

UDC 669.14.018.292:621.772
621.984.3:669.112.227/.228

圧力容器用鋼の $(\alpha + \gamma)$ 2相域成形鏡板の諸特性

Mechanical Properties of Head Plates Formed at $(\alpha + \gamma)$ Phase Temperature Range

石川 正明*
Masaaki Ishikawa

上田 修三**
Syuzo Ueda

楠原 祐司***
Yuji Kusuhara

小林 英司****
Eiji Kobayashi

猪又 克郎*****
Katsuro Inomata

吉村 健*****
Takeshi Yoshimura

浜田 晋作*****
Shinsaku Hamada

Synopsis:

The effects of hot-forming at $\alpha + \gamma$ temperature range and subsequent heat treatments of steel plates on their mechanical properties have been investigated. ASTM-A516-70, A387-12 and A387-22 steel plates were used for laboratory studies and for actual head plate forming experiments. The results obtained are as follows.

(1) The hot-press forming process which consists of a heating at a temperature in γ range and a press forming at temperatures in $\alpha + \gamma$ range during cooling gives good tensile and impact properties to all steels after only stress-relieving heat treatment. This suggests a possibility of elimination of normalizing treatment which is usually conducted after press-forming.

(2) The hot-spinning forming process which consists of a heating and a spinning forming at temperatures in approximately mid-range of $\alpha + \gamma$ gives good tensile and impact properties for A516-70 and A387-12 steels after only stress-relieving heat treatment. For A387-22 steel in this process, however, normalizing treatment after spinning forming should not be omitted to give an optimum yield and tensile strengths.

The foregoing properties of head plates have been endorsed by metallographic observations.

1. 緒 言

圧力容器の製作に際し熱間での成形加工が広く行われており、なかでも鏡板の熱間成形加工はその代表的なものである。厚肉鏡板の成形には主に

熱間プレス加工法と熱間スピニング加工法が用いられ、それらは加工法の特性和対象鏡板の寸法、形状、数量などを勘案して適宜選択されている。

熱間成形加工を受けた鋼材では、加工歪と熱履歴により材質が変化するので、加工後焼ならし、焼もどし、応力除去焼鈍(SR処理)などの熱処理

* 技術研究所厚板研究室主任研究員
*** 水島製鉄所管理部厚板管理課掛長
***** 技術本部鋼材技術部大阪鋼材技術室主査(副部長待遇)
***** (關北海鉄工所取締役品質保証部長
〔昭和55年1月11日原稿受付〕

** 技術研究所厚板研究室主任研究員・工博
**** 水島製鉄所管理部検査課掛長
***** 三菱重工(株)神戸造船所プラント工作部工務課課長

が付与され材質の改善が図られている。

圧力容器に使用される主な鋼種について、それらの鏡板の種々の部位における材質を、加工ならびに後熱処理条件を因子として系統的に把握し、各鋼種の材質面からみた適正な熱間成形条件と熱処理条件を見いだすことは、圧力容器の高温高圧化、大型化が進む状況下で、容器の信頼性すなわち鏡板の品質向上という観点並びに経済的能率のプロセスの確認という点から、きわめて重要な課題である。

鏡板の熱間成形加工に関するこれまでの研究は、成形機構、寸法精度、成形時の割れ等の加工性などに関連したものが多く、材質に関するもの¹⁾は多くあるとはいえない。そこで筆者らは、熱間成形加工とその後の熱処理による圧力容器用鋼の材質変化に関する基礎研究として、種々の鋼種について系統的な熱間加工シミュレーション試験を行った²⁾。この試験で、 $(\alpha + \gamma)$ 2相域における成形加工の場合も、成形加工温度を適切な範囲に制御すれば、加工後単にSR処理を施すだけで良好な強度と靱性が得られ、特定鋼種ではその靱性は加工前の素材のそれよりむしろ優れているという現象を見いだした。このような試験結果を踏まえ、 $(\alpha + \gamma)$ 2相域における成形加工に着目した、実物大試験体での鏡板成形加工試験を行った。すなわち圧力容器用鋼板A516 Grade70, A387 Grade12 Class 2およびA387 Grade22 Class2鋼を対象鋼種とし、熱間プレス加工法（三菱重工業(株)神戸造船所で実施）および熱間スピニング加工法（(株)北海鉄工所で実施）によりそれぞれ鏡板を製造した。熱間プレス成形においては素材鋼板の加熱温度を γ 域、成形温度を $(\alpha + \gamma)$ 2相域とし、また熱間スピニング成形においては加熱温度、成形温度ともに $(\alpha + \gamma)$ 2相域として、成形のままおよび熱

処理後の鏡板各部位の材質諸特性を調べ、各部位が受けた歪および熱履歴との対応を検討した。また同一素材を用いて加熱温度と加工温度を広範囲に変化させた熱間加工シミュレーション試験も行い、実鏡板との材質諸特性の比較検討も行った。

2. 鏡板の製造

2.1 供試鋼板

ASTM規格の圧力容器用鋼板であるA516 Grade 70, A387 Grade12 Class 2およびA387 Grade22 Class 2の3種類の鋼板（以下それぞれA516-70, A387-12, A387-22鋼と記す）を実験の対象にした。A516-70鋼は転炉→RH脱ガスプロセス、A387-12およびA387-22鋼は電炉→取鍋精錬プロセスで溶製し、いずれも板厚45mmに圧延し、所定の熱処理を施した。これら供試鋼板の化学成分および機械的性質をTable 1およびTable 2に示す。いずれの鋼板も、それぞれの鋼種を代表するに適切な材質特性を示している。

2.2 鏡板の形状

圧力容器の鏡板は、その形状によりさら形、半だ円体形、半球形など多くの種類があるが、本実験では最も一般的な2:1半だ円体形鏡板を対象とし、Fig. 1に示すように、熱間プレス加工法については内径2 430mm、熱間スピニング加工法については内径3 000mmの2:1半だ円体形鏡板を製造した。なお図中にCrown Part (C.P.), Intermediate Part (I.P.), Knuckle Part (K.P.)およびFlange Part (F.P.)として表示した箇所は、鏡板の材質諸特性を調べた箇所を示しており、I.P.はC.P.とK.P.のほぼ中間部とした。

Table 1 Chemical compositions of experimental steel plates³⁾

(wt %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
A 516-70	0.17	0.24	1.19	0.016	0.003	0.14	0.44	0.10	0.049	0.030	0.031
A 387-12 Cl. 2	0.15	0.25	0.57	0.005	0.002	0.04	0.21	1.07	0.555		0.014
A 387-22 Cl. 2	0.14	0.24	0.51	0.006	0.003	0.12	0.16	2.43	0.969	—	0.014

Table 2 Mechanical properties of experimental steel plates ($\frac{1}{4}t$, transverse)

Steel	Thickness (mm)	Heat treatment	Tensile test *			Charpy impact test		
			Y.S. ** (kgf/mm ²)	T.S. ** (kgf/mm ²)	El. ** (%)	$\sqrt{E_{40}}$ *** (kgf·m)	$\sqrt{E_0}$ *** (kgf·m)	$\sqrt{T_S}$ (°C)
A 516-70	45	Spec.	≥ 26.8	49.3 ~ 61.5	≥ 21			---
		N ^①	33.3	53.8	30	11.7	16.7	- 25
		N ^① -SR ^④	34.9	53.0	33	7.9	13.8	- 17
A 387-12 Cl.2	45	Spec.	≥ 28.2	45.7 ~ 59.8	≥ 22			---
		N ^② -T ^③	36.5	52.5	36	14.2	32.7	- 39
		N ^② -T ^③ -SR ^⑤	36.0	52.1	33	9.2	35.5	- 28
A 387-22 Cl.2	45	Spec.	≥ 31.7	52.8 ~ 70.4	≥ 18			---
		N ^② -T ^③	56.4	71.0	25	13.9	24.4	- 34
		N ^② -T ^③ -SR ^⑥	52.3	66.6	25	12.1	21.9	- 33

① 900°C×64min→A.C. ② 930°C×64min→A.C. ③ 690°C×145min→A.C.

④ 615°C×8h→F.C. ⑤ 650°C×15h→F.C. ⑥ 690°C×15h→F.C.

