

Second stage blade 38MW/2.5 Kg

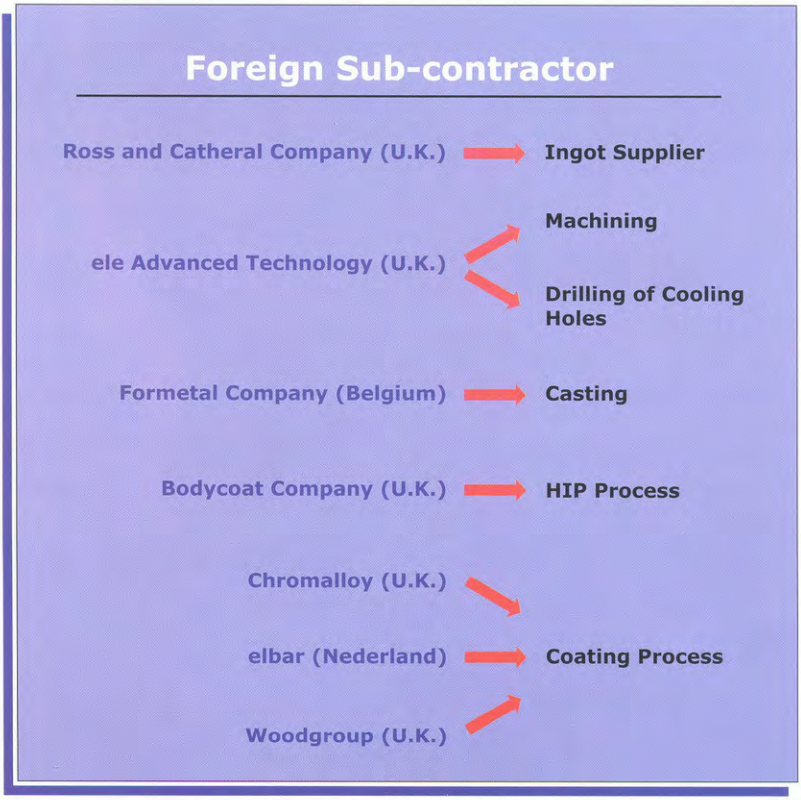
RANGE OF PRODUCTS

First stage blade 35MW/830gr

Second stage blade 35MW/930 gr

Third stage blade 35MW/1 kg

Fourth stage blade 35MW/1.2 kg



شکل ۶ ـ معرفی پیمانکاران خارجی شرکت مهندسی موادکاران

Table 1 Nominal Compositions and densities of selected cast nickel-base superalloys

