

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



به نام خالق هستی بخش

# شکل دهی سوپر آلیاژهای پایه Ni

شکل دادن فلزات

سمیه خیری

بهار ۹۱

## خلاصه

در این پروژه به بررسی فرایندهای شکل دادن سوپرآلیاژها پرداخته شده است، به طوری که عملیات شکل دهی سوپرآلیاژها توسط عملیات متداول کلیه ی آلیاژهای فلزی انجام می پذیرد. سوپرآلیاژهای پایه نیکل را می توان به صورت مفتول ، ورق، نوار و سیم با استفاده از فرایندهای نورد، اکستروژن و آهنگری تولید نمود. ساخت دیسک های توربین گازی از سوپرآلیاژهای پایه نیکل با استفاده از عملیات فورج انجام می گیرد. سوپرآلیاژها به دلیل استحکام بیشتری که در دماهای بالا دارند سخت تر از سایر فلزات برای فورج هستند. با چند مرحله ای کردن فرایند تغییرشکل در عملیات آهنگری سوپرآلیاژها کاهش زیادی در اندازه دانه انجام می گیرد. فرایند فورجینگ نیز مشکلاتی دارد که به آن اشاره خواهد شد.

**کلید واژه :** سوپرآلیاژها، شکل دهی ، فورج، آهنگری، اکستروژن، توربین، سوپرآلیاژپایه نیکل

# فهرست

## عنوان

## صفحه

۱ - مقدمه	
۱-۱ روش های تولید سوپر آلیاژها	۱
۲ - شکل دادن و فورج پذیری	۳
۱-۲ فورج و فرایندهای وابسته	۳
۲-۲ سوپر آلیاژهای پایه نیکل و آهن-نیکل در مقابل پایه ی کبالت	۳
۳-۲ عملیات فرایند فورج پذیری	۵
۴-۲ اصول فورج	۵
۱-۴-۲ هدف از فورج	۵
۲-۴-۲ کنترل فرایند تغییر شکل	۶
۵-۲ قابلیت فورج پذیری	۷
۶-۲ فورج سوپر آلیاژها	۸
۱-۶-۲ فورج دیسک کوچک توربین گاز هواپیما (AGT)	۱۰
۲-۶-۲ تغییر شکل و حذف فلز در فورج پذیری دیسک (AGT)	۱۲
۷-۲ مشکلات قطعه فورج شده	۱۶
۳ - ارائه و بررسی نتایج	۱۹
۴ - مراجع	۲۰

## ۱-۱ روش های تولید سوپر آلیاژها

با توجه به نحوه تولید می توان سوپر آلیاژها را به چهار گروه کلی تقسیم بندی نمود که عبارتند از :

۱. سوپر آلیاژ های کار پذیر : سوپر آلیاژهای کارپذیر قابلیت کار مکانیکی دارند و از روش های مکانیکی می توان به آنها شکل داد.

۲. سوپر آلیاژهای متالورژی پودر: بسیاری از انواع آلیاژهای کارپذیر از طریق فرایندهای متالورژی پودر تولید می گردند. امروزه قطعات متالورژی پودر از جنس سوپر آلیاژ با دانسیته کامل از طریق روش های اکستروژن یا پرسکاری ایزواستاتیک گرم (HIP) تولید می گردند. مهمترین این قطعات قیچی ها و سوزنهای جراحی می باشند.

۳. سوپر آلیاژهای پلی کریستال ریختگی : تعداد زیادی از فرایندها را می توان در تولید قطعات سوپر آلیاژ با اندازه نزدیک به قطعه نهایی مورد استفاده قرار داد اما اساساً این قطعات توسط فرایند ریخته گری دقیق تولید می گردند.

۴. سوپر آلیاژهای تک کریستال انجماد جهت دار: به منظور توسعه توربین های گازی مصرفی در هواپیماها و افزایش دماهای کاری و کارآیی موتورها، به طور مداوم روش های تولید سوپر آلیاژها در حال بهبود است. عملیات شکل دهی سوپر آلیاژها نیز می تواند توسط عملیات متداول کلیه ی آلیاژهای فلزی انجام پذیرد.

سوپر آلیاژهای پایه آهن، کبالت و نیکل را می توان به صورت مفتول، صفحه ورق، نوار، سیم و اشکال دیگر توسط فرایندهای نورد، اکستروژن و آهنگری تولید نمود. معمولاً عملیات شکل دهی در دمای بالا صورت می گیرد و تعداد کمی از سوپر آلیاژها را می توان به صورت سرد شکل دهی نمود. ساختارهای یکنواخت و ریزدانه ای که از شکل دهی سرد حاصل می شود نسبت به ساختارهای شکل دادن گرم

ارجحیت دارند. عملیات ترمودینامیکی بر روی سوپرآلیاژها معمولاً در حدود ۹۵۰ - ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد انجام می شود که به این ترتیب در حین شکل دادن عملیات حرارتی نیز صورت می گیرد.