* Specimen: JIS 14A (10mmφ)

** Average for two specimens

*** Average for three specimens

Forming method	Thickness t (mm)	Inside dia. D (mm)	Crown rad. R (mm)	Knuckle rad. r (mm)
Press forming	45	2 430	2 156	420
Spinning forming	45	3 000	2 714	518

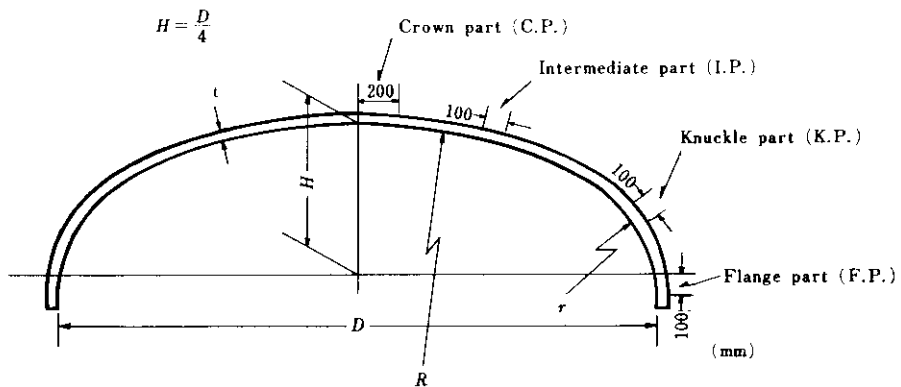


Fig.1 Dimensions of 2 : 1 ellipsoidal head plate tested

2・3 鏡板の製造プロセス

2・3・1 熱間プレス加工

熱間プレス加工による鏡板の製造は、Fig. 2に示す工程で行った。加熱炉（重油炉）による全体加熱の温度は、いずれの鋼種も $925^{\circ}\text{C} + 25^{\circ}\text{C}$ を目

標とした。

1次成形（粗絞り加工、クラウン部の成形）および2次成形（仕上絞り加工、ナックル部およびフランジ部の成形）ともその成形温度の設定は、成形時に測定可能な表面温度による制御を考慮し、Fig. 3に示すように、表面温度が $A_{r3} + 50^{\circ}\text{C}$ まで低下した時点を押ス加工開始点とした。ちなみ

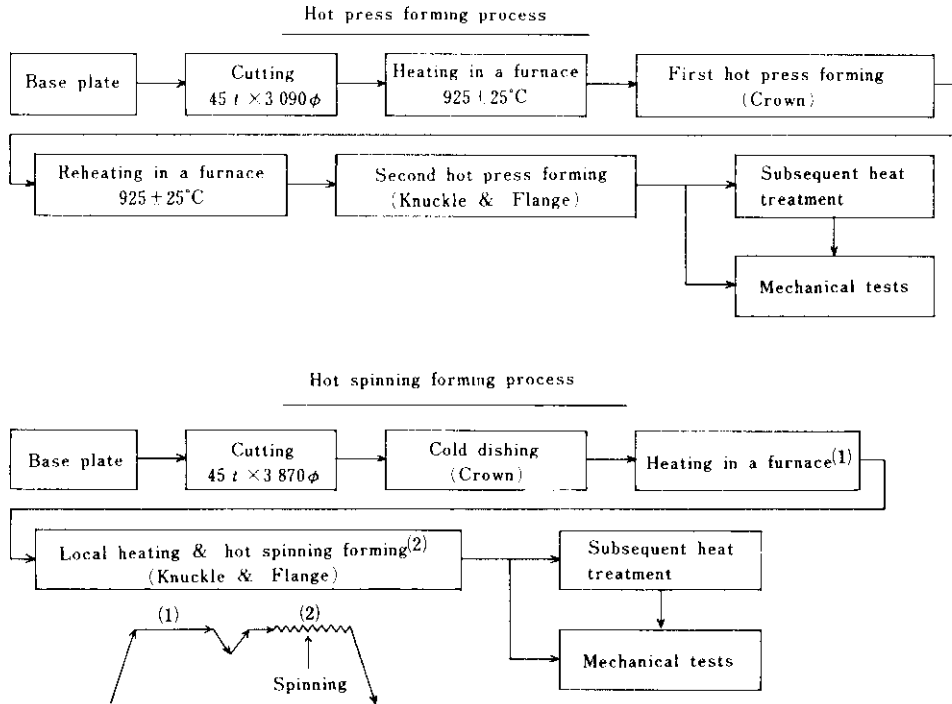


Fig.2 Forming and heat treatment procedures of head plate

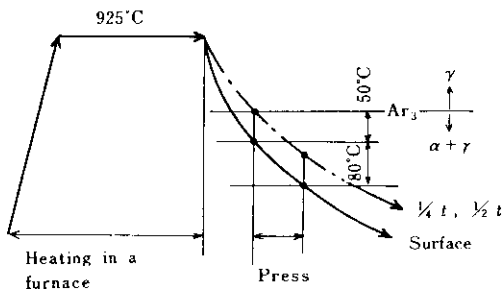


Fig.3 Temperature range aimed for press

に、板厚45mmの鋼板を空冷した場合、 Ar_3 点近傍における鋼板の表面と $\frac{1}{2}t$ 部(t :板厚)および $\frac{1}{4}t$ 部との温度差は、約 50°C である。 $\frac{1}{2}t$ 部と $\frac{1}{4}t$ 部の温度差はほとんどない。したがって、プレス加工開始温度をこのように設定することにより、表層部、中心部ともに $(\alpha + \gamma)$ 2相域で塑性加工を受けることになる。なお成形終了までの表面温度の低下は、約 80°C と推定した。プレス加工時の表面温度の測定には、赤外線カメラ(サーモビューア)および接触式放射温度計を使用した。また別途同一鋼板から切出したダミー試験片を用いて、プレス加工に合わせた熱サイクルを与え、その表面、

$\frac{1}{4}t$ 部および $\frac{1}{2}t$ 部の温度をCA熱電対により測定し、赤外線カメラ等による実体表面温度測定結果との対応、および実体内部温度の推定を行った。それらの結果の一例をFig. 4に示す。この図に示されるように、ダミー板による表面温度の推定値と、赤外線カメラおよび放射温度計による実体表面温度とは比較的よく一致している。赤外線カメラお

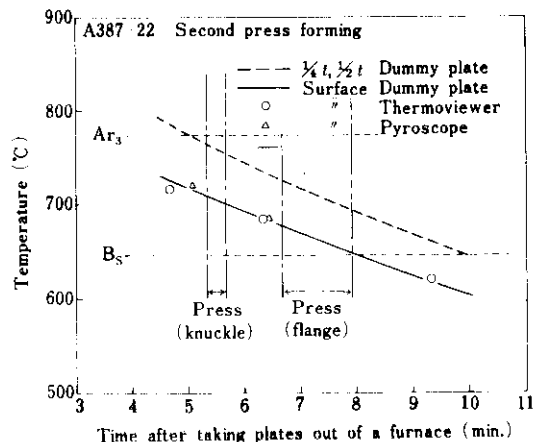


Fig.4 Change of material temperature measured during hot press forming

よび放射温度計による実体表面温度の測定は鋼板に金型が接触している間は不可能であるため、実際の加工時の表面温度は成形直前および直後の実測温度とダミー板を用いて測定した冷却曲線から推定することになる。今回の実験では成形直前または直後の測定を約20s以内という短時間内におさめたのでその推定値の精度はかなりよいものと考えられる。このようにして推定したプレス加工温度をTable 3に示す。なお、プレス加工時の鋼板全体の表面温度分布も、赤外線カメラを使用して測定したが、鋼板端部を除き、温度のばらつきは最大20°C程度で、均一性は良好であった。

2・3・2 熱間スピニング加工

熱間スピニング加工による鏡板の製造工程をFig. 2に示す。通常熱間スピニング加工においては、極厚材を除き、全体加熱は行わず局部加熱のみで加工が実施されるが、本試験では、スピニング加工時のナックルからフランジにかけての温度

の均一性をできるだけ高めるため、加熱炉による全体加熱の工程を追加した。全体加熱および局部加熱の温度は、当然のことながらほぼ同一とし、その目標温度はそれぞれの鋼種のAc₁点～Ac₃点、($\alpha + \gamma$) 2相域、のほぼ中央とした。加熱炉中の鋼板温度はCA熱電対で測定し、加熱炉より搬出してフランジング・マシンにセットした後、加工完了までは光高温計でナックル部の表面温度を実測した。また温度分布の測定のため、赤外線カメラも併用した。目標温度、実測温度、スピニング加工時間をTable 4にまとめて示す。加熱炉より鋼板を搬出し、フランジング・マシンにセットし、局部加熱を開始するまでの所要時間は3～4minであり、その間の温度低下は60～70°Cであった。加工開始から加工完了まで、温度はTable 4に示す範囲で変動した。なお局部加熱時の温度分布を赤外線カメラを用いて測定したが、加工部であるナックルからフランジにかけての半径方向の温度のばらつきは小さく、10～20°Cであった。

Table 3 Hot press forming temperatures

Steel	Ar ₃ (°C)	Ar ₁ (°C)	B _s (°C)	Position	First press forming (Crown)		Second press forming			
					Start (°C)	Finish (°C)	Knuckle		Flange	
							Start (°C)	Finish (°C)	Start (°C)	Finish (°C)
A 516-70	725	621	—	Surface	746	696	700	696	674	660
				¼, ½ t	794	740	742	733	696	682
A 387-12	785	674	635	Surface	727	697	719	715	697	688
				¼, ½ t	765	733	760	756	735	720
A 387-22	774	—	646	Surface	698	640	708	700	676	650
				¼, ½ t	752	684	764	754	725	695