Alloy	Composition, %														Density g/ cm^3
	C	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	Hf	Zr	B	Ni	other	
IN-718	0.04	18.5	....	3.0	....	....	5.1	0.5	0.9	....	....	....	Bal	18.5 Fe	8.22
Rene' 200	0.03	19.0	12.0	3.2	....	3.1	5.1	0.5	1.0	....	....	....	bal	....	....
IN-625	0.06	21.5	....	8.5	....	....	4.0	0.2	0.2	....	....	....	bal	2.5 Fe	....
IN-713C	0.12	12.5	....	4.2	....	....	2.0	6.1	0.8	....	0.10	0.012	bal	....	8.25
IN-713LC	0.05	12.0	....	4.5	....	....	2.0	5.9	0.6	....	0.10	0.01	bal	....	8.00
IN-713 Hf (MM 004)	0.05	12.0	....	4.5	....	....	2.0	5.9	0.6	1.3	0.10	0.01	bal	....	....
IN-100	0.18	10.0	15.0	3.0	....	....	....	5.5	4.7	....	0.06	0.014	bal	1.0 V	7.75
IN-738 C	0.17	16.0	8.5	1.75	2.6	1.75	0.9	3.4	3.4	....	0.10	0.01	bal	....	8.11
IN-738 LC	0.11	16.0	8.5	1.75	2.6	1.75	0.9	3.4	3.4	....	0.04	0.01	bal	....	....
IN-792	0.21	12.7	9.0	2.0	3.9	3.9	....	3.2	4.2	....	0.10	0.02	bal	....	8.25
IN-939	0.15	22.4	19.0	....	2.0	1.4	1.0	1.9	3.7	....	0.10	0.009	bal	....	8.2
B-1900	0.10	8.0	10.0	6.0	....	4.3	....	6.0	1.0	....	0.08	0.015	bal	....	8.2
B-1900 Hf (MM 007)	0.10	8.0	10.0	6.0	....	4.3	....	6.0	1.0	1.5	0.08	0.015	bal	....	8.25
B-1910	0.10	10.0	10.0	3.0	....	7.0	....	6.0	1.0	....	0.10	0.015	bal	....	....
MM 002	0.15	9.0	10.0	....	....	2.5	....	5.5	1.5	1.5	0.05	0.015	bal	....	....
MAR-M 200	0.15	9.0	10.0	....	12.5	....	1.8	5.0	2.0	....	0.05	0.015	bal	....	8.53
MAR-M 200 Hf (MM 009)	0.14	9.0	10.0	....	12.5	....	1.0	5.0	2.0	2.0	....	0.015	bal	....	....
MAR-M 246	0.15	9.0	10.0	2.5	10.0	1.5	....	5.5	1.5	....	0.05	0.015	bal	....	8.44
MAR-M 246 Hf (MM 006)	0.15	9.0	10.0	2.5	10.0	1.5	....	5.5	1.5	1.4	0.058	0.015	bal	....	....
MAR-M 247 (MM 0011)	0.16	8.5	10.0	0.65	10.0	3.0	....	5.6	1.0	1.4	0.04	0.015	bal	....	8.53
CM 247LC	0.07	8.1	9.3	0.5	9.5	3.0	....	5.6	0.7	1.4	0.01	0.015	bal	....	....
Rene' 41	0.08	19.0	10.5	9.5	....	....	....	1.7	3.2	....	0.01	0.005	bal	....	....
Rene' 77	0.08	15.0	18.5	5.2	....	....	....	4.25	3.5	....	....	0.015	bal	....	7.91
Rene' 80	0.17	14.0	9.5	4.0	4.0	....	....	3.0	5.0	....	0.03	0.015	bal	....	8.16
Rene' 80 Hf	0.15	14.0	9.5	4.0	4.0	....	....	3.0	4.7	0.8	0.01	0.015	bal	....	....
Rene' 100	0.15	9.5	15.0	3.0	....	....	....	5.5	4.2	....	0.06	0.015	bal	1.0 V	7.75
Rene' 125 Hf (MM 005)	0.10	9.0	10.0	2.0	7.0	3.8	....	4.8	2.6	1.6	0.05	0.015	bal	....	....
Nimocast 75	0.12	20.0	....	....	....	....	....	....	0.5	....	....	....	bal	....	8.44
Nimocast 80	0.05	19.5	....	....	....	....	....	1.4	2.3	....	....	....	bal	1.5 Fe	8.17
