

# 討19

## 薄肉溶接チタン管の製造

(株)神戸製鋼所 中央研究所 西村 孝 ○宮本淳之  
 チタン本部 成田憲二  
 門司工場 沢久栄一郎

### 1. 緒 言

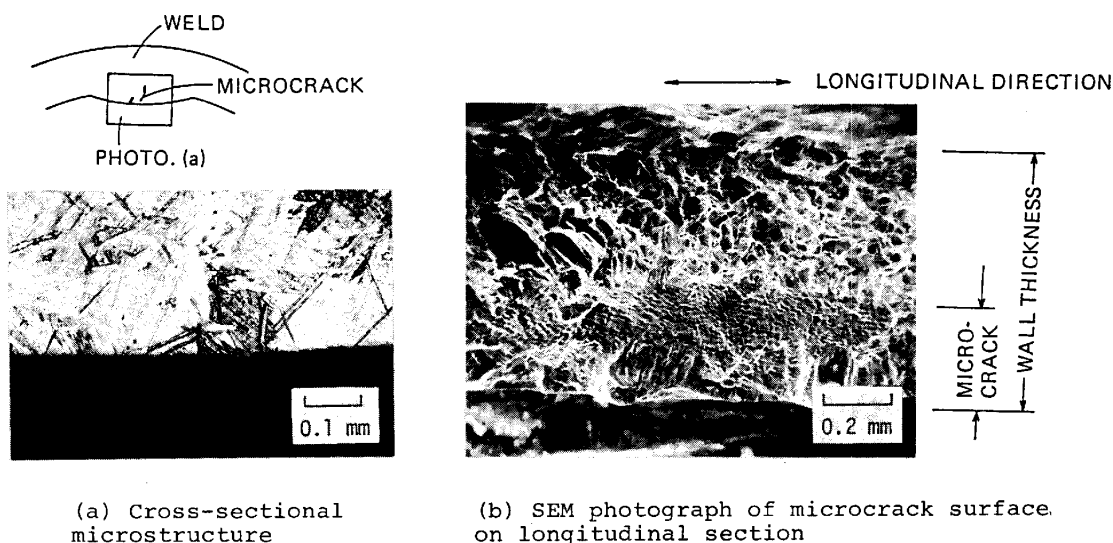
海水をはじめ各種腐食環境に対して優れた耐食性を有するチタン材料は、薄肉溶接管として火力および原子力発電所の復水器管や海水淡水化装置など各種装置の伝熱管として近年需要が急増している。これら溶接チタン管は通常10段前後のスタンドを有する造管ラインによりロール成形され、TIG溶接法によりシーム溶接して製造される。製造法自体はステンレス鋼その他の溶接管の場合と大差はないが、技術的には他の一般材料とは異なるチタン管特有の問題がある。

ひとつの特徴として、チタンはステンレス鋼などに比べてスプリングバックが大きく、それに起因する成形技術上の問題が比較的多い。なかでも溶接ビード部に発生するマイクロ欠陥が最も重大で特徴的な問題と思われる。この種のマイクロ欠陥は、溶接直後ビードが溶融状態のままスクイズロールから離れるため、そこに母材部のスプリングバックによる力が作用して発生するもので、造管速度が速くなる程発生し易くなる。著者らはこの種のマイクロ欠陥を防止して造管速度を向上させるため、以下に示すような温間成形法を開発した。ここでは本技術の特徴と実用化試験で得られた結果について述べる。

### 2. ミクロ欠陥の発生

伝熱管用チタン管の寸法はほとんどの場合外径が $19^f \sim 32^f$ mm、肉厚が $0.5^t \sim 0.7^t$ mmの範囲にある。これらチタン管を従来の造管方法で3m/minを越える速度で造管した場合、Fig. 1に示すようなマイクロ欠陥が内面ビードの中央に発生することがある。この種の欠陥は深さが0.1~0.3mm程度、表面はセル状の様相を呈している。

Fig. 1のようなSEM観察の結果をもとに、マイクロ欠陥が母材部のスプリングバックに起因する溶接割れの一つであると考え、マイクロ欠陥発生におよぼす素材のスプリングバックおよび造管速度の影響を詳



(a) Cross-sectional microstructure

(b) SEM photograph of microcrack surface on longitudinal section

Fig.1 Example of microcrack appeared at the center of weld bead of titanium tube( $31.75\phi \times 0.7^t$  mm, tube making speed; 4 m/min)