Table 4 Forming conditions for hot spinning

Steel	Ac ₁ (°C)	Ac ₃ (°C)	Aiming temperature		Results of measurements		
			Heating temp. in a furnace (°C)	Local heating & forming temp. (°C)	Heating temp.* in a furnace (°C)	Local heating** & forming temp. (°C)	Forming time (min)
A 516-70	719	827	790 ± 10	790 ± 25	790	735 ~ 785	37.0
A 387-12	749	850	810 ± 10	810 ± 25	815	780 ~ 810	36.5
A 387-22	785	860	830 ± 10	820 ± 25	830	765 ~ 818	37.5

* Crown part, using C.A. thermoelectric couple

** Knuckle part, using optical pyrometer

2・3・3 鏡板の熱処理および試験項目

成形後の鏡板は、加工歪の分布を測定した後分割し、Table 5 に示すように、加工のままおよび熱処理後の基本的な材質諸特性を調べた。

Table 5 Heat treatment conditions of head plates and mechanical properties tested

Forming method	Steel	Heat treatment of head plates	Type of tests *
Hot press forming	A 516-70	—	○ △
	A 387-12	SR ^①	○ △
		N ^② →SR ^①	○ △
	A 387-22	—	○ △
		SR ^①	○ △ ●
Hot spinning forming	A 516-70	—	○ △
	A 387-12	SR ^①	○ △
		N ^② →SR ^①	○ △
	A 387-22	—	○ △
		SR ^①	○ △ ●

① A 516-70:615°C×8h→F.C., A 387-12:650°C×15h→F.C., A 387-22:690°C×15h→F.C.

② 925°C×53min, cooling on a furnace car

* ○ Tensile tests at R.T.
● Tensile tests at 400°C
△ Charpy impact tests

3. シミュレーション試験

A 387-12およびA 387-22鋼について、実体鏡板試験と同一の鋼板を用いて、熱間プレス加工および熱間スピニング加工のシミュレーション試験を行った。

シミュレーション試験は、実験室電気炉と小型圧延機を組合わせて Fig. 5 に示す方法で行い、熱間成形における加工温度および加工量の、材質に及ぼす影響を系統的に調べた。加工量は板厚の減少率で制御し、加工のままおよび加工→SR後の常温引張特性およびシャルピー衝撃特性を調べた。なおSR条件は、実体鏡板試験の場合と同一にした。

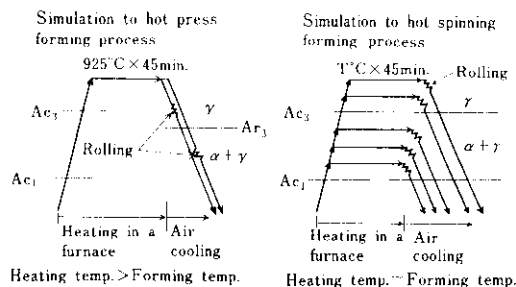


Fig. 5 Schema of simulations to actual hot press-and hot spinning forming processes

4. 鏡板試験結果

4・1 加工歪の分布

加工前の、円形に切断加工した鋼板の中心部より半径方向に50mm間隔で、円周方向および半径方向の加工歪を測定するためのポンチマークを打刻した。また同位置において加工による板厚変化量も測定した。代表として、A 387-12鋼について測定した結果を、加工前の中心部からの距離を横軸にして整理して Fig. 6 および Fig. 7 に示す。同じ加工法の場合には、他の鋼種も同様な加工歪分布を示していた。なお、スピニング加工材外面のナックル～フランジ間は、加工によるポンチマークの消失のため、円周および半径方向の加工歪の測定が不可能であった。

4・2 鏡板成形および後熱処理による材質変化

4・2・1 常温引張およびシャルピー衝撃特性

鏡板成形加工および、さらにSRあるいは焼ならし→SRの熱処理を施した場合の、常温引張および2mmVシャルピー衝撃特性の変化を Fig. 8～Fig. 19 に示す。常温引張試験では鏡板の外側面および内側面の $\frac{1}{4}t$ 部について、またシャルピー試験ではそれらの表層部について、いずれも試験片を鏡板円周方向に平行に、かつ素材鋼板のC方向に一致させて採取した。

Fig. 8～Fig. 19 において、3鋼種のプレス加工鏡板およびスピニング加工鏡板に共通する材質特性は、① 加工後に焼ならし→SRを施した場合

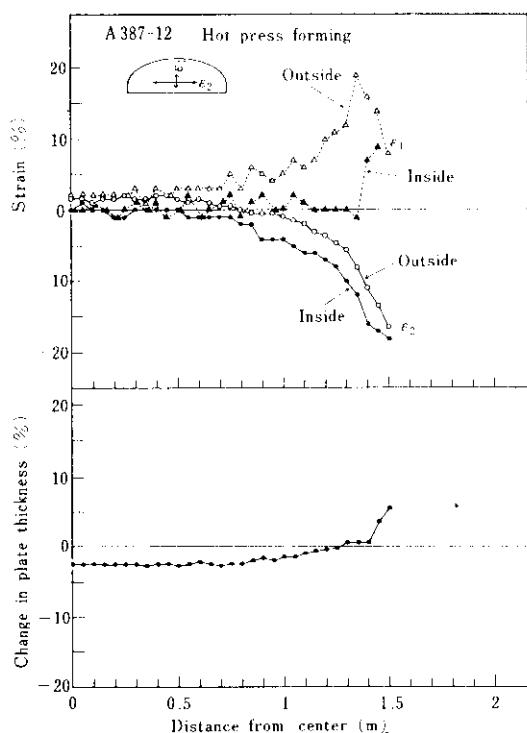


Fig. 6 Strains of a head plate by hot press forming

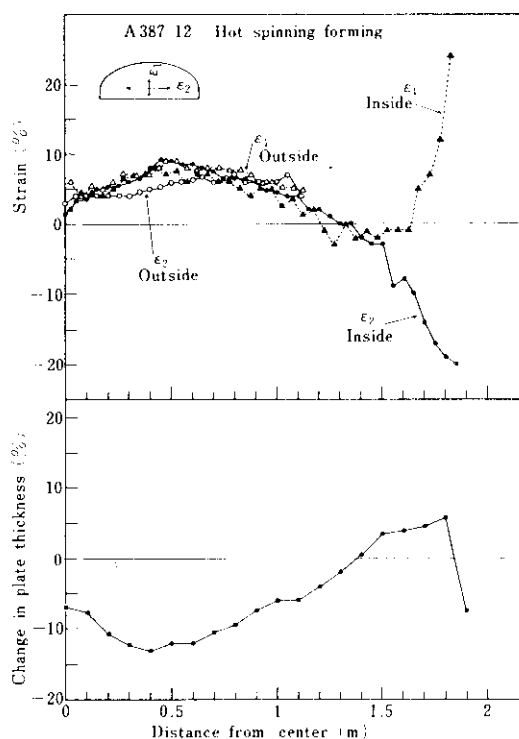


Fig. 7 Strains of a head plate by hot spinning forming

は鏡板全体にわたりほぼ均一で良好な常温引張特性と衝撃特性が得られること、②加工のままおよび加工→SRの状態においても鏡板各部位における外面側と内面側の常温引張特性および衝撃特性にはほとんど差がないこと、の2点である。

これらのほか、各鋼種、各加工法についてみられる特徴的な材質変化をまとめて、以下に列挙する。

(1) プレス加工鏡板

(a) A516-70鋼

Fig. 8およびFig. 9に示すように、プレス加工のままでは、クラウン部および中間部に比べ、ナックル部およびフランジ部の降伏強さがやや高くなり、靱性がやや劣る傾向を示すが、その程度は小さく、比較的均一な強度と靱性の分布を示す。またこれらのレベルも母材とはほぼ同等であるので、プレス加工のままで良好な常温引張特性並びに衝撃特性が得られるといえる。プレス加工後SRを施すと、いずれの部位もわずかな強度の低下と靱性の劣化を示すが、それでもなお、加工後に焼ならし→SRを施した場合と同等の良好な強度、延性、靱性を示すことは注目される。

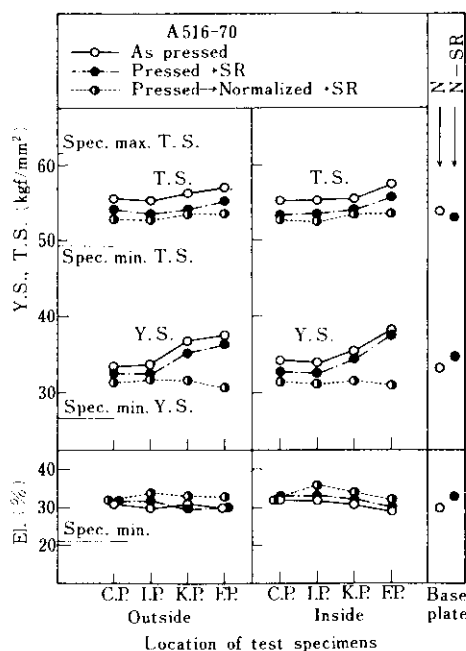


Fig. 8 Tensile properties of the A516-70 Steel head plate formed by the hot press forming process