Nimocast 90	0.06	19.5	18.0	....	....	....	....	1.4	2.4	....	....	....	bal	1.5 Fe	8.18
Nimocast 95	0.07	19.5	18.0	....	....	....	....	2.0	2.9	....	0.02	0.015	bal	....	....
Nimocast 100	0.20	11.0	20.0	5.0	....	....	....	5.0	1.5	....	0.03	0.015	bal	....	....
Udimet 500	0.08	18.5	16.5	3.5	....	....	....	3.0	3.0	....	....	0.006	bal	....	8.02
Udimet 700	0.08	14.3	14.5	4.3	....	....	....	4.25	3.5	....	0.02	0.015	bal	....	....
Udimet 710	0.13	18.0	15.0	3.0	1.5	....	....	2.5	5.0	....	0.08	....	bal	....	8.08
C 130	0.04	21.5	....	10.0	....	....	....	0.8	2.6	....	....	....	bal	....	....
C 242	0.30	20.0	10.0	10.3	....	....	....	0.1	0.2	....	....	....	bal	....	....
C 263	0.06	20.0	20.0	5.9	....	....	....	0.45	2.15	....	0.02	0.001	bal	....	....
C1023	0.15	15.5	10.0	8.0	....	....	....	4.2	3.6	....	....	0.006	bal	....	....
Hastelloy X	0.08	21.8	1.5	9.0	0.6	....	....	....	....	....	....	....	bal	18.5 Fe, 0.5 Mn, 0.3 Si	....
Hastelloy S	0.01	16.0	....	15.0	....	....	....	0.40	....	....	....	0.009	bal	3.0 Fe, 0.02 La, 0.65 Si, 0.55 Mn	....
Waspaloy	0.06	19.0	12.3	3.8	....	....	....	1.2	3.0	....	0.01	0.005	bal	0.45 Mn	....
NX 188	0.04	....	....	18.0	....	....	....	8.0	....	....	....	....	bal	....	....
SEL	0.08	15.0	26.0	4.5	....	....	....	4.4	2.4	....	....	0.015	bal	....	....
CMSX-2(a)	....	8.0	4.6	0.6	8.0	6.0	....	5.6	1.0	....	....	....	bal	....	8.6
GMR-235	0.15	15.0	....	4.8	....	....	....	3.8	2.0	....	....	0.05	bal	0.3 Mn, 0.4 Si, 11.0 Fe	8.0
CMSX-3(a)	....	8.0	4.6	0.6	8.0	6.0	....	5.6	1.0	0.10	....	....	bal	....	8.6
CMSX-4(a)	....	6.4	9.6	0.6	6.4	6.5	....	5.6	1.0	0.10	....	....	bal	3.0 Re	8.7
CMSX-6(a)	....	9.9	5.0	3.0	....	2.0	....	4.8	4.7	0.05	....	....	bal	....	7.98
GMR-235	0.15	15.0	....	4.8	....	....	....	3.5	2.5	....	....	0.05	bal	4.5 Fe	8.04
SEL-15	0.07	11.0	14.5	6.5	1.5	....	0.5	5.4	2.5	....	....	0.015	bal	....	8.7
UDM 56	0.02	16.0	5.0	1.5	6.0	....	....	4.5	2.0	....	0.03	0.070	bal	0.5 v	8.2
M-22	0.13	5.7	....	2.0	11.0	3.0	....	6.3	....	....	0.06	....	bal	....	8.63
IN-731	0.18	9.5	10.0	2.5	....	....	....	5.5	4.6	....	0.06	0.015	bal	1.0 V	7.75
MAr-M 421	0.14	15.8	9.5	2.0	3.8	....	....	4.3	1.8	....	0.05	0.015	bal	....	8.08
MAR-M 432	0.15	15.5	20.0	....	3.0	2.0	2.0	2.8	4.3	....	0.05	0.015	bal	....	8.16
MC-102	0.04	20.0	....	6.0	2.5	0.6	6.0	....	....	....	....	....	bal	0.25 Si, 0.30 Mn	....
Nimocast 242	0.34	20.5	10.0	10.5	....	....	....	0.2	0.3	....	....	....	bal	1.0 Fe, 0.3 Mn, 0.3 Si	8.40
Nimocast 263	0.06	20.0	20.0	5.8	....	....	....	0.5	2.2	....	0.04	0.008	bal	0.5 Fe, 0.5 Mn	8.36

