

ハイパー二相ステンレス鍛鋼製フランジの試作[†]

浦川博史*

1. 緒言

近年、石油、および、天然ガスの生産システムは、深海油田やシェールガスなどに代表されるように、高深度化とともに、より腐食性の強い環境に設置されるようになってきている。これらの配管部材の材料として、耐食性に優れた二相ステンレス鋼が開発され、年代を追う毎に改良材が開発されている。1990年代に登場した「スーパー二相ステンレス鋼」につづき、2010年代になると、更に耐食性に優れた「ハイパー二相ステンレス鋼」が開発された^{1), 2)}。この新材料は、チューブにおいては、既に実用に供されているが、フランジなどの鍛造製品に関しては、未だ開発段階である。

そこで、本研究では、Sandvik 社（スウェーデン）製のハイパー二相ステンレス鋼材を用いて、配管用鍛造フランジを試作り、熱間塑性加工の難易度を調査するとともに、熱処理後製品の耐食性や機械的特性を評価した。

2. ハイパー二相ステンレス鋼の特長

二相ステンレス鋼は、フェライト組織とオーステナイト組織の比率がほぼ 1:1 のステンレス鋼であり、二相混合の細粒組織によって高い強度を有するとともに、オーステナイト組織の持つ高靱性によって高い靱性を確保できる。

ハイパー二相ステンレス鋼は、二相ステンレス鋼のなかでも、耐食性の向上に特化して開発されたものであり、Cr を更に増量して耐食性の強化を図りつつ、オーステナイトフォーマーである N を増量して二相組織のバランスを維持するコンセプトに基づいている。

3. 二相ステンレス鋼の製造上の留意点

二相ステンレス鋼の製造においては、下記の点に留意する必要がある。

3.1 脆化温度域に対する管理

二相ステンレス鋼には、温度によって二つの脆化領域がある。ひとつは、800~900℃をピークとする炭窒化物、および、 σ 相の生成による脆化であり、いまひとつは、300~600℃の範囲で生じる「475℃脆性」と呼ばれるものである。いずれも、比較的短時間で生じるため、製造時の熱間成形や熱処理において、これらの温度域をできる限り速やかに通過させなければならない。したがって、鍛造などの熱間成形の温度は、最低でも 950℃以上、望ましくは 1000℃以上とすべきであり、熱間成形後ただちに急冷する必要がある。

3.2 変形能の確保

二相ステンレス鋼は、上述のように、強度が高いため、熱間の変形抵抗も大きい。特に、コーナー部などが局部的に温度降下すると変形能が低下して割れキズなどを生じ易いため、加熱炉から出炉した後は、できる限り、速やかに加工を終えることが望ましい。

3.3 切削加工能力

二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼などに比較して強度が高いだけでなく、冷間での加工硬化を生じ易いため、機械加工に対しては、難削材であり、十分な加工能力と適切な切削条件を選択する必要がある。

4. 試作品の選定

4.1 試作の目的

本研究の目的は、ハイパー二相ステンレス鋼の素材を用いて、実際の配管部材を想定した試作を実施して、下記についての知見を得ることである。

[†] 本稿は 2018 年 8 月 日本工業出版発行「配管技術」第 60 巻 9 号に掲載。（試作実施は 2014 年）

* 業務部 技術管理課 副主任

- (1) 熱間鍛造の難易度の調査.
- (2) 熱処理条件の確認.
- (3) 機械的性質などの特性の評価.
- (4) 機械加工における最適切削条件の調査.

4.2 使用材料

評価試験に使用する材料として、Sandvik 社よりハイパー二相ステンレス鋼 S33207 材 (32Cr-7Ni) のピレットを入手した。同鋼種の化学成分規格と入手材の化学成分を**第 1 表**に示す。

4.3 試作品の形状

試作するフランジ形状は、ASME B16.5 150lbs 10B WN RF SCH40 (外径 φ405mm×内径 φ254mm×全幅 102mm, 単重 24kg) を選択した。

5. 鍛造試験

5.1 変形能に関する予備試験

実大サイズの鍛造試作に先立って、変形能の観点から鍛造時の適正温度条件を知るための予備試験として、グリーブル試験を行った。同試験は高温での引張試験を行って絞り値を評価するもので、一般に、この試験による絞り値が70%以上であれば、鍛造成形において割れなどの問題は生じないとされている。