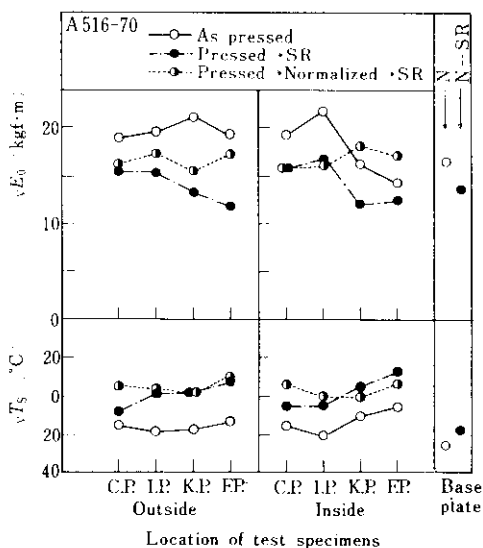


Fig.9 Charpy impact properties of the A516-70 steel head plate by the hot press forming process

(b) A387-12鋼

Fig. 10およびFig. 11に示すように、プレス加工のままで、いずれの部位についても母材規格

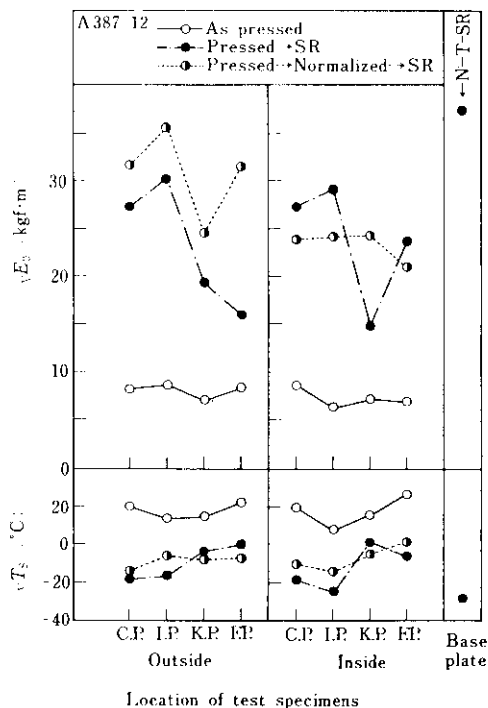


Fig.11 Charpy impact properties of the A387-12 Steel head plate formed by the hot press forming process

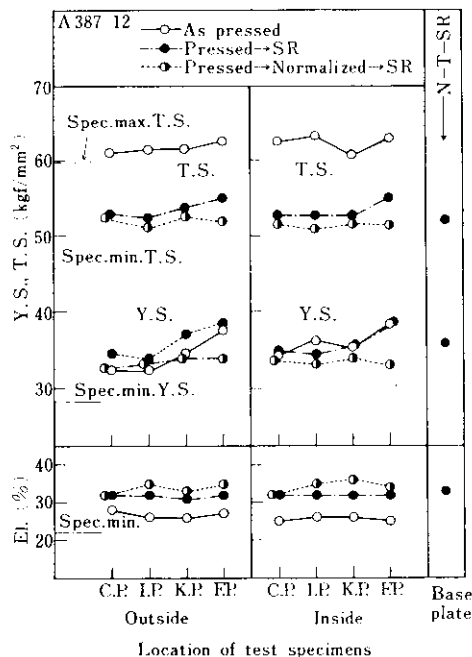


Fig.10 Tensile properties of the A387-12 Steel head plate formed by the hot press forming process

を上回る引張強さと低靱性を示すが、加工後SRを施せばそれらは改善され、部位による強度と靱性の差が多少あるものの、全体のレベルは加工後焼ならし—SR処理材や母材とはほぼ同等の良好なものとなる。

(c) A387-22鋼

Fig. 12およびFig. 13に示すように、プレス加工のままで降伏強さ、引張強さとも著しく高く、伸びは小さく、靱性も劣っている。そしてクラウンからフランジにかけての強度および靱性の変化も、前2鋼種に比べかなり大きい。プレス加工後焼ならしを行うまでもなく、SRのみを施すことにより、強度と伸びは母材(N-T-SR)とほぼ同レベルに改善され、靱性も著しく向上して母材と同等以上の値を示すようになる。またクラウンからフランジにかけての強度および靱性の変化も小さく、材質の均一化が図れる。

(2) スピニング加工鏡板

(a) A516-70鋼

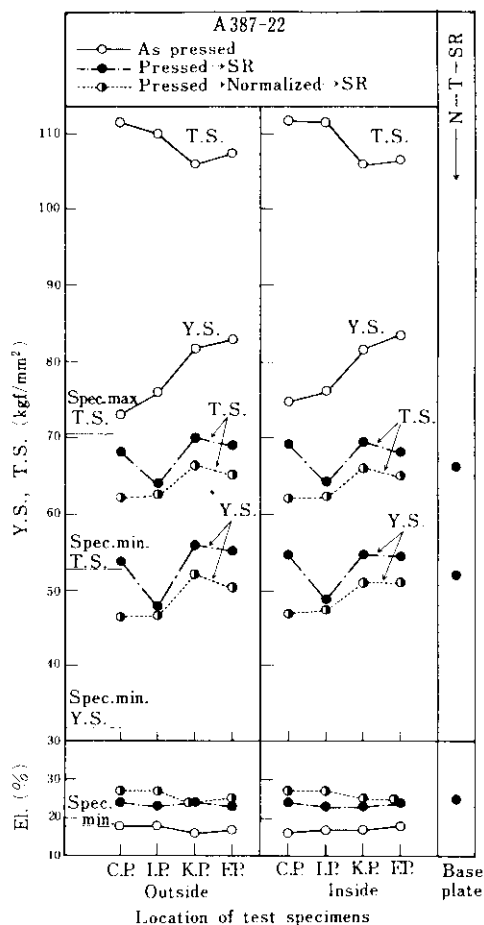


Fig. 12 Tensile properties of the A387-22 Steel head plate formed by the hot press forming process

Fig. 14およびFig. 15に示すように、スピニング加工のままの状態においてもクラウンからフランジにかけての強度および靱性のばらつきは小さく、いずれの部位においても、母材とはほぼ同等の良好な常温引張特性と衝撃特性を示す。スピニング加工後SRを行うと強度がやや低下するが、SRによる材質変化はおおむね小さいといえる。

(b) A387-12鋼

Fig. 16およびFig. 17に示すように、スピニング加工のままでは、中間部を除いて引張強さが母材規格を上廻る。スピニング加工後SRを施すと、鏡板全体にわたり比較的均一で良好な常温引張特性と衝撃特性を示す。これらの強度、伸び、靱性は、スピニング加工後焼ならしーSRを施した場合とほぼ同等である。

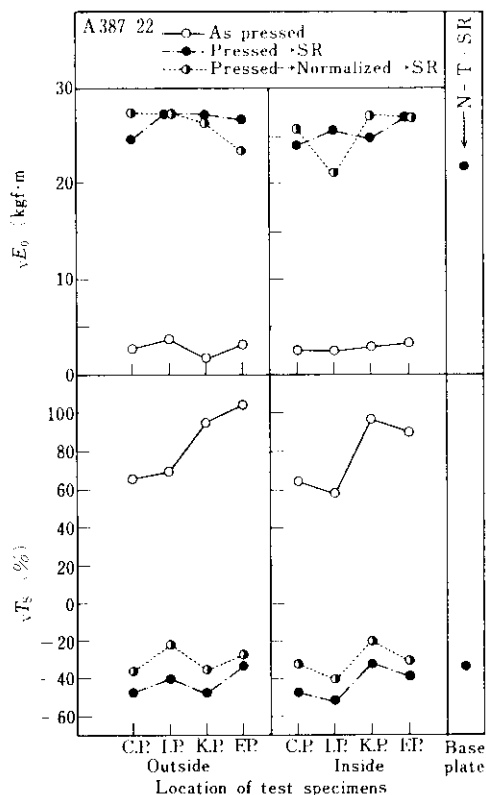


Fig. 13 Charpy impact properties of the A387-22 steel head plate formed by the hot press forming process