(a) Single crystal

Table 2 Nominal Compositions of selected cast cobalt-base superalloys

Aloey	Composition, % C	Cr	Ni	W	Ta	Nb	Mo	Ti	B	Zr	Fe	Co	other	Density G/cm³
HS-21 (MOD Vitallium) ...	0.25	27.0	3.0	....	....	....	5.0	....	....	....	1.0	bal	....	....
HS-31 (X-40)	0.50	25.0	10.0	7.5	....	....	....	....	....	0.17	1.5	bal	0.4 Si	....
HS-25 (L-605)	0.10	20.0	10.0	15.0	....	....	....	....	....	....	....	bal	....	....
ML-1700	0.2	25.0	....	15.0	....	....	....	....	0.4	....	....	bal	....	....
WI-52	0.42	21.0	1.0 max	11.0	....	2.0	....	....	....	....	2.0	bal	....	8.88
MAR-M 302	0.85	21.5	....	10.0	9.0	....	....	0.2	0.005	....	1.5 max	bal	....	9.21
MAR-M 322	1.0	21.5	....	9.0	4.5	....	....	0.75	....	2.25	0.75	bal	....	8.91
MAR-M 509	0.60	24.0	10.0	7.0	7.5	....	....	0.2	....	....	1.0	bal	....	8.85
AiResist 13	0.45	21.0	....	11.0	....	2.0	....	....	....	....	2.5 max	bal	3.4 Al, 0.1 Y	8.43
AiResist 215	0.35	19.0	0.5	4.5	7.5	....	....	....	....	0.13	....	bal	4.3 Al, 0.1 Y	8.47
F 75	0.25	28.0	1.0 max	....	....	....	5.5	....	....	....	....	bal	....	....
FSX-414	0.25	29.5	10.5	7.0	....	....	....	....	0.012	....	2.0 max	bal	....	8.3
X-45	0.25	25.5	10.5	7.0	....	....	....	....	0.010	....	2.0 max	bal	....	....