入手した鋼材から試験片を切り出し、加熱温度 3 条件 (1200℃, 1250℃, 1300℃), 引張試験温度 3 条件 (950℃, 1000℃, 1050℃), 歪速度 2 条件 (0.1/s, 1.0/s) で調査した。結果を**第 1 図**に示しており、試験温度が 950℃の場合は 70%

を確保できない場合があることが判った。そこで、鍛造中の温度は 1000℃以上を確保することを目標として鍛造を行うこととした。この温度設定は、前述の脆化温度を回避するためにも妥当と判断した。

5.2 油圧プレス鍛造

まず、1500ton 油圧プレスによる鍛造試作を行った。鋼材には、φ164mm のピレットを単重 58kg に切断した鋼片を用いた。

鋼片を加熱して平型で据え込み後、一旦再加熱した後、ハブ側を下にして成形する方法 (半型成形) で成形したが、加圧能力が不足して時間を要したため、鍛造終了温度は目標を大きく下回り、表面温度は 700℃以下にまで低下した。鍛造終了後、ただちに水冷した。**第 2 図**に鍛造後の外観を示す。ハブ部の端面に大きな欠肉があるが、これは、成形中にきれつを生じて、この部分が剥離した結果である。この他、表面に細かいきずが多数認められた。これらの欠陥は、温度低下による変形能の悪化によるものと思われる。

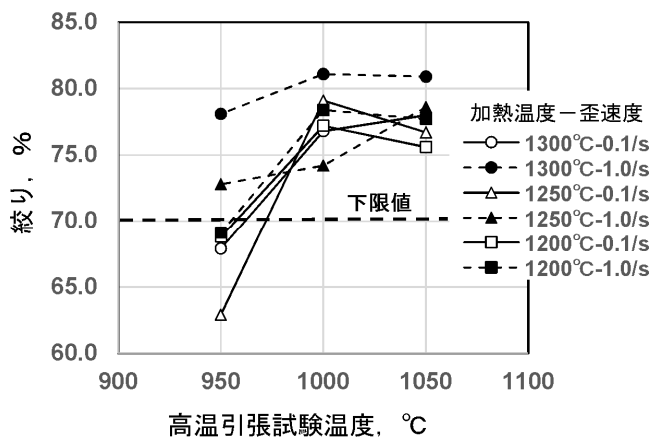
5.3 ハンマー鍛造

上記の 1500ton プレスでは、鍛造終了温度目標を達成できなかったため、5ton-m ハンマーによる鍛造試作を行った。鋼材には、プレス鍛造の場合と同じ重量の鋼片を用いた。

1250℃に加熱後、ハンマー成形を行った結果、順調に鍛造を完了することができ、鍛造終了温度は目標の 1000℃以上であった。鍛造後、ただちに水冷した。鍛造品の外観に欠陥は認められず、良好な表面品質が得られた。

第 1 表 ピレットの化学成分(%)

	UNS S33207		Sandvik社製 ピレット
	min.	max.	
C	—	0.03	0.014
Si	—	0.60	0.35
Mn	—	1.50	0.93
P	—	0.035	0.014
S	—	0.010	0.001
Cr	29.0	33.0	31.53
Ni	6.0	9.0	7.24
Mo	3.0	5.0	3.38
N	0.40	0.60	0.48



第 1 図 グリーブル試験結果



第2図 プレス鍛造品の外観

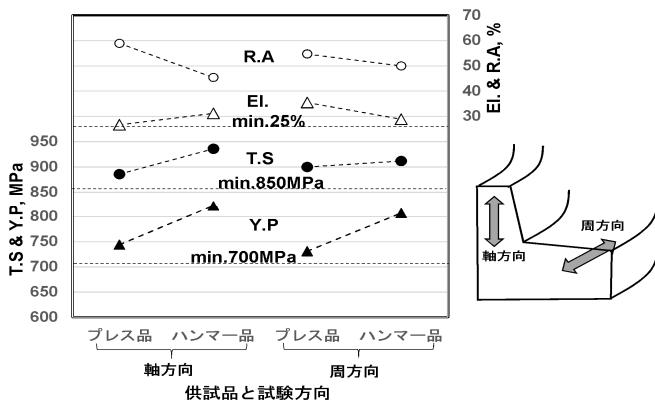
6. 熱処理後の特性調査結果

両鍛造品（以下、プレス品、ハンマー品と呼ぶ）に固溶化熱処理（1120℃×2h→水冷）を施工したのち、各種の特性調査を行った。

この材質に関しては、鍛造品の規格は未だ制定されていないが、チューブ用として ASTM A789 が制定されており、同規格では、常温引張試験、断面硬さ試験が規定されている。本調査では、これらの試験に加えて、腐食試験、衝撃試験（0℃、-25℃）、マクロ組織、および、ミクロ組織観察を行った。