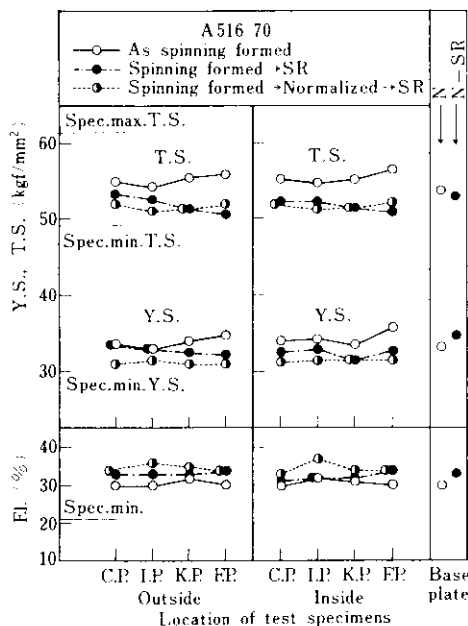


Fig. 14 Tensile properties of the A516-70 steel head plate formed by the hot spinning forming process

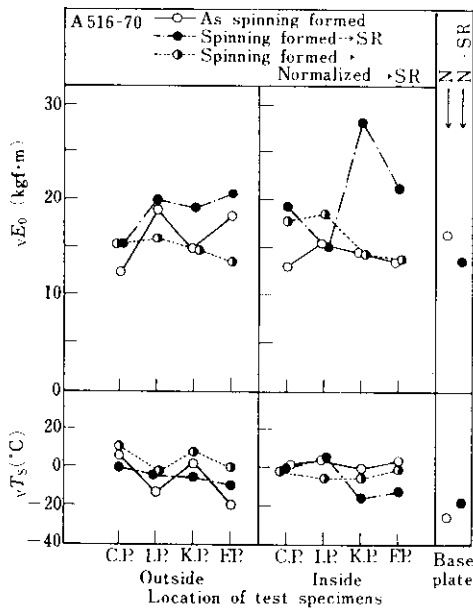


Fig. 15 Charpy impact properties of the A516-70 steel head plate formed by the hot spinning forming process

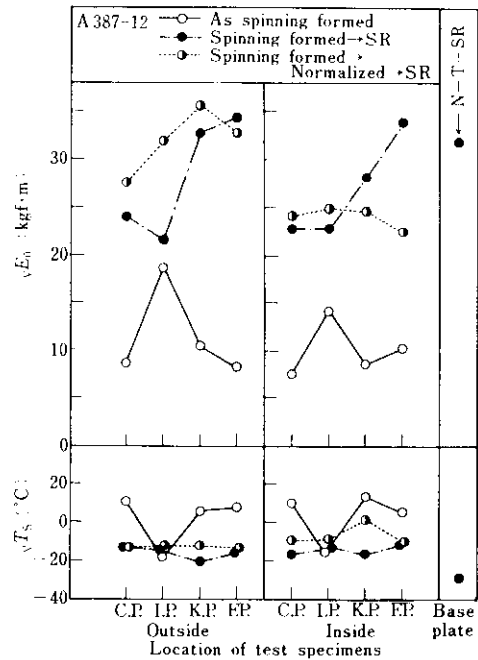


Fig. 17 Charpy impact properties of the A387-12 steel head plate formed by the hot spinning forming process³⁾

(c) A387-22鋼

Fig. 18 および Fig. 19 に示すように、スピニング加工のままであるプレス加工の場合ほど高強度と低靱性を示さないが、引張強さは母材規格を上廻る値を示す。スピニング加工後SRのみを付与した場合は、いずれの部位でも妥当な靱性を示すが、中間部からフランジにかけて降伏強さおよび引張強さとも母材規格を下廻る低い値となる。したがってこの鋼種では、強度確保の点から加工後の焼ならし処理は不可欠であるといえる。

4.2.2 高温引張特性

A387-22鋼の鏡板の中間部およびフランジ部について、高温引張特性を調べた。プレス加工鏡板については、加工後SRのみの熱処理で良好な常温引張特性とシャルピー衝撃特性が得られたので加工後SRを施した状態で、一方、スピニング加工鏡板については、加工後SRのみの熱処理では常温強度が母材規格を満足しないので加工後焼ならし-SRを施した状態で、それぞれ400°Cにおける高温引張試験を行った。得られた結果を Table 6 に示す。

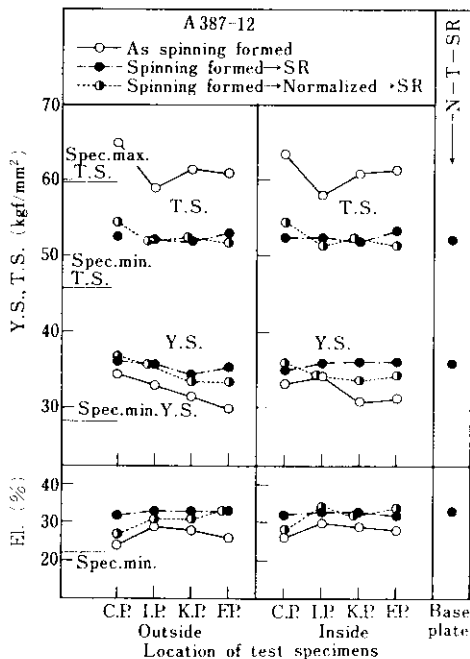


Fig. 16 Tensile properties of the A387 12 Steel head plate formed by the hot spinning forming process³⁾

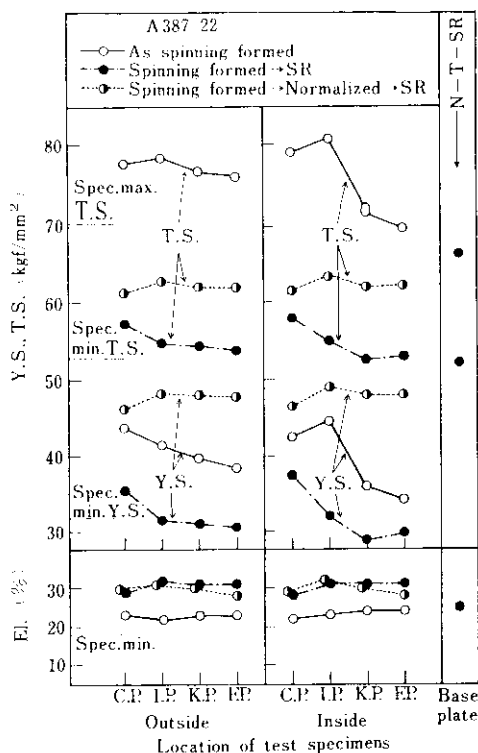


Fig. 18 Tensile properties of the A387-22 Steel head plate formed by the hot spinning forming process

プレス加工鏡板は、SRのみの熱処理で母材(SR後)より優れた高温強度を示し、中間部とフランジ部の強度差もほとんど認められない。スピニング加工鏡板は、焼ならし SRの熱処理により、母材とほぼ同等の高温強度を示す。

4.2.3 光学顕微鏡組織

母材の光学顕微鏡組織を Photo. 1 に、プレス加

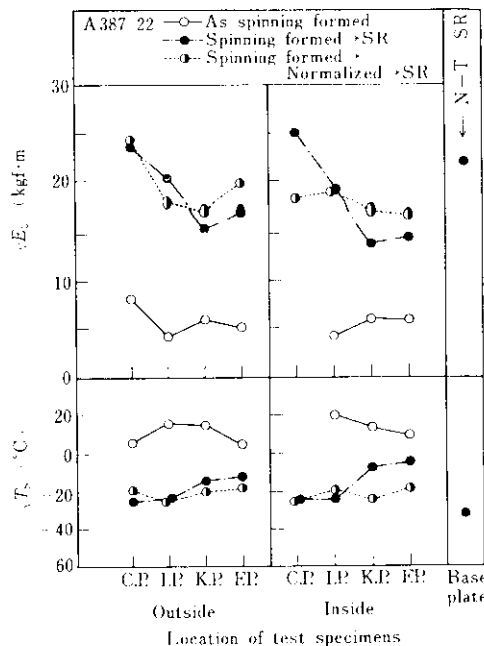


Fig. 19 Charpy impact properties of the A387-22 steel head plate formed by the hot spinning forming process

工およびスピニング加工後の鏡板ナックル部の組織を Photo. 2 に示す。A516-70鋼およびA387-12鋼では、プレス加工あるいはスピニング加工により結晶粒度やパーライトの分布形態が変化するが、基本的には母材と同じフェライト・パーライト組織(A387-12鋼は一部ベイナイトを含む)を示す。一方A387-22鋼では、プレス加工の場合は加工後も母材と同様の、初析フェライトをほとんど含まないベイナイト・マルテンサイトの混合組織を示すが、スピニング加工の場合は塊状のフェライトがかなり多く分布した微細な組織となる。

Table 6 Tensile properties at 400°C of head plates and a base plate of A387-22 steel