Physical properties of cast nickel-base and cobalt-base alloys

Alloy	Density g/cm³	Melting Range °C	Melting Range °F	Specific heat At 21 °C (70 °F) J/kgK	Specific heat At 21 °C (70 °F) Btu/lb °F	Specific heat At 538 °C (1000 °F) J/kgK	Specific heat At 538 °C (1000 °F) Btu/lb °F	Specific heat At 1093 °C (2000°F) J/kgK	Specific heat At 1093 °C (2000°F) Btu/lb °F	Thermal conductivity At 93 °C (200 °F) W/mk	Thermal conductivity At 93 °C (200 °F) Btu in./h ft² °F	Thermal conductivity At 538 °C (1000 °F) W/mk	Thermal conductivity At 538 °C (1000 °F) Btu in./h ft² °F	Thermal conductivity At 1093 °C (2000 °F) W/mk	Thermal conductivity At 1093 °C (2000 °F) Btu in./h ft² °F	Mean coefficient of thermal expansion. 10^{-6} K(a) At 93 °C (200 °F)	Mean coefficient of thermal expansion. 10^{-6} K(a) At 538 °C (1000 °F)	Mean coefficient of thermal expansion. 10^{-6} K(a) At 1093 °C (2000°F)
Nickel base																		
IN-713C	7.91	1260-1290	2300-2350	420	0.10	565	0.135	710	0.17	10.9	76	17.0	118	26.4	183	10.6	13.5	17.1
IN-713LC	8.00	1290-1320	2350-2410	420	0.15	565	0.135	710	0.17	10.7	74	16.7	116	25.3	176	10.1	15.8	18.9
B-1900	8.22	1275-1300	2325-2375	....	....	....	....	....	....	(10.2)	(71)	16.3	113	....	....	11.7	13.3	16.2
Cast alloy 625 ..	8.44	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
Cast alloy 718 ..	8.22	1205-1345	2200-2450	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
IN-100	7.75	1265-1335	2305-2435	....	....	480	0.115	605	0.145	....	....	17.3	120	....	....	13.0	13.9	18.1
IN-162	8.08	1275-1305	2330-2380	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	12.2	14.1	....
IN-731	7.75	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
IN-738	8.11	1230-1315	2250-2400	420	0.10	565	0.135	710	0.17	....	....	17.7	123	27.2	189	11.6	14.0	....
IN-792	8.25	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
M-22	8.63	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	12.4	13.3	....
MAR-M 200	8.53	1315-1370	2400-2500	400	0.095	420	0.10	565	0.135	13.0	90	15.2	110	29.7	206	....	13.1	17.0
MAR-M 246	8.44	1315-1345	2400-2450	....	....	....	....	....	....	....	....	18.9	131	30.0	208	11.3	14.8	18.6
MAR-M 247	8.53	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
MAR-M 421	8.08	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	19.1	137	32.0	229	....	....	19.8
MAR-M 432	8.16	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	14.9	19.3
MC-102	8.84	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	12.8	14.9	....
Nimocast 75	8.44	1410(b)	2570(b)	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	12.8	14.9	....
Nimocast 80	8.44	1310-1380	2390-2515	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	12.8	14.9	....
Nimocast 90	8.17	1310-1380	2390-2515	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	12.3	14.9	....
Nimocast 242 ..	8.18	1225-1340	2335-2445	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	12.5	14.8	....
Nimocast 263 ..	8.40	1300-1335	2370-2470	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	11.0	14.4	....
Rene' 77	8.36	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	13.6	....
Rene' 80	7.91	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
Udimet 500	8.16	1300-1395	2375-2540	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	13.3	....	....
Udimet 710	8.02	....	....	....	....	....	....	....	....	84	18.1	126	....	....	....	....	....	....
	8.08																....	
Cobalt base																		
FSX-414	8.30	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
Haynes 1002	8.75	1305-1420	2380-2590	420	0.10	530	0.126	645	0.154	11.0	76	21.8	151	32.1	222	12.2	14.4	....
MAR-M 302	9.21	1315-1370	2400-2500	....	....	....	....	....	....	18.7	130	22.2	154	....	....	....	13.7	16.6
MAR-M 322	8.91	1315-1360	2400-2475	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
MAR-M 509	8.85	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	27.9	194	44.6	310	9.8	15.9	18.2
WI-52	8.88	1300-1355	2425-2475	420	0.10	....	....	....	....	24.8	172	27.4	190	40.3	280	....	14.4	17.5
X-40	8.60	....	....	....	....	....	....	....	....	11.8	82	21.6	150	....	....	....	15.1	....