Wrought alloys												Typical applications
Alloy	% Ni	% Cr	% Co	% Mo	% Al	% Ti	% Cb	% C	% B	% Zr	% Other	
Inconel X-750	73	15	...	...	0.8	2.5	0.9	0.04	...		6.8 Fe	Gas turbine parts; bolts.
Udimet 500	53.6	18	18.5	4.0	2.9	2.9		0.08	0.006	0.05		Gas turbine parts; sheets; bolts.
Udimet 700	53.4	15	18.5	5.2	4.3	3.5		0.08	0.03	...		Jet engine parts.
Waspaloy	58.3	19.5	13.5	4.3	1.3	3.0		0.08	0.006	0.06		Jet engine blades.
Astroloy	55.1	15.0	17.0	5.2	4.0	3.5		0.06	0.03			Forgings for high temperatures.
René 41	55.3	19.0	11.0	10.0	1.5	3.1		0.09	0.005			Jet engine blades and parts.
Nimonic 80A	74.7	19.5	1.1	...	1.3	2.5		0.06	...			Jet engine parts.
Nimonic 90	57.4	19.5	18.0	...	1.4	2.4		0.07	...			Jet engine parts.
Nimonic 105	53.3	14.5	20.0	5.0	1.2	4.5		0.20	...			Jet engine parts.
Nimonic 115	57.3	15.0	15.0	3.5	5.0	4.0		0.15	...			Jet engine parts.
Cast alloys												Typical applications
Alloy	% Ni	% Cr	% Co	% Mo	% Al	% Ti	% Cb	% C	% B	% Zr	% Other	
B-1900	64	8.0	10.0	6.0	6.0	1.0	...	0.10	0.015	0.1	4.0 Ta	Jet engine blades.
MAR-M200	60	9.0	10.0	...	5.0	2.0	1.0	0.13	0.015	0.05	12 W	Jet engine blades.
Inconel 738	61	16.0	8.5	1.7	3.4	3.4	0.9	0.12	0.01	0.10	1.7 Ta, 2.6 W	
René 77	58	14.6	15.0	4.2	4.3	3.3	...	0.07	0.016	0.04	...	Jet engine parts.
René 80	60	14.0	9.5	4.0	3.0	5.0	...	0.17	0.015	0.03	4.0 W	Turbine blade alloy.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی و کاربرد عمومی سوپرآلیاژ پایه نیکل در دو نوع ریخته گری و کار شده



شکل ۲. کاربرد سوپر آلیاژها در موتورهای جت



شکل ۱. موتور جت از نوع سوپرآلیاژ پایه نیکل

## ۲ - شکل دادن و فورج پذیری

### ۲-۱ فورج و فرایندهای وابسته

با توسعه موتور توربین گازی، نیاز به آلیاژهای با دمای بالا همچنین با قابلیت ساخت اشکال منحصر به فرد به وجود آمد. در روزهای اولیه، سوپر آلیاژها، آلیاژ ویتالیوم ( Vitallium ) پایه کبالت ریختگی از مواد انتخابی برای ایرفویل های موتور توربین گازی شد. بنابراین برخی از آلیاژهای پایه کبالت و نیکل، به عنوان ورق برای کار در درجه حرارت بالا به وجود آمد. توربین های گازی عامل اصلی پیشرفت سوپر آلیاژها هستند. اولین بار پره های توربین از فورج آلیاژهای پایه آهن ساخته شدند.

### ۲-۲ سوپر آلیاژهای پایه ی نیکل و آهن - نیکل در مقابل پایه ی کبالت

سوپر آلیاژهای پایه کبالت ریختگی مثل ویتالیوم جالب و به شدت مفید هستند در اجزایی که استحکام بالا در توربین های گازی مورد نیاز است. با این حال، آلیاژهای ریخته گری برای طیف گسترده ای از برنامه های کاربردی مناسب در نظر گرفته نمی شود. تصور بر این بود که آلیاژهای ریخته گری نسبت به آلیاژهای کار شده ذاتا کمتر انعطاف پذیرند و مهندسين طراح نگران داکتیلیته کافی و مورد نیاز برای طراحی موجود شدند.

در نتیجه، سوپر آلیاژهای کار شده برای کاربرد های دما بالا در حال توسعه با توربین های گازی بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. این تصمیم اساسی بود برای برخی از داده های واقعی که نشان دهنده داکتیلیته پایین برای آلیاژهای ریخته گری است و مفاهیم طراحی مهندسی اساسی برای آلیاژهای کار شده با داکتیلیته خوب شد. سوپر آلیاژهای کار شده اولیه به آلیاژهای آهن - نیکل یا پایه نیکل مرسوم بود.

بنابراین ممکن است از این آلیاژها به عنوان آلیاژهای انتخابی استفاده شود نه آلیاژ های پایه کبالت. هر چند، برای چند سال آلیاژ های پایه کبالت برای ایرفویل های توربین گازی باقی ماندند به طوری که به داکتیلیته بالا نیازی نیست. توسعه آلیاژی این جنبه را تا حدودی تغییر داد و آلیاژهای پایه کبالت کار شده

عمدتاً به شکل ورق در آمد. برای شکل دادن قطعات بزرگ مثل دیسک های توربین گازی از آلیاژهای پایه نیکل و آهن - نیکل استفاده شد. همان طور که در بازار آلیاژهای با درجه حرارت بالا توسعه یافت، استحکام دیسک های کار شده نیز افزایش یافت، و به طور معمول با فورج سوپر آلیاژهای پایه نیکل و آهن - نیکل ساخته شد. انواع این آلیاژها بیشتر با فورج و نورد به شکل هایی مثل ایرفویل های توربین تولید می شوند. تولیدات ورق از Inconel ۷۵، Nimonic ۷۵، Inconel X (Inconel X-۷۵۰)، Hastelloy X، ایجاد و شناخته شد. در نهایت، سوپر آلیاژ (nickel-base) C-۲۶۳ در زمینه ورق آلیاژی ایجاد شد. آلیاژهای کار شده مانند A-۲۸۶، IN-۹۰۱، انواع ترکیبات Nimonic، Waspaloy و Astroloy به عنوان فورج دیسک های توربین گازی و در برخی موارد، به عنوان تیغه های فورج شده در توربین های گازی به کار برده شدند. شناخت کلی فرایندهای فورج و توانایی آن برای کنترل نه فقط شکل، بلکه ساختار و خواص برای استفاده از سوپر آلیاژها که در دماهای بالا کاربرد دارد بسیار مهم است.

Alloy	UNS No.	Thickness		Anisotropy		Olsen cup depth		Ericksen cup depth	
		mm	in.	r	$\Delta r$	mm	in.	mm	in.
Alloy 80A	N07080	0.9	0.035	0.91	-0.02	...	...	12.5	0.492
Alloy 263	N07263	0.9	0.035	0.86	0.01	...	...	12.8	0.504
Alloy P16	...	0.9	0.035	0.98	-0.40	...	...	10.5	0.413
Alloy 188	R30188	1.2	0.047	0.94	0.13	...	...	12.6	0.496
Alloy 188	R30188	0.63	0.025	0.95	-0.024	12.5	0.492	...	...
Alloy 230	...	0.76	0.030	0.93	-0.059	11.0	0.433	...	...
Alloy 625	N06625	0.61	0.024	0.97	-0.139	11.7	0.461	...	...
Alloy X	N06002	0.61	0.024	0.95	-0.105	10.2	0.402	...	...