細に調査した。Fig. 2は、 $22\phi \times 0.7t$  mmチタン管を対象として、スプリングバックと造管速度を種々変化させて造管したチタン管のマイクロ欠陥発生状況を調べた結果である。本試験では成形中フィンパスロールの圧下量を変えることにより溶接直前にある素材（オープン管）のスプリングバック量を変化させ、オープン管のシーム開き量によりスプリングバックの大きさを評価した。

Fig. 2によれば、マイクロ欠陥の発生限界は造管速度とオープン管のシーム開き量に依存し、いずれの値も大きくなる程マイクロ欠陥が発生し易くなることが明らかである。また発生限界線の形状から、マイクロ欠陥は最悪の場合  $3\text{ m/min}$  の造管速度でも発生するが、何らかの方法でスプリングバックを抑えれば、 $7\text{ m/min}$  あるいはそれ以上の造管速度でもマイクロ欠陥が防止できることも明らかである。従来法では主にフィンパスロールの圧下を強くすることによりスプリングバックを抑え、マイクロ欠陥の発生を防止してきた。しかしながら実生産においては銅合金製フィンパスロールの摩耗の問題があり<sup>1)</sup>、経時的に圧下が働かなくなってマイクロ欠陥が発生してくるため、経験的に  $3 \sim 3.5\text{ m/min}$  が量産時の限界の造管速度となっていた。

温間成形法は以上のような従来法の問題点を解決するもので、スプリングバック量を安定してマイクロ欠陥発生限界内まで減少させることにより、従来以上のスピードアップが可能となった。

### 3. 温間成形法の概要

Fig. 3に温間成形法の概要を示す。本プロセスでは、従来の造管ラインの最終フィンパスロール直前にトンネル型の赤外線加熱炉を設置した。この加熱炉により、ほぼ円筒形に近い状態まで成形されたチタン素材（オープン管）をオンライン加熱し、炉直後の最終フィンパスロールでいわゆる温間成形を行う。温間成形用ロールの孔型形状は、成形後のオープン管のシーム開き量をなるべく小さくするよう最も効果的な真円形とした。

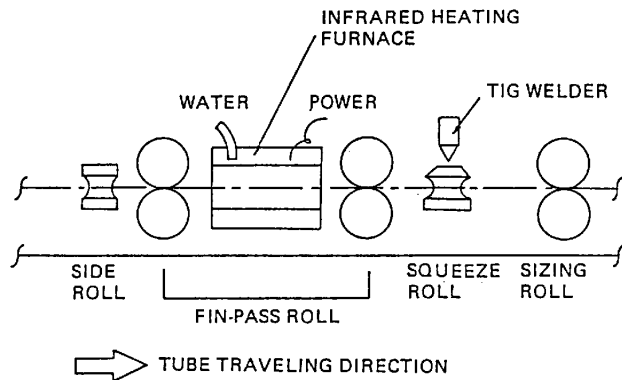


Fig.3 Schematic representation of developed hot forming process

### 4. 温間成形法の成果

#### 4-1. ミクロ欠陥防止効果

一定のロール設定条件で温間成形を行った場合、成形温度の上昇に伴ってオープン管のシーム開き量がFig. 4のように変化する。Fig. 5は成形温度とオープンシーム開き量の関係を図示したものである。温間成形用ロールでの円周方向圧下（外径絞り）の有無によらず、温度の上昇とともにオープンシーム開き量は大幅に減少する。例えば、 $250^\circ\text{C}$ での温間成形を行えば、外径絞りなしの場合でもオープンシーム開き量は室温の  $7\text{ mm}$  から約  $3\text{ mm}$  まで減少する。この結果をFig. 2と対比させれば、マイクロ欠陥が発生しない限界の造管速度は  $3\text{ m/min}$  以下から  $8\text{ m/min}$  以上にまで向上することになり、温間成形

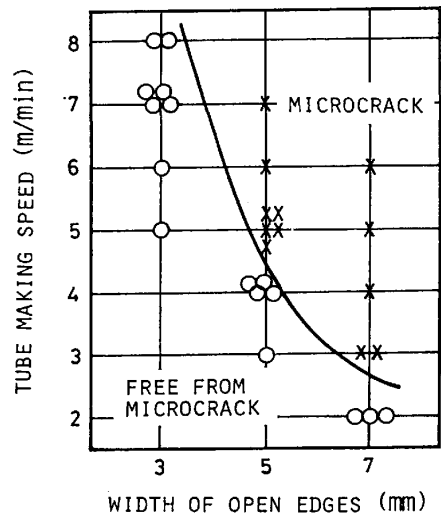


Fig.2 Influence of tube making speed and springback of open tube on microcrack occurrence ( $22\phi \times 0.7t$  mm titanium tube)