Materials	Heat treatment	Position		Y.S. * (kgf/mm ²)	T.S. * (kgf/mm ²)	El. * (%)
Head plate (press forming)	SR	I. P.	Inside	40.4	51.7	18
		F. P.	"	40.4	51.0	19
Head plate (spinning forming)	N +SR	I. P.	"	36.7	47.8	19
		F. P.	"	39.2	49.7	18
Base plate	N-T-SR	1/4 t		35.9	48.5	22

* Average for two specimens

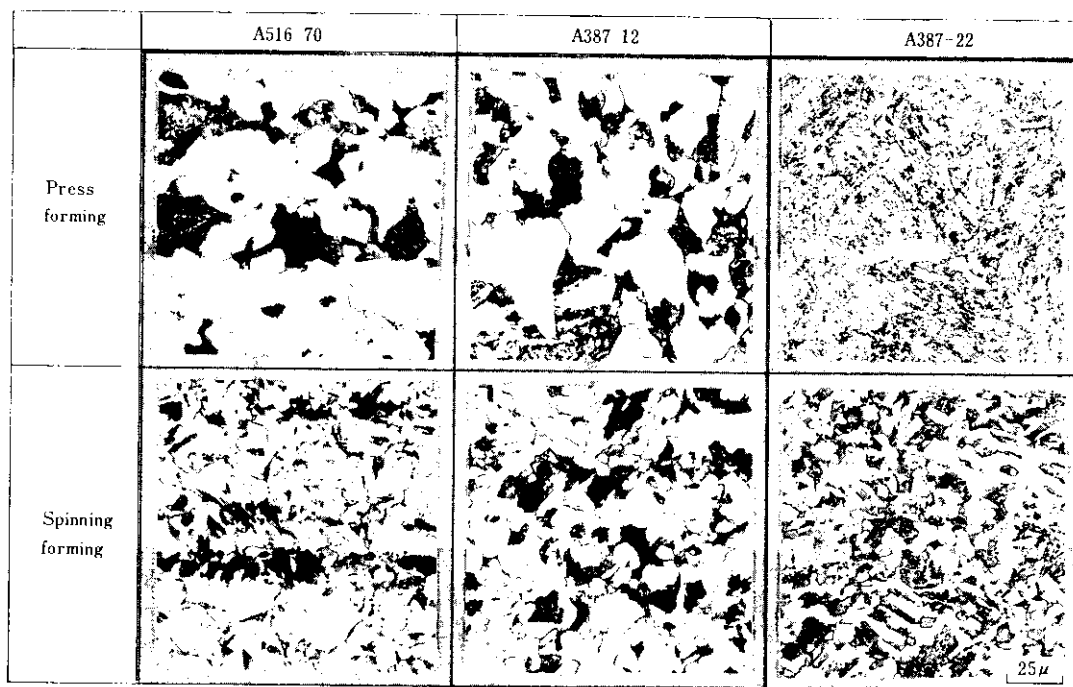
Photo. 1 Optical micrographs of base plates ($\frac{1}{2} t$)

Photo. 2 Optical micrographs of head plates (as formed, knuckle, outside)

5. 考 察

5.1 シミュレーション試験との対応

5.1.1 熱間プレス加工

熱間プレス加工をシミュレートした試験（加熱温度 925°C 一定，加工温度変化）の結果を鏡板加工試験の結果と対比させてFig. 20およびFig. 21に示す。これらの図において，横軸の加工温度は

板厚 $\frac{1}{4} t$ 部の温度を示しており（したがって表面温度はこれらより $40 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 低い温度となる），縦軸はそれに対応する板厚 $\frac{1}{4} t$ 部の機械的性質を示す。また図中のKおよびFの矢印は，鏡板のプレス成形時において，ナックル部およびフランジ部が主として加工を受けた時点の $\frac{1}{4} t$ ， $\frac{1}{2} t$ 部の温度を示している。

A_{r3} 点以上，すなわち γ 域で加工した場合，加工のままでは，A387-12鋼の強度は加工温度が異なっても大きな変化はないが，A387-22鋼の場合は，加工温度が γ 域内では低いほど降伏強さ，引張強

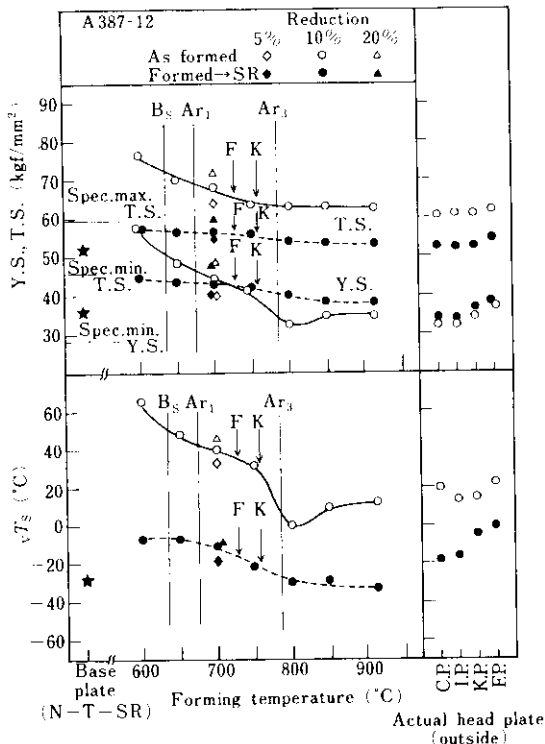


Fig.20 Mechanical properties of the A387-12 steel specimens simulated to the hot press forming process as a function of forming temperature (heating temp.: 925°C)

とともに低下する。A387-22鋼におけるこの強度低下は Ar_3 点以上での加工歪が Ar_3 変態を促進し、フェライトの多い組織に変化させ、その効果は加工温度が Ar_3 点に近いほど大きいのである。一方、A387-12鋼は、 γ 域から単純に空冷した場合でもフェライトが十分析出する組成の鋼であるため、加工歪による変態促進効果は、フェライト量増大よりむしろ変態組織の微細化に作用し、したがって強度はそれほど低下しないと考えられる。

一方加工温度が Ar_3 点以下になると、両鋼とも加工のままで降伏強さ、引張強さは、いずれも加工温度が低いほど高くなる。この Ar_3 点以下の加工で強度が上昇する理由は、次のように考えられる。

Ar_3 点以下の加工では、未変態のオーステナイト相と、すでに変態した相（主としてフェライト相であり、 Ar_1 点以下の加工ではさらにパーライト相が、 B_s 点以下の加工ではさらにベイナイト相が加わる）が加工を受けることになる。オーステ

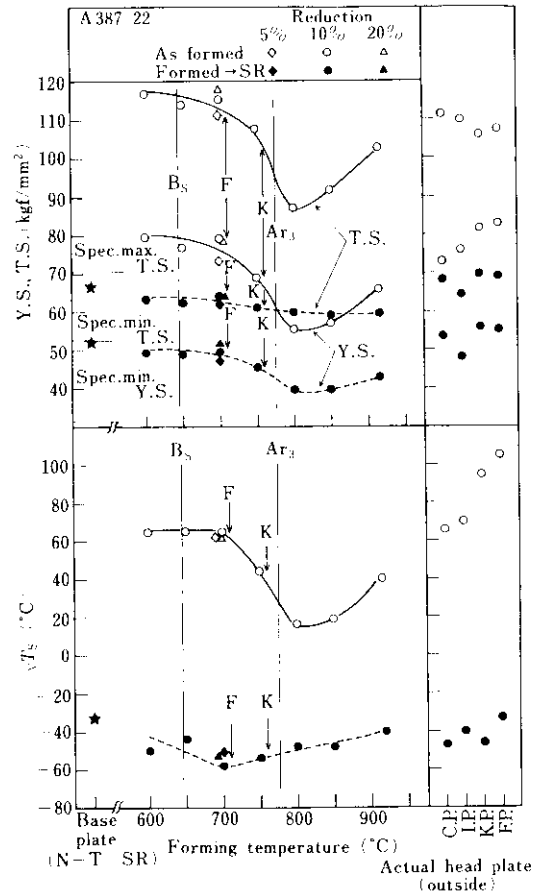


Fig.21 Mechanical properties of the A387-22 steel specimens simulated to the hot press forming process as a function of forming temperature (heating temp.: 925°C)

ナイト相の加工による硬化（転位密度の増大）はその後の変態によりほとんど消滅するのに対し、加工時にすでに変態していた相は、変態による加工硬化の消滅過程がないため、加工硬化が残残りやすい。また加工温度が低いほど、加工時にすでに変態していた相の割合が増すことと、加工後の冷却過程における転位密度の減少（熱活性化による転位の消滅）が少なくなることの両者の効果により、加工温度が低いほど加工後の強度は高くなる。

加工後SRを行うと、ベイナイト組織やマルテンサイト組織が焼もどされること、および加工硬化が消滅（転位密度が減少）していくため、両鋼とも強度が全般に低下し、加工のままでみられた、加工温度の違いによる強度の変化は著しく減少する。しかし、SR後もある程度の加工硬化の