جدول ۲. کاراکترهای شکل دادن برخی از سوپر آلیاژها



## ۲-۳ عملیات فرآیند فورج پذیری

فرایند آهنگری معمولاً شامل حرارت اولیه و تغییر شکل فلز جامد به شکل و انتقال خواص مطلوب می شود. در فرایند تغییر شکل سوپرآلیاژها، چرخه های مختلف مکانیکی - حرارتی از حرارت دادن و شکل دادن با ورودی ( کار ) و حذف ( توسط تبلور مجدد ) فشار رخ می دهد. از آنجا که سوپرآلیاژها پیشینه ای حساس دارند این چرخه های فرآیند مکانیکی - حرارتی اثر مهمی روی خواص نهایی آلیاژ دارد. تغییر شکل سرد اشکال بزرگ به طور معمول با سوپرآلیاژها امکان پذیر است. اگر چه ورق برای بیان خواص مطلوب ممکن است نورد سرد شود.

فورج یک فرایند تغییر شکل است، اما فرایندهای دیگری هم وجود دارد، تمام فرایندهای فورج یکسان هستند. اما کنترل ریزساختار، شکل و خواص به وسیله ی نورد و اکستروژن اهمیت اساسی دارد. تکنولوژی ذوب و فرایند تبدیل اولیه نقش روز افزونی در کنترل ریز ساختار و خواص سوپرآلیاژهای کار شده دارد. توسعه ریزساختار و نگهداری از آن ساختار، با عمل مدرن، به شدت وابسته به ساختار بیل (شمش) در شروع فرایند فورج است.

شکل دادن در ارتباط با فورجینگ است، معمولاً مثل بخش های فورج شده نیازی به تمام شدن اجزا برای فراهم شدن داکتیلیته، استحکام یا چقرمگی نیست. اطلاعات کمی در مورد شکل دادن به عنوان فرایند تولید سوپرآلیاژها موجود است. به ندرت از فرایند شکل دهی برای کنترل و یا توسعه ساختار سوپرآلیاژها استفاده می شود.

## ۲-۴ اصول فورج

### ۲-۴-۱ هدف از فورج

صرف نظر از روش استفاده شده، فورج سوپرآلیاژها به طور کلی باید به عنوان بخشی از فرایند کلی ترمومکانیکی انجام شود. به عبارت دیگر، شکل گیری نباید تنها عامل در فورج باشد. این بحث فرض بر

این است که فورج هم شکل و هم خواص را مد نظر می گیرد. در برخی موارد، فورج فرایندی برای خواص کششی بهتر، رفتار تنش، مقاومت به خزش و یا چرخه ی پایین عمر خستگی است.

بنابراین، اهداف چرخه فورجینگ ممکن است به صورت زیر باشد:

- پالایش یکنواخت دانه
- کنترل مورفولوژی فاز ثانویه
- کنترل روند رشد دانه
- ترکیب ساختاری بی عیب

فرایند فورج امروزه به عنوان تابع مستقل برای شروع عمر سوپرآلیاژها عمل نمی کند.

## ۲-۴-۲ کنترل فرآیند تغییر شکل

تبلور مجدد باید در هر عمل به اندازه دانه مورد نظر در سوپرآلیاژ فورج شده برسد. تبلور مجدد به از بین بردن کاربیدهای مرزدانه ها و دوقلویی نیز کمک می کند به طوری که در حرارت یا خنک کردن استاتیکی گسترش می یابد.

توزیع غیر یکنواخت از نا همگونی به احتمال زیاد منجر به بروز مشکلات شود. تا ۸۰٪ کاهش فلزی همراه با تبلور مجدد معمولاً بیش از افت دمای است. ۲۰٪ باقی مانده می تواند به عنوان کار گرم در درجه حرارت پایین برای استحکام بخشی اضافی باشد. با این حال، طیف وسیعی از برنامه های کاربردی متنوع برای فورج سوپرآلیاژها هست به طوری که در برخی شرایط، هدف از فرآیند فورج ممکن تولید دوبلکس باشد. سوپرآلیاژها می توانند با روش های متنوعی فورج شوند، و دو یا بیشتر، از این متدها اغلب به دنبال هم استفاده می شوند.

## ۵-۲ قابلیت فورج پذیری

دمای فورج برای آلیاژها و مقایسه نسبی آلیاژهای فورج پذیری و شکل پذیری مورد نیاز برای محصول و ساخت طراحی شده است. به طور عامیانه، فورج پذیری به معنای توانایی به کج و معوج شدن مواد به شکلی بدون ایجاد پارگی سطحی و یا نقص های داخلی است.

Alloy	Forging temperature(a)				Forgeability rating(b)
	Upset and breakdown		Finish forging		
	°C	°F	°C	°F	
<b>Iron-base alloys</b>					
A-286	1095	2000	1035	1900	1
V-57	1095	2000	1035	1900	1
16-25-6	1095	2000	1095	2000	1
<b>Nickel-base alloys</b>					
Alloy R-235	1205	2200	1205	2200	3
Astroloy	1120	2050	1120	2050	5
Hastelloy W	1205	2200	1035	1900	4
Hastelloy X	1175	2150	1175	2150	3
Inconel 600	1150	2100	1035	1900	1
Inconel 700	1120	2050	1105	2025	4
Inconel 718	1095	2000	1035	1900	2
Inconel X-750	1175	2150	1120	2050	2
Inconel 751	1150	2100	1150	2100	3
Incoloy 901	1150	2100	1095	2000	2
M-252	1150	2100	1095	2000	3
Rene 41	1150	2100	1120	2050	3
U-500	1175	2150	1175	2150	4
U-700	1120	2050	1120	2050	5
Waspaloy	1160	2125	1035	1900	3
<b>Cobalt-base alloys</b>					
J-1570	1175	2150	1175	2150	2
J-1650	1150	2100	1150	2100	2
HS-25 (L-605)	1230	2250	1230	2250	3
S-816	1150	2100	1150	2100	4
Haynes 188	1205	2200	1205	2200	3

(a) Lower temperatures are often used for specific forgings when structural uniformity is a requirement. (b) Based on the considerations discussed in text. As the rating increases, forgeability decreases.