のマイクロ欠陥防止効果は極めて大きいことがわかる。

Fig. 6は造管速度と成形温度を変化させて造管したチタン管のマイクロ欠陥発生状況を調査した結果である。データはフィンパスロールあるいは温間成形用ロールで外径絞りを与えない条件で成形したものに限ったため、図中のマイクロ欠陥発生限界は、前述のような経時的なロール摩耗の影響を受けることなく安定してマイクロ欠陥を防止できる臨界の条件を与えている。Fig. 6より明らかなように、加熱温度の下限は造管速度とともに上昇するが、 $22\phi \times 0.7t$  mmの場合は少なくとも $200^{\circ}\text{C}$ の温度に加熱して成形すればマイクロ欠陥は $7\text{m}/\text{min}$ の速度まで発生しない。また、 $400^{\circ}\text{C}$ 以上の温度で温間成形を行なうとチタン管表面に酸化着色が発生するため、加熱温度は $400^{\circ}\text{C}$ 未満にする必要がある。寸法の異なるチタン管について同様な試験検討を行った結果、管外径が小さく肉厚が厚いチタン管ほどマイクロ欠陥が発生し易く、したがってより高温での成形が必要ということが明らかとなっており、寸法に応じた温度設定により成形を行っている。

#### 4-2. 温間成形法の適用

温間成形法を適用すれば $7\text{m}/\text{min}$ を越える温度までマイクロ欠陥は防止できる。しかしながら本プロセスを実生産に適用してスピードアップをはかる場合、現状の溶接法では造管速度とともにビード断面形状が悪化するという問題がある。形状悪化は $7\text{m}/\text{min}$ の造管速度で顕著となり、ビード品質や歩留りを考慮すれば、現状溶接法では $5\text{m}/\text{min}$ が限度と考えられる。温間成形法はさらに高速までマイクロ欠陥を防止できるため、新溶接法を開発し併用すれば、 $5\text{m}/\text{min}$ を越える高速化も可能である。

温間成形法の実用化試験においては、従来法よりも高速 ( $5\text{m}/\text{min}$ )で造管したチタン管の品質および性質を詳細に調査した。調査項目は、通常の検査ラインでの品質検査はもちろんのこと、引張試験、寸法検査、残留応力測定、ビード形状測定、硬度測定、マイクロ組織観察、ビード部の化学分析、内圧疲労試験など多岐に渡ったが、いずれの項目についても温間成形材の問題点は認められず、従来材と比較して品質的には全く差のないことを確認した。一例として、引張性質と内圧疲労特性の温間成形材と従来材の比較をそれぞれ

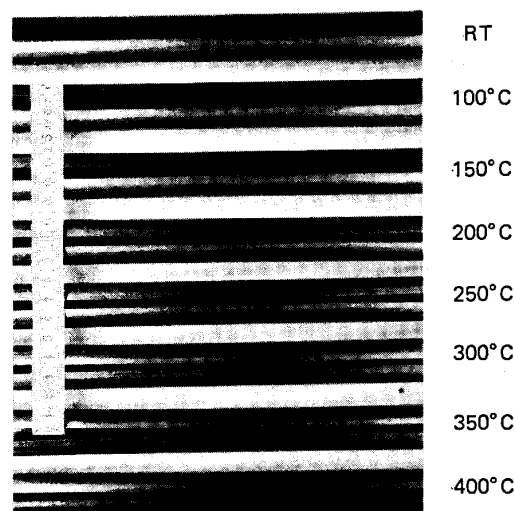


Fig. 4 Appearance of open tubes formed at various temperatures ( $22\phi \times 0.7t$  mm)

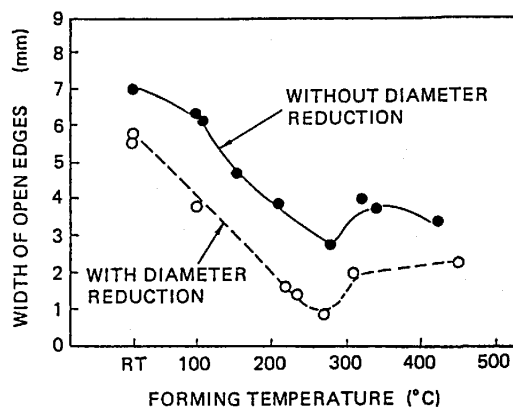


Fig. 5 Effects of forming temperature and diameter reduction at hot forming roll on width of open edges ( $22\phi \times 0.7t$  mm)