影響は残るため、加工温度が Ar_3 点以下の方が強度が高い傾向が残る。

一方靱性については、加工温度が Ar_3 点以上の場合には加工歪による Ar_3 変態促進効果が生ずるため、前述のようにA387-12鋼は組織が微細化すること、A387-22鋼はフェライトの析出量が多くなることにより、両鋼とも加工温度が低いほど加工のままの状態での靱性はよくなる。そして加工温度が Ar_3 点以下の場合にはやはり前述のように加工硬化の影響が残るため、加工温度が低いほど加工のままの状態での靱性は悪くなる。

さらに、加工後SRを行うと、両鋼ともベイナイトやマルテンサイト組織が焼もどされること、および加工硬化の影響がかなり消失することのため、いずれの加工温度の場合も、靱性は大きく改善される。A387-12鋼の靱性は、 γ 域加工の場合は母材と同レベルまで回復するのに対し、 $(\alpha + \gamma)$ 2 相域加工の場合はSR後も加工硬化の影響が少し残るためそれらよりわずかに劣り、 $(\alpha + \gamma)$ 2 相域の低温側では破面遷移温度 vT_s が約20°C 高くなる。一方A387-22鋼のSR後の靱性は、加工温度が $Ar_3 \sim Bs$ 間、すなわち $(\alpha + \gamma)$ 2相域のほぼ中央のときに最も良好で、 γ 域加工材や母材より優れていることは注目される。この理由は次のように考えることができる。A387-22鋼は焼入性の高い組成を有し、 Ar_3 変態で析出するフェライト量が非常に少なく、したがって $(\alpha + \gamma)$ 2相域においては未変態のオーステナイトが大部分を占めることになる。このことは、加工硬化の残るフェライトが少なく、大部分の未変態のオーステナイトが B_s 点直前で加工を受けて、より微細なベイナイトに変態することになるため、靱性が非常に良好となる。加工温度がさらに低く B_s 点以下になると、変態したベイナイトが加工を受けることになり、その加工硬化の影響が残り、靱性は劣化する。

以上述べたシミュレーション試験データと鏡板試験データを比較する場合、Fig. 2の工程図に示したように、クラウン部、中間部は第1回目のプレス加工で主に成形され、その後 γ 域に再び加熱されて、第2回目のプレス加工ではほとんど加工を受けないので、加工後焼ならし処理を受けたものとみなすことができる。したがって、第2回目

のプレス加工で主として成形されたナックル部およびフランジ部が、比較の対象となる。

プレス加工鏡板のナックル部およびフランジ部の強度、靱性をシミュレーション試験と比較した場合、Fig. 21にみられるように、A387-22鋼では、SR後の引張および降伏強さは鏡板の方が高く、加工による靱性の劣化の度合は実際の鏡板の方が大きいなど、絶対値で比較した場合は少々の相違が認められる。しかし、プレス加工および後熱処理による強度および靱性の変化はシミュレーション試験によりかなりの精度で推察できるといえる。

シミュレーション試験における加工には圧延法を採用しているため、方向が主として2軸のみ(板厚方向の圧縮歪と圧延方向の伸び歪)の比較的単純な歪を与えているのに対し、実際の鏡板は、円周、半径および板厚方向の3軸方向の複雑な歪を受ける。厳密にはこれらの差異があるにもかかわらず、今回行ったシミュレーション試験はかなりよく実体を再現しているとみなせる。

その理由として、

- (1) 実体鏡板の場合、たとえばナックル部についてみれば、曲げ加工と絞り加工を合わせた変形を受け、Fig. 6にみられるように、外面側は半径方向の歪が最も大きく、15~20%の伸び歪を示すのに対し、内面側は半径方向の歪は小さく、円周方向の歪が最も大きくて、10~15%の圧縮歪を示している。このように、鏡板の外面側と内面側では最大の歪を受ける方向や歪の正負(伸び歪、圧縮歪の別)が異なるが、Fig. 8~13にみられるように、機械的性質は内外面で大きく差がないことから、これら歪の方向や正負の影響は少なく、歪の絶対値を主に考えればよいこと、
 - (2) シミュレーション試験において $(\alpha + \gamma)$ 域での加工量を5、10、20%と変化させた試験も行っているが、Fig. 20、Fig. 21に示されるように、機械的性質に及ぼす効果はこの程度の加工量の変動によるよりも加工温度の差によるほうが大きいこと、
 - (3) 実鏡板において最も加工歪の多い箇所である歪量は約20%であることから、10%程度の圧延加工によるシミュレーションでもかなり再現性がよいと考えられること、
- などがあげられる。

5・1・2 熱間スピニング加工

スピニング加工をシミュレートした試験（加熱温度＝加工温度としその温度を変化させた試験）の結果を、鏡板試験の結果と対比させて、Fig. 22 および Fig. 23 に示す。図中において、Tの矢印は、スピニング加工前に加熱炉で鋼板全体を加熱したときの加熱温度を示し、K & Fの矢印は、局部加熱しながらナックル部とフランジ部の加工を行ったときの実測温度平均値を示している。

シミュレーション試験で得られた加熱・加工温度と強度および靱性の関係は、次に述べるように、鋼種によりかなり異なる。

(1) A 387-12鋼

加熱・加工温度の770～925°Cの範囲での変化に対して、降伏強度および引張強度の変化は小さく、($\alpha + \gamma$) 2相域加工と γ 域加工の強度に及ぼす影響の差は小さい。また加工後のSRにより、いずれの加工・加熱温度および加工量の場合も、引張強

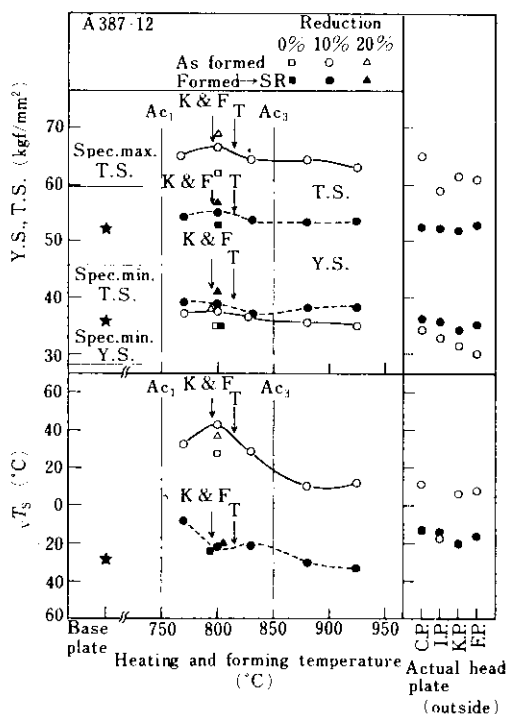


Fig. 22 Mechanical properties of the A387-12 steel specimens simulated to the hot spinning process as a function of heating and forming temperature³⁾

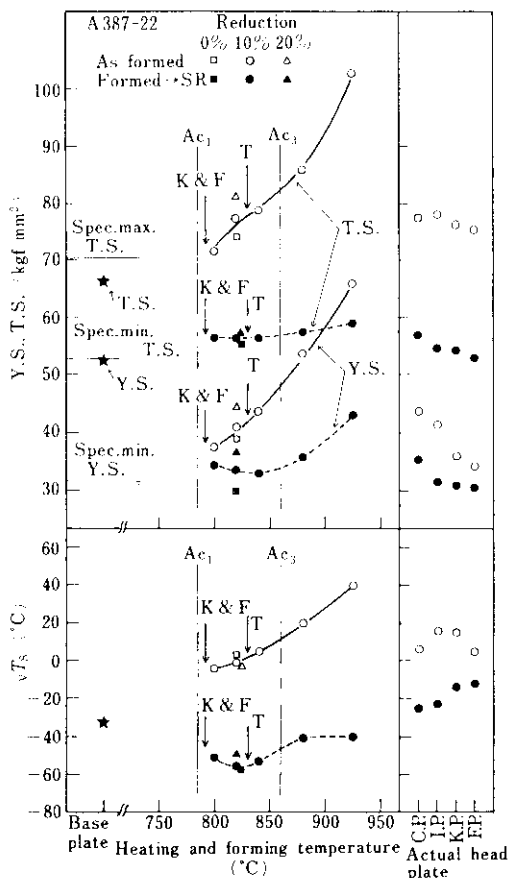


Fig. 23 Mechanical properties of the A387-22 steel specimens simulated to the hot spinning process as a function of heating and forming temperature³⁾