جدول ۳. دماهای فورج و سرعت قابلیت فورج پذیری نسبی برای برخی از سوپر آلیاژهای کار شده

دماهای فورج داده شده در جدول ۳ درجه حرارت های سطح بیلته است که از کوره خارج شده است. فورج باید هر چه سریعتر انجام شود و بیشتر از  $75^{\circ}\text{F}$  ( $42^{\circ}\text{C}$ ) دما از دست ندهد. فورج را می توان تا

زمانی که دمای سرد شدن به  $(110^{\circ} \text{C})$   $(200^{\circ} \text{F})$  برسد و یا برای برخی آلیاژها به پایین تر از دمای داده شده در جدول بدون صدمه زدن به قطعه کار ادامه داد. با این حال، چون بیشتر فشار مورد نیاز است، فورج به ندرت در دمای پایین تر از دمای داده شده در جدول انجام می شود. سه عامل مهم در هر روش از فورج سوپر آلیاژها، کاهش بعد (کرنش)، سرعت کاهش ابعاد (نرخ کرنش) و درجه حرارت قطعه کار در هر لحظه در طی فورج کردن است.

## ۲-۶ فورج کردن سوپر آلیاژها

### فورج سوپر آلیاژها

اولین سوپر آلیاژها برای فورج زیاد مشکل نبودند، اما به سرعت مشخص شد که به طور کلی سوپر آلیاژها چون استحکام بیشتری در دماهای بالا دارند سخت تر از سایر فلزات برای فورج هستند. برخی از ترکیبات سوپر آلیاژی سرانجام در دمای فورج خیلی قوی شدند به طوری که با تکنیک های فورج معمولی نمی توانند فورج شوند. در این موارد، آلیاژها با هم در شرایط ریختگی یا در شکل های کار شده ایجاد شده با فرایند متالورژی پودر مورد استفاده قرار گرفت.

### واحد فورج مواد و روش ها

فورج قطعات سوپر آلیاژی به وسیله ی زیر تولید می شود:

- قالب فورج
- آشفته کردن (Upsetting)
- اکستروژن و فورج
- لوله فورج
- تاب دادن (Swaging)، یا ورژن استفاده از ماشین آلات دوار مخصوص فورج
- نورد حلقه

Alloy	Type of forging	Min web thickness, in. (mm)	Min rib width, in. (mm)	Thickness tolerance, in. (mm)	Min corner radii, in. (mm)	Min fillet radii, in. (mm)
A-286, Inco 901, Hastelloy X, Waspaloy, Udimet 630, TD-Nickel(a)	Blocker	0.75–1.25 (19.1–31.8)	0.75–1.00 (19.1–25.4)	0.18–0.25 (4.6–6.4)	0.62 (15.8)	0.75–1.25 (19.1–31.8)
	Finish	0.50–1.00 (12.7–25.4)	0.62–0.78 (15.8–19.8)	0.12–0.18 (3.0–4.6)	0.50 (12.7)	0.62–1.00 (15.8–25.4)
Inco 718, Rene 41, X-1900(a)	Blocker	1.00–1.50 (25.4–38.1)	1.00–1.25 (25.4–31.8)	0.20–0.25 (5.1–6.4)	0.75 (19.1)	1.00–2.00 (25.4–50.8)
	Finish	0.75–1.25 (19.1–31.8)	0.78–1.00 (19.8–25.4)	0.15–0.20 (3.8–5.1)	0.62 (15.8)	0.75–1.50 (19.1–38.1)
Astroloy, B-1900(a)	Blocker	1.50–2.50 (38.1–63.5)	1.25–1.50 (31.8–38.1)	0.25–0.30 (6.4–7.6)	1.00 (25.4)	1.25–2.50 (31.8–63.5)
	Finish	1.00–1.50 (25.4–38.1)	1.00–1.25 (25.4–31.8)	0.18–0.25 (4.6–6.4)	0.75 (19.1)	1.00–2.00 (25.4–50.8)

Note: For forgings over 400 in.<sup>2</sup> (258,064 mm<sup>2</sup>) in plan area. For forgings of 100 to 400 in.<sup>2</sup> (64,516 to 258,064 mm<sup>2</sup>) plan area, design allowables can be reduced 25%. For forgings under 100 in.<sup>2</sup> (64,516 mm<sup>2</sup>), design allowables can be reduced 50%. Recommended draft angles are 5 to 7 degrees. Machining allowance for finish forgings is 0.15 to 0.25 in. (3.81 to 6.35 mm). Some shapes can require higher minimum allowables than shown above. (a) Based on limited data

### جدول ۳. راهنمای طراحی فورج برای برخی از سوپرآلیاژهای مرسوم

فورج ممکن است با یک گروه از قالب های باز یا بسته همان طور که اشاره شد، انجام شود. قالب بسته بهتر شکل نهایی از فورج را تعریف می کند. بعضی از قالبها ممکن است فقط غلتک های صاف باشند که برای انتقال بار مورد نیاز برای تغییر یک بعدی استفاده می شود. هر چه قالب پیچیده تر شود گران تر می شود. همچنین، در بیشتر قالب های پیچیده گرما سخت تر خارج می شود. طرح قالب یک بخش قابل توجهی از فرایند فورج سوپرآلیاژهاست. تغییر در طراحی قالب، نقص در طراحی، و یا شکست قالب می تواند بسیار پر هزینه باشد.

فورج قالب باز (فورج دستی یا قالب تخت) اغلب برای تولید پریفرم ها برای قطعات نسبتاً بزرگ، مانند دیسک و شفت برای توربین های گازی مورد استفاده قرار گرفته است.

فورج قالب بسته به طور گسترده ای برای فورج سوپرآلیاژها استفاده می شود. به عنوان مثال، پریفرم ها که با فورج قالب باز، آشفته کردن، حلقه نورد، یا اکستروژن تولید شده اند، به میزان بیشتری برای فورج قالب بسته ی سوپرآلیاژها نسبت به فولاد مورد استفاده قرار گرفته است.