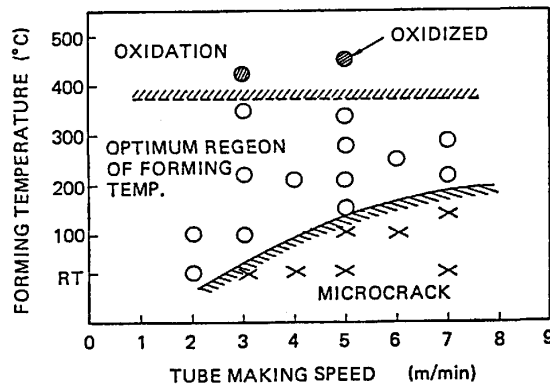


Fig. 6 Optimum region of forming temperature free from microcrack as well as oxidation ( $22\phi \times 0.7t$  mm)

Fig. 7および8に示す。また、温間成形材のビード部の酸素分析結果を Table 1 に示す。

5. 結 言

チタンの大きなスプリングバックに起因して発生するビード中央部マイクロ欠陥の問題を重点的にとりあげ、それを防止して造管速度を向上させるために開発した温間成形法について述べてきた。温間成形法の適用により造管速度は従来の3~3.5m/minから約5m/minに向上した。また、温間成形法を適用すれば、従来法のようにフィンパスロールでの圧下を強くする必要がなくなるため、銅合金ロールの摩耗軽減にも貢献した。

将来、薄肉溶接チタン管は単位長さ当たりのコストを低減させるためさらに薄肉化が進む方向にあり、一方では、より耐食性の優れたTi-0.3Mo-0.8Ni合金管 (ASTM B338 Grade 12) をはじめとして、純チタンに比べて高強度の合金チタン管の需要も伸びるものと予想される。これら溶接管ではスプリングバックがさらに大きくなり成形も困難になることから、温間成形法の適用も含めた製造技術の検討が必要である。

参考文献

- 1) 宮本他, 昭和58年度塑性加工春季講演会論文集, P. 77 (1983)

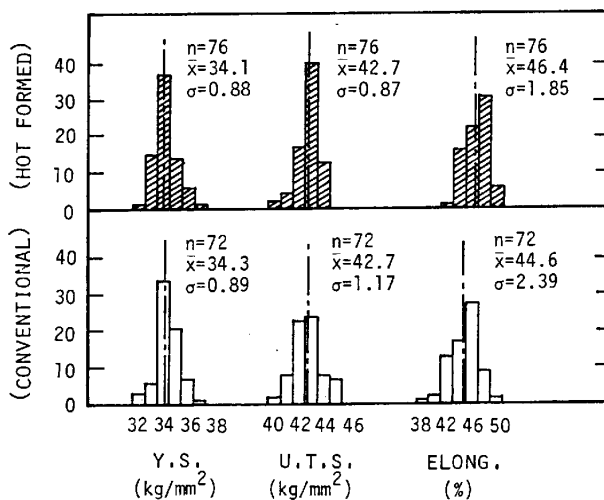


Fig.7 Histograms of tensile properties for titanium tubes produced in hot forming and conventional processes

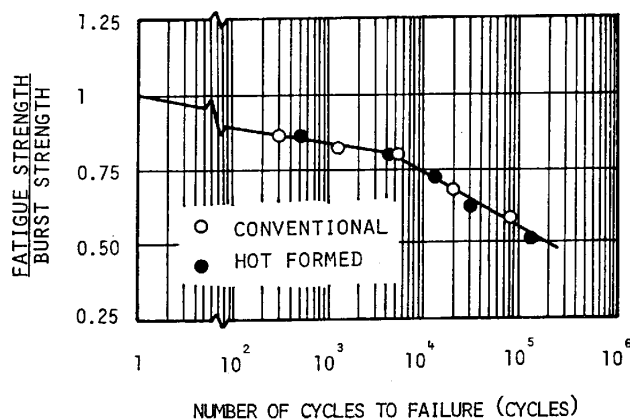


Fig.8 Fatigue property under internal pressure for titanium tubes produced in hot forming and conventional processes

Table 1 Oxygen analysis of weld bead of titanium tubes produced in hot forming process

SPECIMEN NO.	FORMING CONDITIONS		SAMPLE POSITION	OXYGEN ANALYSIS (ppm)
	SPEED (m/min)	TEMPERATURE (°C)		
1	5	RT	BASE METAL	1,130
1	"	"	WELD	1,290
2	7	"	"	1,170
3	3	450	"	1,210
4	5	270	"	1,090
5	7	220	"	1,170