さは約10kgf/mm²低下し、降伏強さは約2kgf/mm²上昇する。加工量が10%の場合、それらは母材（N-T-SR）に比べそれぞれ約2kgf/mm²高い値を示す。また($\alpha + \gamma$) 2相域の中間温度において加工量0%すなわち熱サイクルのみを与えた場合は、加工量10%の場合に比べ降伏、引張強さとも2～3kgf/mm²低くなる。一方靱性は、加工のままの状態ではいずれの加熱・加工温度の場合も0°C以上の vTs を示すが、SRを行うと靱性は大きく改善され、いずれの加熱・加工温度の場合も0°C以下の vTs を示すようになる。詳述すると、SR後の靱性は加熱・加工温度がAc₃点以上(γ 域)の場合は母材と同等であり、Ac₁～Ac₃点間、すなわち($\alpha + \gamma$) 2相域の場合は、母材よりやや低い。

(2) A 387-22鋼

Fig. 23で明らかなように、A 387-12鋼と異なる

り、加工のままの強度は加熱・加工温度により大きく変化する。SR処理により強度は全般に低下し、加熱・加工温度の差異による強度差は軽減されるものの、降伏強さについてはなおかなり大きな差が残る。また加熱・加工温度が $(\alpha + \gamma)$ 2相域にある場合、SR後の降伏強さおよび引張強さは母材に比べて著しく低く、母材規格の下限近傍、あるいはそれさへ下廻る強度を示す。一方加工のままの状態での靱性は、加熱・加工温度が低いほど vT_m が低くなるものの、最もよい場合でもなおかなり低レベルにある。しかしSRを行うと、いずれの加熱・加工温度の場合も大幅に靱性が改善される。加熱・加工温度がともに $(\alpha + \gamma)$ 2相域にある場合にとくに高靱性を示すことは注目される。

A387-22鋼の場合は、Photo. 1で明らかなように組織的にかなり焼入性の高い鋼種のため、 γ 域から空冷した場合、ほとんど初析フェライトを析出せずベイナイト+マルテンサイトの混合組織を示すのに対し、加熱・加工温度を $(\alpha + \gamma)$ 2相域とした場合は、熱力学的にフェライトが安定となるため、加工後の組織がフェライト+ベイナイト+マルテンサイトの混合組織となる。そのため、 γ 域加工に比べ $(\alpha + \gamma)$ 2相域加工の方が強度が低く、 $(\alpha + \gamma)$ 2相域内では低温側ほど化学平衡的に生成するフェライト量が多くなるため、強度がより低くなるものと考えられる。また加熱前の組織がベイナイト+マルテンサイトの場合、 $(\alpha + \gamma)$ 2相域に加熱すると、非常に微細なフェライトおよびオーステナイトが分散分布した組織となるため、加工後の組織はかなり微細なフェライト+ベイナイト+マルテンサイトとなり、きわめて良好な靱性を示す²⁾。

一方A387-12鋼の場合は焼入性のないして高くない組成であり、Photo. 1に示すように、 γ 域から空冷した場合でも十分フェライトが析出するため、加熱・加工温度が γ 域から $(\alpha + \gamma)$ 2相域に変わってもA387-22鋼のような顕著な組織変化を示さない。 γ 域および $(\alpha + \gamma)$ 2相域加熱・加工材のいずれも、結晶粒度はわずかに異なるが、同様のフェライト+パーライト+ベイナイト組織を示す。したがって、加熱・加工温度の変化による強度変化は少ないといえる。しかし加熱・加工温度が $(\alpha + \gamma)$ 2相域の低温側の場合は、化学平

衡的に生成するフェライトが多く、それらが粒成長を起こすため、加工—SR後の靱性はやや低くなる。

以上のシミュレーション試験結果を鏡板試験結果と対比するにあたって、熱間スピニング加工により成形されたナックル部、フランジ部はもちろんのこと、冷間さばり加工により成形されたクラウン部、中間部についてもその後加熱炉で $(\alpha + \gamma)$ 2相域に加熱されているので、シミュレーション試験結果との対比が可能であると考ええる。

降伏強さおよび引張強さについて、鏡板試験データと、矢印で示した加熱・加工温度のシミュレーション試験データを対比させた場合、Fig. 22およびFig. 23に示すように、両者は比較的良好な一致を示す。シミュレーション試験における加工量の影響はたいして大きくないが、加工量10%および20%のデータより加工量0%すなわち熱サイクルのみ付与した場合の方が良い一致を示す。これは、シミュレーション試験では加熱と加工を分離し、所定の温度に加熱保持後、その温度できわめて短時間に加工を加えた後直ちに空冷しているため、加工硬化の影響が残り、一方、現実の鏡板のスピニング加工では、加熱しつつ鏡板を回転させてナックル部からフランジ部にかけて順次徐々に加工していく方式のため、各部分は加工中はもちろん加工後もその温度に加熱されていることになり、加工硬化はほとんど残らないことに起因すると思われる。

一方靱性について、鏡板試験データがシミュレーション試験データと強度の場合ほどよい対応を示していない理由については、上述の変形過程の差異等の観点から、今後討論すべき課題である。

5.2 $(\alpha + \gamma)$ 2相域成形鏡板の熱処理

5.2.1 熱間プレス加工鏡板

熱間プレス加工においては、 γ 域に鋼板を加熱し、鋼板温度が Ar_3 点に下がるまでの γ 域において加工を完了させるのが通常である。しかし、加熱炉より鋼板を搬出しプレス機にセットして加工を開始するまでに、板厚が薄い場合やセッティングに時間を要する場合には、鋼板温度が Ar_3 点以下となり、プレス加工を $(\alpha + \gamma)$ 2相域で実施せざる

を得ない場合が生じる。その場合の加工後の熱処理条件を、以下に検討する。

今回試験した3鋼種とも、加工後焼ならし-SRの熱処理を施せば材質上の問題はないが、加工後SRのみの熱処理でも、引張および衝撃特性のような基本的な機械的性質は3鋼種とも良好であり、部位によるその差も比較的小さいという結果が得られた。A387-22鋼のように高グレードの材料の場合は、加工後の焼ならし工程の省略にあたっては、今回調査した以外の材質特性(クリープ特性、焼もどし脆化特性など)や板厚効果の調査、および鏡板製造時の温度測定技術の向上、などの詰めが必要である。鏡板の品質向上と省エネルギーの観点からそれらを検討する価値は十分にあると考えられる。

5-2-2 熱間スピニング加工鏡板

熱間スピニング加工は、局部加熱で γ 域温度を確保するのが厚肉材ではとくに困難であること、 γ 域に加熱して加工するとスケールの発生量が多く表面性状が劣化することなどの点から、 $(\alpha + \gamma)$ 2相域で行われることが多い。

$(\alpha + \gamma)$ 2相域のほぼ中間部でスピニング加工を行った場合、A516-70鋼およびA387-12鋼は、加工後SRのみでも焼ならし-SR材と同等の良好な引張および衝撃特性を示した。この試験結果から、適切な温度管理を実施すれば、上記2鋼種は加工後の焼ならし省略の可能性が十分にあると考えられる。一方A387-22鋼の場合は、スピニング加工を $(\alpha + \gamma)$ 2相域で行った後の熱処理をSRのみとすると強度が著しく低く、規格値下限を下回る可能性が大きいので、加工後焼ならし-SRの熱処理を行うことが不可欠である。

6. 結 言

A516-70、A387-12およびA387-22鋼の鏡板の材質に及ぼす $(\alpha + \gamma)$ 2相域成形の影響を調べるため、板厚45mmの鋼板を用い、実物大試験体による鏡板加工試験およびシミュレーション試験を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) A516-70、A387-12、A387-22鋼のいずれも、 γ 域加熱後 $(\alpha + \gamma)$ 域でプレス加工を行った後の熱処理は、SRのみでも焼ならし-SR材と同等の良好な強度と靱性を得ることができる。
- (2) A516-70およびA387-12鋼は、適切な温度管理のもとに $(\alpha + \gamma)$ 2相域のほぼ中央部で加熱・スピニング加工を行えば、やはりSRのみで焼ならし-SR材と同等の良好な強度と靱性を得ることができる。
- (3) A387-22鋼を $(\alpha + \gamma)$ 2相域で加熱・スピニング加工した場合の熱処理は、SRのみでは強度が著しく低いため、焼ならし-SRが必要である。
 $(\alpha + \gamma)$ 2相域における成形の場合にも、その後の熱処理の簡略化(焼ならし処理の省略)の可能性が見いだされた。しかし、いずれの鋼種も板厚や母材特性に十分留意する必要がある、とくにA387-22鋼のような高グレードの材料の場合には、今回調べた基本的な材質特性以外の諸特性(クリープ、焼もどし脆性など)の調査や、溶接性の確認、および成形時の温度管理手法の一層の向上など施工面での詰め、等が必要である。省エネルギーの観点にたつてよりよい品質の熱間成形品を提供する立場から、それらの検討価値は十分にあると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 木村、織田、日納、古市、野島：住友重機械技報，26(1978)77，59
- 2) 石川、上田、大橋：鉄と鋼，64(1978)11，S772，S773
- 3) M. Ishikawa, S. Ueda and N. Ohashi: International Council for Pressure Vessel Technology, (1980) [London]; to be published