به دلیل مشکلات بزرگ تر فورج سوپرآلیاژها در مقایسه با فورج اندازه و اشکال مشابه از جنس فولاد ساخت قالب نیز متفاوت است.

## ۲-۶-۱ فورج دیسک کوچک توربین گاز هواپیما (AGT)

شکل (۳) ماده اولیه بیلت را که برای فورج سوپرآلیاژ پایه نیکل Waspaloy برای دیسک کوچک AGT طراحی شده است، نشان می دهد. شکل (۴) مجموعه ای از قطعات فورج شده کلوچه ای شکل را بعد از فورج قالب باز نشان می دهد. قطعه نشان داده شده تقریباً ۳/۵ اینچ (۹ سانتی متر) ضخامت و حدود ۲۶ اینچ (۶۶ سانتی متر) قطر دارد. بعد از فورج با قالب بسته قطعه به شکل (۵) در می آید، به طوری که در حال حاضر ابعاد آن ۳۳ اینچ (۸۴ سانتی متر) قطر و ۲/۷۵ اینچ (۷ سانتی متر) ضخامت در لبه و ۱/۷۴ اینچ (۴/۵ سانتی متر) ضخامت در مرکز دارد. با استفاده از دمای مناسب و چرخه ی کرنش قطعات فورجینگ، قطعه ها ی فورج شده به عنوان دیسک یا شفت برای کارکرد توربین گازی ساخته شد که در شکل (۶) نشان داده شده است.

اجزاء در شکل (۶)، نیروی ۱۰۰ پوند (۴۵/۵ کیلو گرم) و ۲۰ پوند (۹ کیلو گرم) را به ترتیب برای دیسک و شفت دیسک نشان داده است. با استفاده بیشتر از سوپرآلیاژها که اساس توربین های گازی است، وزن قطعات فورج خیلی بزرگ اکنون به بیش از ۱۰,۰۰۰ پوند (۴۵۵۰ کیلو گرم) برای تولید می رسد.



شکل ۳. بیلت های اولیه سوپرآلیاژ پایه نیکل waspaloy برای برش داخل قطعه های مختلف برای فورج

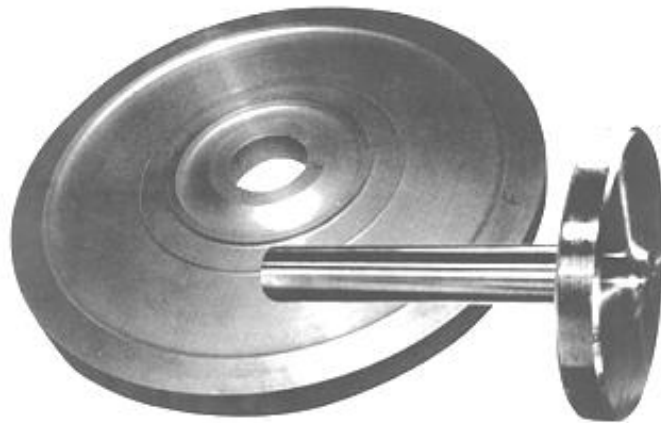


شکل ۴. قطعه فورج (پنکیک) قالب باز سوپرآلیاژ پایه نیکل waspaloy



شکل ۵. قطعه فورج شده قالب بسته سوپرآلیاژ پایه نیکل waspaloy تولید شده از پنکیک در شکل (۴)

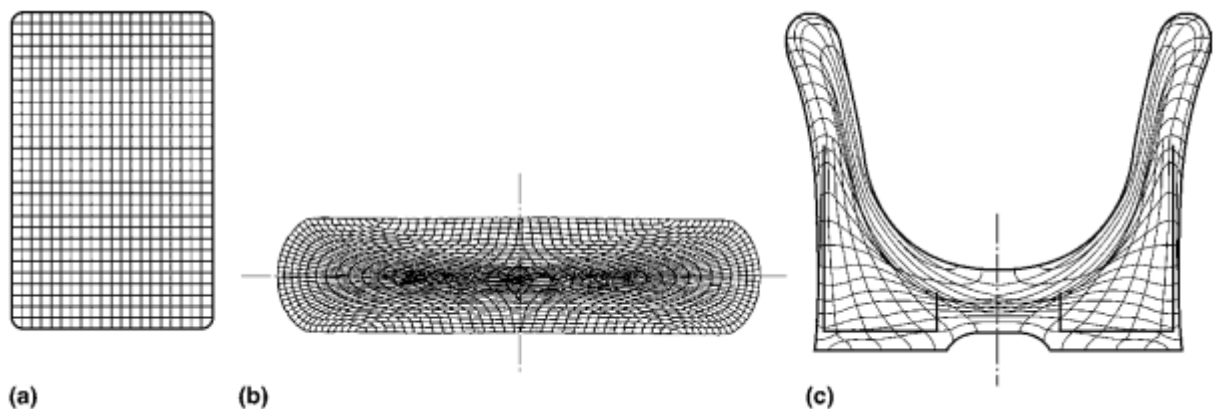




شکل ۶. اجزای فورج شده سوپرآلیاژ پایه نیکل astrology : دیسک و شفت دیسک کامل

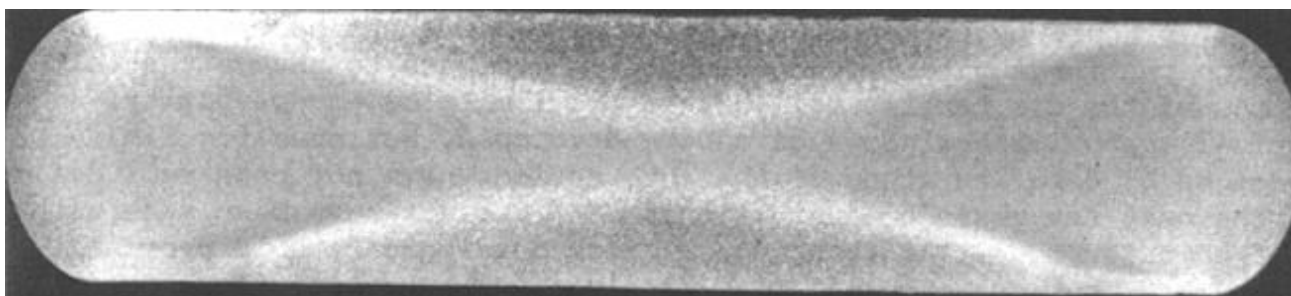
## ۲-۶-۲ تغییر شکل و حذف فلز در فورجینگ دیسک AGT

شکل (۷) شماتیک کشش در نواحی یک قطعه در طی فورج برای تولید یک دیسک توربینی گازی ساده و شکل (۸) به طور شماتیک مراحل تولید یک دیسک AGT ساده را نشان می دهد.