6.1 常温引張試験

フランジ部円周方向とハブ部軸方向に試験片を採取し、常温引張試験を行った結果を第3図に示す。同図中の最小値は、同材のチューブに対する規定値を示している。両鍛造品ともに、いずれの規定値も満足しているが、ハンマー品は、プレス品に比較して、強度が高く、特に、耐力では顕著な差が認められる。



第3図 常温引張試験結果

6.2 断面硬さ試験

両鍛造品の断面硬さを、前出第3図の引張試験採取位置で測定した結果、プレス品は、フランジ部 HB272、ハブ部 HB277 に対し、ハンマー品は、フランジ部 HB282、ハブ部 HB288 であり、ハンマー品が若干硬さが高い傾向が認められた。なお、いずれの結果も、チューブ用の規定値である HB336 以下に対しては、問題ない範囲であった。

6.3 腐食試験

両鍛造品のフランジ部の同じ断面位置から、各2個の試験片を採取し、ASTM A923 Method-Cの規定にしたがって腐食試験を実施した。50℃の6%塩化第二鉄溶液中に24時間浸漬して減量を測定した結果を第2表に示す。本規格には、当材質についての規定はないが、規定されている材質（いずれも二相ステンレス鋼）に共通の規定値である 10mdd (mg/dm²/day) 以下に対し、いずれも合格している。ただし、プレス品の2個の結果は、同一条件での試験であるにもかかわらず、ばらつきを生じている。ハンマー品の結果は、いずれも規定上限値に対して 1/10 以下であった。

6.4 マクロ組織

プレス品の断面マクロ組織を、第4図に示す。この断面には、前述した剥離は生じていないが、角部の欠肉や表面の凹凸が認められ、また、ハブの角部や内径面に細かな割れ状のきずも認められる。ただし、いずれも、仕上形状には影響のない範囲である。一方、内部には巨視的な異常は認められない。

第5図は、ハンマー品のマクロ組織であり、完全拘束金型成形によって、良好な鍛造形状が得られている。内部の性状にも、異常は認められない。

第2表 腐食試験結果

鍛造方法	試験片	腐食率 (mdd ^(注1))	
ASTM A923 Method C		≤ 10	判定
プレス品	P1	< 1 ^(注2)	Good
	P2	6.15	Good
ハンマー品	H1	< 1	Good
	H2	< 1	Good
試験条件	・試料表面積: 0.52dm ² =52cm ² ・試験温度: 50℃ ・試験時間: 24時間		

(注1) mdd: mg/dm²/day

(注2) 腐食減量測定値 < 0.5mg (上限値: 5.2mg)

6.5 ミクロ組織

両鍛造品において、表面と内部のミクロ組織観察を行った。これらの結果のなかから、内部の観察点の組織写真を、第6図にプレス品を、第7図にハンマー品を示す。プレス品では大小の結晶粒が混在しているのに対して、ハンマー品は均一な細粒組織（粒度は概ね 5.5）である。なお、プレス品の極く表面で炭化物が認められたが、その他では、析出物は認められなかった。

6.6 衝撃試験

引張試験と同様の位置と方向で試験片を採取して、0℃と-25℃でのシャルピー衝撃試験（2mm-V）を実施して、両者を比較した。結果を第3表に示しており、前出第3図の引張試験結果と合わせて評価すると、軸方向において、ハンマー品はプレス品よりも強度が高いにも拘らず、0℃、-25℃いずれにおいても、吸収エネルギーがプレス品よりも大きな値を示しており、細粒の効果と考えられる。

7. 機械加工結果

上述したように、二相ステンレス鋼は、難削材であり、特に、過度な高速切削を行うと加工硬化を助長するため、基本的には「低速・高トルク」の加工を行うことが望ましい。そこで、当社の保有の高トルク加工機を用いて試加工を行った結果、表面粗さ Ra : 0.8μm 以下の良好な表面品質での仕上加工を行なうことができた。第8図に完成品の外観を示す。