(a) From room temperature to indicated temperature. (b) Liquids temperature. Source: Nickel Development Institute.

Table 2 Mechanical properties of cast nickel-base and cobalt-base superalloys

Alloy	Ultimate tensile strength: At 21 °C (70 °F) Mpa	ksi	At 538 °C (1000 °F) Mpa	ksi	At 1093 °C (2000°F) Mpa	ksi	0.2% yield strength: At 21 °C (70 °F) Mpa	ksi	At 538 °C (1000 °F) Mpa	ksi	At 1093 °C (2000°F) Mpa	ksi	Tensile elongation %: At 21 °C (70 °F)	At 538 °C (1000 °F)	At 1093 °C (2000°F)	Dynamic modulus of elasticity: At 21 °C (70 °F) Gpa	10^6psi	At 538 °C (1000 °F) Gpa	10^6psi	At 1093 °C (2000°F) Gpa	10^6psi
Nickel base																					
IN-713C	850	123	860	125	....	....	740	107	705	102	....	....	8	10	....	206	29.9	179	26.2	....	....
IN-713LC	895	130	895	130	....	....	750	109	760	110	....	....	15	11	....	197	28.6	172	25.0	....	....
B-1900	970	141	1005	146	270	38	825	120	870	126	195	28	8	7	11	214	31.0	183	27.0	....	....
IN-625	710	103	510	74	....	....	350	51	235	34	....	....	48	50	....	....	....	....	....	....	....
IN-718	1090	158	....	....	....	....	915	133	....	....	....	....	11	....	....	....	....	....	....	....	....
IN-100	1018	147	1090	150	(380)	(55)	850	123	885	128	(240)	(25)	9	9	....	215	31.2	187	27.1	....	....
IN-162	1005	146	1020	148	....	....	815	118	795	115	....	....	7	6.5	....	197	28.5	172	24.9	....	....
IN-731	835	121	....	....	275	40	725	105	....	....	170	25	6.5	....	....	....	....	....	....	....	....
IN-738	1095	159	....	....	....	....	950	138	....	....	....	....	....	....	....	201	29.2	175	25.4	....	....
IN-792	1170	170	....	....	....	....	1060	154	....	....	....	....	4	....	....	....	....	....	....	....	....
M-22	730	106	780	113	....	....	685	99	730	106	....	....	5.5	4.5	....	....	....	....	....	....	....
MAR-M 200	930	135	945	137	325	47	840	122	880	123	....	....	7	5	....	218	31.6	184	26.7	....	....
MAR-M 246	965	140	1000	145	345	50	860	125	860	125	....	....	5	5	....	205	29.8	178	25.8	145	21.1
MAR-M 247	965	140	1035	150	....	....	815	118	825	120	....	....	7	....	....	....	....	....	....	....	....
MAR-M 421	1085	157	995	147	....	....	930	135	815	118	....	....	4.5	3	....	203	29.4	....	....	141	20.4
MAR-M 432	1240	180	1105	160	....	....	1070	155	910	132	....	....	6	....	....	....	....	....	....	....	....
MC-102	675	98	655	95	....	....	605	88	540	78	....	....	5	9	....	....	....	....	....	....	....
Nimocast 75	500	72	....	....	....	....	179	26	....	....	....	....	39	....	....	....	....	....	....	....	....
Nimocast 80	730	106	....	....	....	....	520	75	....	....	....	....	15	....	....	....	....	....	....	....	....
Nimocast 90	700	102	595	86	....	....	520	75	420	61	....	....	14	15	....	....	....	....	....	....	....
Nimocast 242	460	67	....	....	....	....	300	44	....	....	....	....	8	....	....	....	....	....	....	....	....
Nimocast 263	730	106	....	....	....	....	510	74	....	....	....	....	18	....	....	....	....	....	....	....	....
Rene' 77	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
Rene' 80	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
Udimet 500	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	208	30.2	....	....	....	....
Udimet 710	930	135	895	130	....	....	815	118	725	105	....	....	13	13	....	....	....	....	....	....	....
CMSX-2(a)	1075	156	....	....	240	35	895	130	....	....	170	25	8	....	....	....	....	....	....	....	....
GMR-235(b)	1180	172	1295(c)	188 (c)	....	....	1135	165	1245 (c)	181 (c)	....	....	10	17 (c)	....	....	....	....	....	....	....
IN-939(b)	710	103	....	....	....	....	640	93	....	....	....	....	3	....	18(d)	....	....	....	....	....	....
MM 002(b)(e)	1050	152	915 (c)	133 (c)	325 (d)	47 (d)	800	116	635 (c)	92 (c)	205 (d)	30 (d)	5	7 (c)	25(d)	....	....	....	....	....	....
IN-713 Hf (b)(f)	1035	150	1035 (c)	150 (c)	550 (d)	80 (d)	825	120	860 (c)	125 (c)	345 (d)	50 (d)	7	5 (c)	12(d)	....	....	....	....	....	....
Rene' 125 Hf (b)(g)	1000	145	895 (c)	130 (c)	380 (d)	55 (d)	760	110	620 (c)	90 (c)	240 (d)	35 (d)	11	6 (c)	20(d)	....	....	....	....	....	....
MAR-M 246 Hf (b)(h)	1070	155	1070 (c)	155 (c)	550 (d)	80 (d)	825	120	860 (c)	125 (c)	345 (d)	50 (d)	5	5 (c)	12(d)	....	....	....	....	....	....
MAR-M 200 Hf (b)(i)	1105	160	1070 (c)	155 (c)	565 (d)	82 (d)	860	125	860 (c)	125 (c)	345 (d)	50 (d)	6	7 (c)	14(d)	....	....	....	....	....	....
PWA-1480(a)(b)	1035	150	1035 (c)	150 (c)	540 (d)	78 (d)	825	120	860 (c)	125 (c)	345 (d)	50 (d)	5	5 (c)	10(d)	....	....	....	....	....	....
SEL(b)	....	....	1130 (c)	164 (c)	685 (d)	99 (d)	895	130	905 (c)	131 (c)	495 (d)	72 (d)	4	8 (c)	20(d)	....	....	....	....	....	....
UDM 56(b)	1020	148	875 (c)	127 (c)	....	....	905	131	795 (c)	115 (c)	....	....	6	7 (c)	....	....	....	....	....	....	....
SEL-15(b)	945	137	945 (c)	137 (c)	....	....	850	123	725 (c)	105 (c)	....	....	3	5 (c)	....	....	....	....	....	....	....
	1060	154	1090 (c)	158 (c)	....	....	895	130	815 (c)	118 (c)	....	....	9	5 (c)	....	....	....	....	....	....	....
Cobalt base																					
AiResist 13(j)	600	87	420 (c)	61 (c)	....	....	530	77	330 (c)	48 (c)	....	....	1.5	4.5 (c)	....	....	....	....	....	....	....
AiResist 215(j)	690	100	570 (k)	83 (k)	....	....	485	70	315 (k)	46 (k)	....	....	4	12 (k)	....	....	....	....	....	....	....
FSX-414	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
Haynes 1002	770	112	560	81	115	17	470	68	345	50	95	14	6	8	28	210	30.4	173	25.1	....	....
MAR-M 302	930	135	795	115	150	22	690	100	505	73	150	22	2	....	21	....	....	....	....	....	....
MAR-M 322(j)	830	120	595 (c)	86 (c)	....	....	630	91	345 (c)	50 (c)	....	....	4	6.5 (c)	....	....	....	....	....	....	....
MAR-M 509	785	114	570	83	....	....	570	83	400	58	....	....	4	6	....	225	32.7	....	....	....	....
WI-52	750	109	745	108	160	23	585	85	440	64	105	15	5	7	35	....	....	....	....	....	....
X-40	745	108	550	80	....	....	525	76	275	40	....	....	9	17	....	....	....	....	....	....	....

(a) Single crystal [001]. (b) Data from Ref 3. (c) At 760 °C (1400 °F). (d) At 980 °C (1800 °F). (e) RR-7080. (f) MM 004. (g) M 005. (h) MM 006. (j) Data from volume 3, 9th Edition. *Metals Handbook*, 1980. (k) At 650°C (1200 °F). Source: Nickel Development Institute. Except as noted