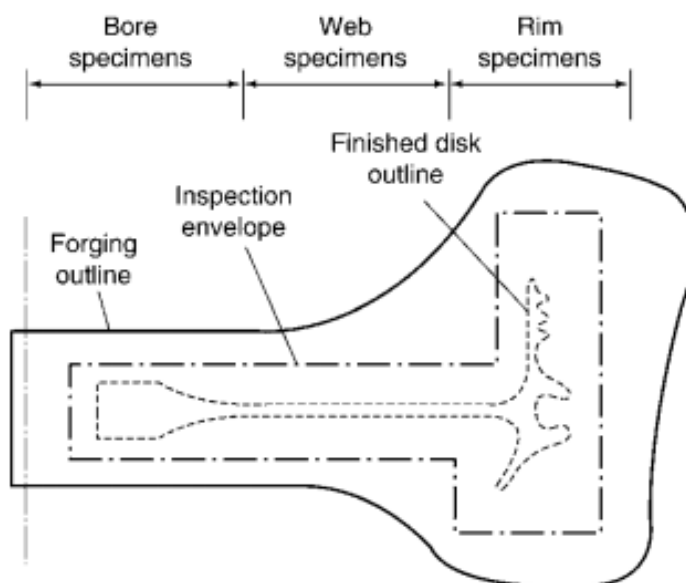
شکل ۷. (a). قطعه ی قبل از فورج (b). بعد از آشفته گی به پنکیک (c). شکل نهایی فورج شده





شکل ۸. ریزساختار بخش میانی یک قطعه فورج شده IN-۷۱۸ (پنکیک)، مناطق مشکی نواحی مرده و لایه های اچ شده در نواحی مجاور بالا و پایین سطوح پنکیک.

پنکیک دوباره گرم شدن و فورج شدن برای یک شکل نهایی است. در شکل (۸) بخش بسیار ساده ضربداری مانند است. تغییر شکل می تواند بیشتر از تغییرات مشاهده شده در شکل (۷) باشد. عمل سرد سازی از عملیات فورج ممکن است یک اثر گسترده ای روی ساختار در قطعه نهایی داشته باشد. در شکل (۱۰) روابط بین قطعه فورج شده و اجزاء نهایی به عنوان تولید کننده موتور ماشین مشاهده می شود.



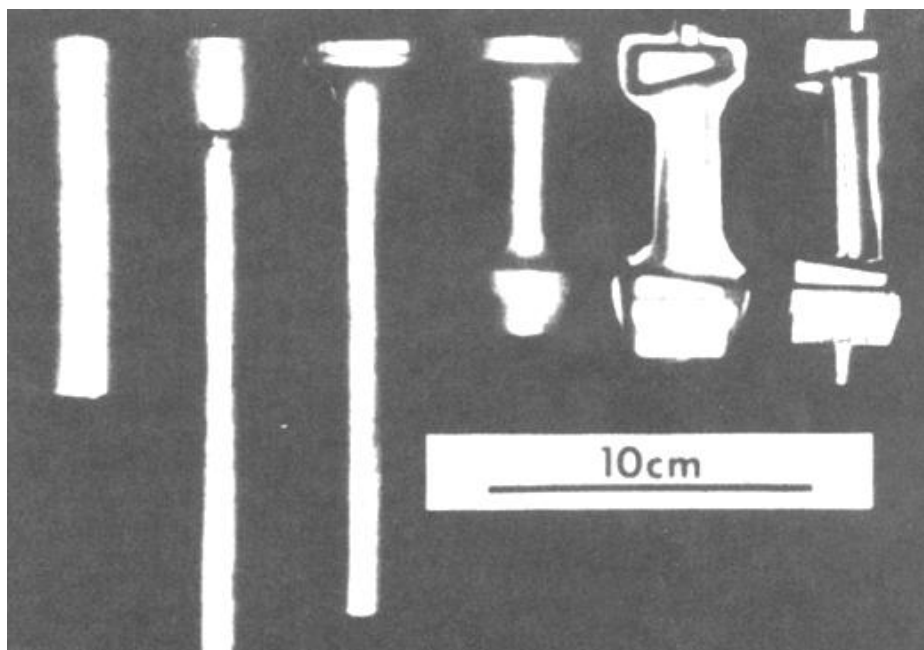
شکل ۱۰. طرح ساده و اجزای نهایی قطعه فورج شده

شکل ( ۱۱ ) یک شفت توربین از سوپرآلیاژ پایه آهن- نیکل A-۲۸۶ که حدود سال ۱۹۶۰ فورج شده است را نشان می دهد. پره های توربین فورج شده معمولا سال های زیادی برای AGTs و توربین های گازی مورد استفاده قرار می گیرند . شکل ( ۱۲ ) نتایج بدست آمده از مراحل فورج نمونه را در فورج یک پره ی توربین نشان می دهد. هزینه های بالای سوپرآلیاژهای پایه نیکل به این معنی است که پره های توربین فورج شده و دیگر اجزا تنها باید با روش هایی تولید شوند که استفاده از مواد به حداکثر و ماشین کاری کاهش یابد. در اوایل موتور های توربین گاز، سوپرآلیاژهای پایه نیکل بزرگتر از ابعاد فورج شده و ماشینکاری می شدند تا در نهایت به ابعاد واقعی برسد. با تکنولوژی فورج اجازه داده شد، افزایش دقت، پره های توربین بزرگتر از اندازه با پره های دقیق فورج شده جایگزین شوند.