第3表 シャルピー試験結果

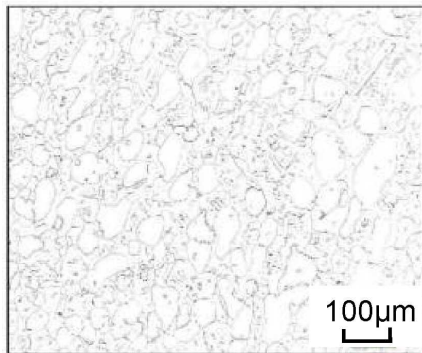
試験温度		0℃		-25℃	
		ind./ave.	ind.	ave.	ind.
ハブ部 軸方向	プレス品	21 21 27	23.0	8 9 10	9.0
	ハンマー品	31 33 39	34.3	9 11 12	10.7
フランジ部 周方向	プレス品	30 35 36	33.7	11 13 13	12.3
	ハンマー品	26 31 31	29.3	10 11 12	11.0



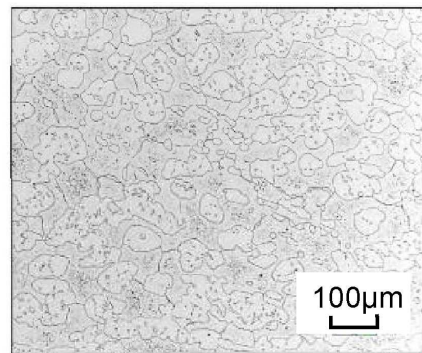
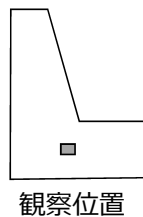
第4図 プレス品の断面マクロ組織



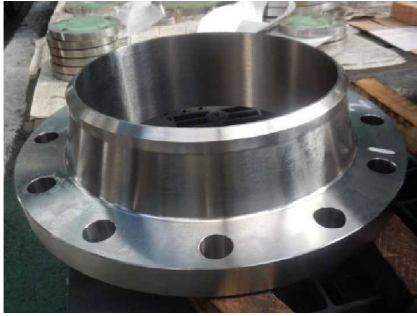
第5図 ハンマー品の断面マクロ組織



第6図 プレス品のミクロ組織



第7図 ハンマー品のミクロ組織



第8図 150lbs 10B WN フランジ完成品

8. まとめ

8.1 鍛造の難易度

鍛造終了温度が目標温度を下回ったプレス鍛造では大きな剥離や表面きずを生じた。一方、目標温度範囲内で鍛造できたハンマー鍛造では、支障なく成形を行なうことができた。したがって、成形温度管理を適正に行うことができれば、鍛造成形について大きな問題はないと言える。

8.2 熱処理後の特性

熱処理後の特性は、強度においても、耐食性においても、チューブ用規格 (ASTM A789, および, A923) の規定値を満足した。ただし、プレス品はハンマー品に比べて強度が低く、耐食性にばらつ

きが認められた。これは、プレス加圧力の不足に加えて温度降下により圧下量が減少し、塑性変形が内部まで十分に及ばなかった結果、内部組織が粗粒かつ不均一になったためと考えられる。

σ 相などの析出物については、熱処理後の断面内部では認められなかった。熱処理前の析出物の有無については調査できなかったが、仮に存在していたとしても、熱処理によって、固溶、消失した可能性がある。

8.3 切削性

機械加工については、低回転高トルクの加工条件で、良好な加工品質を得ることができた。

9. 結言

ハイパー二相ステンレス鋼は、比較的 low コストで、かつ、優れた耐食性を有する材料として、今後、適用が拡大することが期待される。その際に、配管を構成するフランジなどの配管部品の製造方法を確立することは、配管システム全体の成立のために不可欠である。今回の試作品は、比較的小サイズであるが、今後、更に、大サイズの製品の製法の確立にも取り組んでいく所存である。

最後に、本調査に際し、貴重な材料を供給いただいた、Sandvik 社のご協力に深謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 小川和博: 二相ステンレス鋼の発展と最近の動向, WE-COMマガジン, 第17号 (2015.7)
- (2) 二相ステンレス鋼加工マニュアル第2版2009, TMR Stainless (2009)