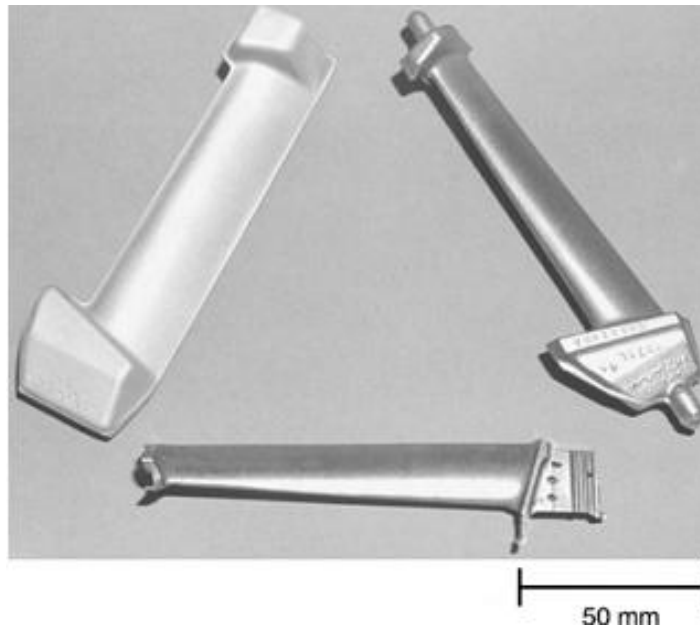
شکل ( ۱۳ ) تفاوت نمونه بزرگتر از اندازه و دقیق فورج شده ی پره ها و اختلاف آن ها با اجزای ماشین کاری شده نهایی نشان می دهد. دقت فورج در تولید اجزای دیسک نیز مورد استفاده قرار می گیرد. اندازه بسیار بزرگ و حجم زیاد بیلت ، گرفتن درجه یکسان کنترل در دیسک ها را مشکل می کند.



شکل ۱۱. فورج شفت توربین سوپرآلیاژ پایه آهن- نیکل A-۲۸۶



شکل ۱۲. نتایج مراحل مختلف در فورج یک پره توربین از سوپرآلیاژ پایه نیکل



شکل ۱۳. چپ به راست: نمونه بزرگتر از اندازه، نمونه دقیق فورج شده و پره ها ماشینکاری نهایی

## ۲-۷ مشکلات قطعه فورج شده

مشکلات فورجینگ ممکن است از منابع بسیاری به وجود آید. کنترل اندازه دانه نامرغوب، نواحی یکنواخت شده اندازه دانه، کاربید نامرغوب و یا مورفولوژی (توزیع) فاز دوم، ترک خوردگی داخلی، و ترک سطحی میانی دلیلی برای رد قطعات فورج شده است. شکل های (۱۴) و (۱۵) برخی از ترک های سطحی و محیطی را که در یک سوپرآلیاژ پایه نیکل در طی فورج رخ داده است را نشان می دهد. شکل (۱۶) تغییرات در ریز ساختار IN-۷۱۸ را که ممکن است تنوع درجه حرارت ناخواسته در فورج ایجاد کند نشان می دهد. شکل (۱۷) اثر بیش از حد دمای فورج را برای IN-۷۱۸ نشان می دهد. استفاده از طراحی به وسیله ی کامپیوتر، ساخت، و مهندسی در فورج آلیاژهای مقاوم در برابر گرما در کیفیت بالاتر و پایین آوردن هزینه مهم است.



شکل ۱۴. سطح ترک ایجاد شده به دلیل عمل فورج نامرغوب



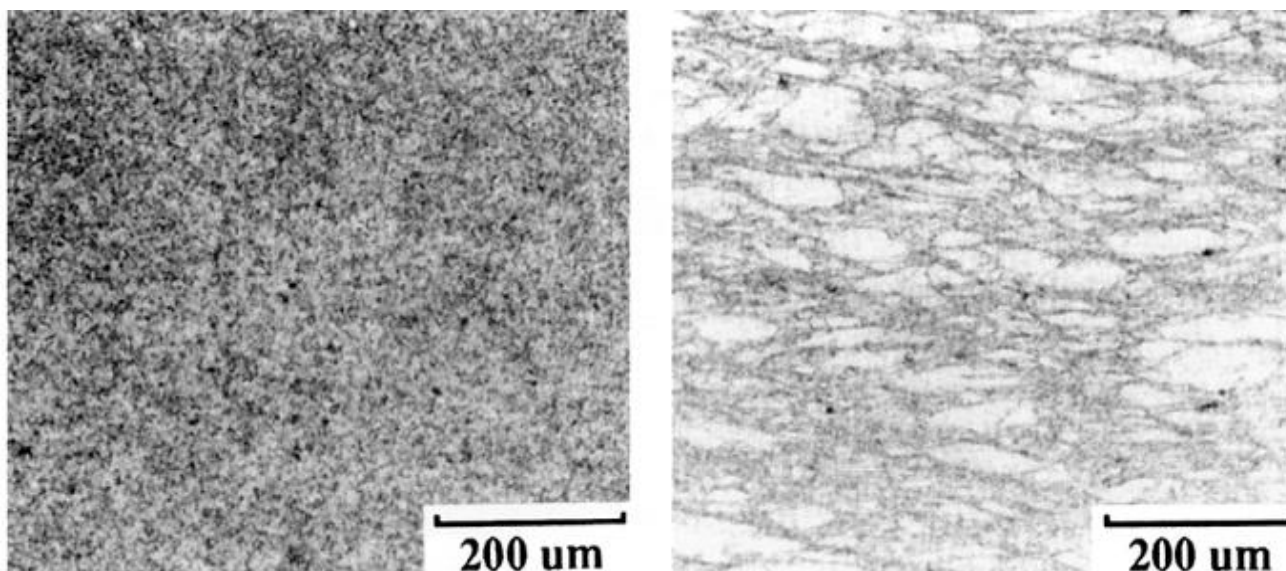
شکل ۱۵. دور ترک ایجاد شده با فورج نامرغوب

باچند مرحله ای کردن فرآیند تغییر شکل در عملیات آهنگری سوپر آلیاژها کاهش زیادی در اندازه دانه انجام می گیرد .

۷۱۸-IN در دمای ۹۵۴ درجه سانتی گراد تابکاری انحلالی شده و سپس عملیات پیر سنجی دو مرحله ای در دماهای کمتر انجام می گیرد . این دما برای تنش زدایی کامل یا تبلور مجدد آلیاژ کافی نیست و قابلیت شکل پذیری آن نیز پائین است . انحلال در دمای بالاتر از ۱۰۳۸ درجه سانتی گراد بر ارتقاء قابلیت شکل پذیری تاثیر بیشتری دارد . اما آلیاژ را مستعد شکست ترد در آزمایش ضربه می کند .

پره های توربین اولیه از فولادهای آستنیتی و به روش فورج تهیه می شدند ولی بدلیل استحکام خزشی کم در اوایل دهه ۱۹۴۰ سریعاً با آلیاژهای پایه نیکلی مانند Nimonic ۷۵ , Nimonic ۸۰ جایگزین شدند . پس از آن آلیاژهای دیگری با استحکام بالاتر و توانایی دمایی بالاتر مانند Nimonic ۱۰۵ , Nimonic ۹۰ و Nimonic ۱۱۵ در انگلستان و Waspaloy , Inconel X-۷۵۰ , U ۵۰۰ و U ۷۰۰ در آمریکا طراحی و به کار گرفته شدند .

هر چه استحکام این آلیاژها بالاتر می رفت قابلیت فورج پذیری آنها کاهش میافت. طراحی و توسعه آلیاژ به تنهایی قادر به برآوردن نیازهای طراحان توربین برای افزایش دمای کاری توربین ها نبود و بنابراین روش های ساخت نیز جهت ایجاد شکلهای مناسب تر ایرفویل و ایجاد کانال های خنک کننده در پره ها توسعه داده شدند.



شکل ۱۶. ریزساختار اینکلوی ۷۱۸، نشانگر تغییرات ایجاد شده با دمای فورج



شکل ۱۷. ریز ساختار IN-۷۱۸ بیانگر اندازه دانه ایجاد شده با دمای فورج خیلی زیاد



### ۳ - ارائه و بررسی نتایج

برخی از ترکیبات سوپر آلیاژی سرانجام در دمای فورج خیلی قوی شدند به طوری که با تکنیک های فورج معمولی نمی توانند فورج شوند. هر چه استحکام سوپر آلیاژها بالاتر می رود قابلیت فورج پذیری آنها کاهش می یابد. معمولاً عملیات شکل دهی در دمای بالا صورت می گیرد و تعداد کمی از سوپر-آلیاژها را می توان به صورت سرد شکل دهی نمود. ساختارهای یکنواخت و ریز دانه ای که از شکل دهی سرد حاصل می شود نسبت به ساختارهای شکل دادن گرم ارجحیت دارند. پره های توربین فورج شده و دیگر اجزا تنها باید با روش هایی تولید شوند که استفاده از مواد به حداکثر و ماشینکاری کاهش یابد. کنترل ریزساختار، شکل و خواص به وسیله ی نورد و اکستروژن اهمیت اساسی دارد. توربین های گازی عامل اصلی پیشرفت سوپر آلیاژها هستند.

۱. **ASM Handbook / SUPERALLOYS/ A Technical Guide/ Second Edition/**

Matthew J. Donachie & Stephen J. Donachie

۲. **TERMO-MECHANICAL PROCESS OF METALLIC MATERIALS / Bert**

**Verlinden**

*Department of Metallurgy and Materials Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgium*

**Julian Driver**

*Materials Centre, Ecole des Mines de Saint-Etienne, Saint Etienne Cedex, France*

**Indradev Samajdar**

*Department of Metallurgical Engineering and Materials Science, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai, India*

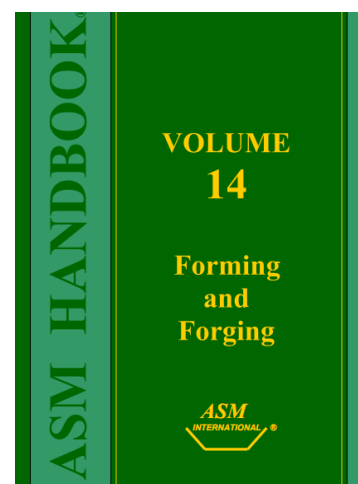
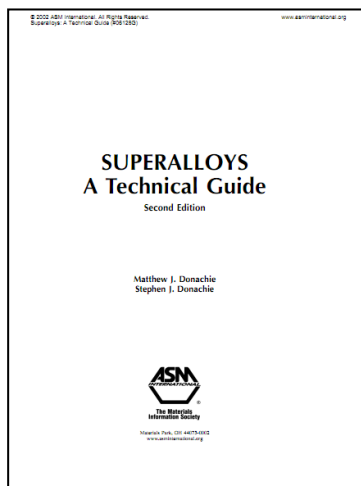
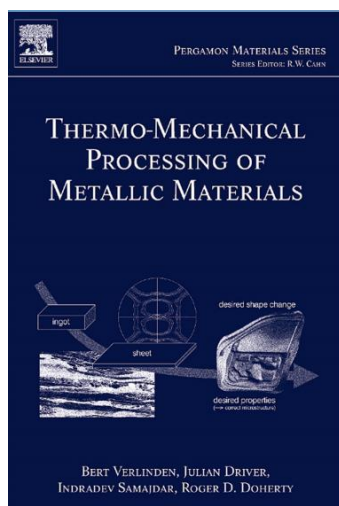
**Roger D. Doherty**

*Drexel University, Philadelphia, PA, USA*

Edited by

**Robert W. Cahn**

۳. **HANDBOOK / VOLUME ۱۴/ Forming and Forging**





# **Forming & forging**

**Super alloys**

**METALS FORMING**

**Somayye Kheiri**

۲۰۱۲