

Cu 入り 18-8 型ステンレス鋼の熱間加工割れにおよぼす 化学成分ならびに δ -フェライトの影響について*

70624

清水 敏治**・高橋 市朗**・平田 洋八**・吉田 毅**

Influence of Chemical Composition and δ -ferrite on Hot-Cracking in Cu Bearing 18-8 Stainless Steel

Toshiji SHIMIZU, Ichiro TAKAHASHI,
Yohachi HIRATA, and Takeshi YOSHIDA

Synopsis:

Cu bearing 18-8 stainless steels are well known to be liable to cracks by hot working. In order to investigate the effects of chemical composition and metal structure on the hot cracking, hot upsetting tests were carried out.

The results are summarized as follows.

- (1) Many cracks were found above 4% of copper content, but a few cracks, below 4%.
- (2) In the case of 2% of copper content, cracks tended to decrease with the decrease of chromium content and the increase of nickel content.
- (3) Cracks propagated mainly along δ -ferrite, and cracking tendencies were estimated by Ni-balance and the amount of δ -ferrite in the as-cast state.

(Received Mar. 31, 1970)

1. 緒 言

Cu 入り 18-8 型ステンレス鋼は通常の 18-8 ステンレス鋼である SUS 27 よりも Cr および Ni 含有量を低め、Cu を含有せる組成を有するものであり、筆者らもすでに報告しているように¹⁾、プレス成形性が SUS 27 よりもはるかにすぐれている。また、Ni 含有量が少ないことから、Ni 原料節減の意味でも SUS 27 代替鋼として有望視される鋼種である。

しかしながら、この鋼種は SUS 27 に比べると熱間加工性がかなり劣り、とくに、鍛造や分塊圧延などで割れを発生することがしばしばあつて、生産性という面からは SUS 27 に比肩できない。この原因については、THIELSCH²⁾ が述べているように、Cu の粒界液化脆化が熱間加工時の割れを惹起していることも予想される。

そこで、本研究はこの熱間加工性、なかんずく、鍛造や分塊圧延時に起こる割れの原因を化学組成や金属組織的な面から追求することを目的として実験室的な研究を行なつたものである。

熱間加工性評価の方法には、熱間曲げ試験、熱間圧縮試験などの定性的な評価の仕方と、熱間引張試験、熱間振り試験などの定量的な方法があるが、今日ではもつぱら後者の方法が行なわれ、なかでも熱間振り試験が熱間

加工性評価の方法としてもつともすぐれているものとされている。

熱間振り試験は、間瀬³⁾が指摘しているように、微妙な差異を定量的に求めうるといふ点では確かに有力な方法と考えられる。しかしながら、複雑な圧延理論を要する場合を除いて、単に鍛造や分塊圧延における割れを冶金学的に研究するためには、熱間圧縮試験で十分間に合うこともある。したがつて、本研究では研究の目的から考えて、熱間加工性の評価には圧縮試験の一種である落重式鍛造試験法^{4)~7)}を採用した。

2. 実験方法

2.1 供試料

供試料には 37 kVA 高周波炉で溶製した 10 kg 角型鋼塊を用いた。化学組成は、C=0.05%、Si=0.5%、P \leq 0.030%、S \leq 0.010% とし、Cu、Cr、Ni、および Mn 含有量をそれぞれ Table 1 のように変化させた。すなわち、“Cu シリーズ”とは Cr=17.5%、Ni=6.5%、Mn=2% とし、Cu 含有量のみを 0~6.5% の範囲で変化させたシリーズであり、“Cr シリーズ”とは Cr 含有

* 昭和44年10月本会講演大会にて発表
昭和45年3月31日 受付

** 日本ステンレス(株)直江津製造所

Table 1. Chemical compositions on the experimental series.

Series	Composition
Cu series	17.5%Cr-6.5%Ni-2%Mn-(0~6.5)%Cu
Cr series	(16.5~18.5)%Cr-6.5%Ni-2%Mn-2%Cu
Ni series	17.5%Cr-(6.0~8.0)%Ni-2%Mn-2%Cu 16.5%Cr-(6.0~8.0)%Ni-2%Mn-2%Cu
Mu Series	17.5%Cr-6.5%Ni-(1.0~5.0)%Mn-2%Cu 16.5%Cr-6.5%Ni-(1.0~5.0)%Mn-2%Cu

量のみを 16.0~18.0% の範囲で変化させたものである。以下、他のシリーズについても同様である。

2.2 落重式鍛造試験法

本実験に用いた落重式鍛造試験の方法は、重量 40 kg の錘を 1 m の高さにフックで吊し、金敷上に試験片を置くと同時にフックをはずし、錘を自然落下させて試料を圧縮変形する方法である。

試験片の形状および寸法は種々のものが考えられるが^{4)~7)}、本実験には鋼塊から削り出した 13 mmφ×15 mm の円柱状試験片がもつとも適していたのでこれを採用した。

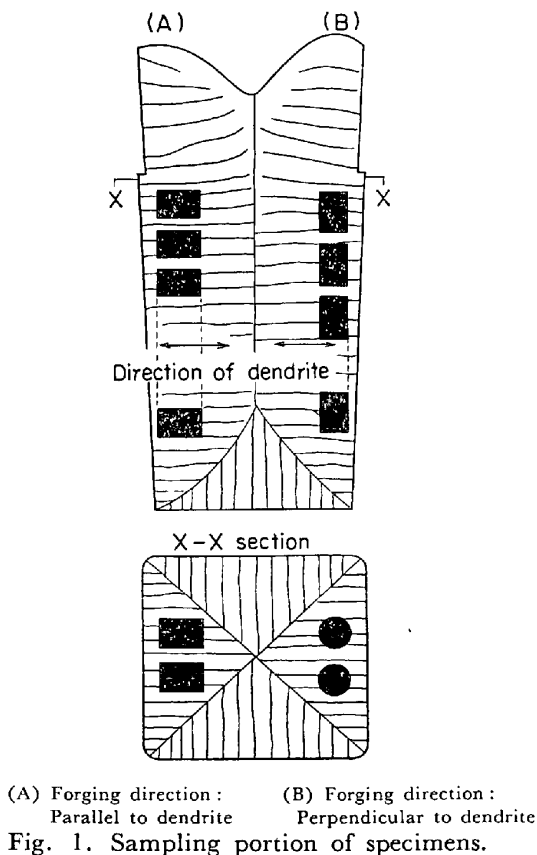
また、試験片の採取位置については、Fig. 1 (A) のように鋼塊の柱状晶の発達方向と平行に削り出した場合と Fig. 1 (B) のように直角の場合とは割れ発生

の異なり、Photo. 1 に示したように、Fig. 1 (B) の場合には全く割れないことが多いので、本実験では Fig. 1 (A) のように試験片を採取した。

試験片の加熱はアルゴン雰囲気中のシリコニット炉で行ない、加熱時間は 30 min とし、加熱温度は 1200°C、1250°C および 1300°C の 3 水準にて行なつた。また、圧下率は 30%、40% および 50% の 3 種類とした。

2.3 割れ程度の評価

鍛造圧縮後の試験片は酸洗し、側面に発生した割れの程度を測定した。割れの程度は、まったく割れていないものを index=0 とし、完全に上下に貫通する程度の割れを index=4 とし、この間を 5 等級に分け、一点の測定値は繰り返し 4 回の試験の平均 index をもって表示し、これを“割れ指数”と呼称して、結果の解析を便な



(A) Forging direction : Parallel to dendrite



(B) Forging direction : Perpendicular to dendrite
 Photo. 1. Appearances of cracks after forging.
 Heating temp. : 1300°C

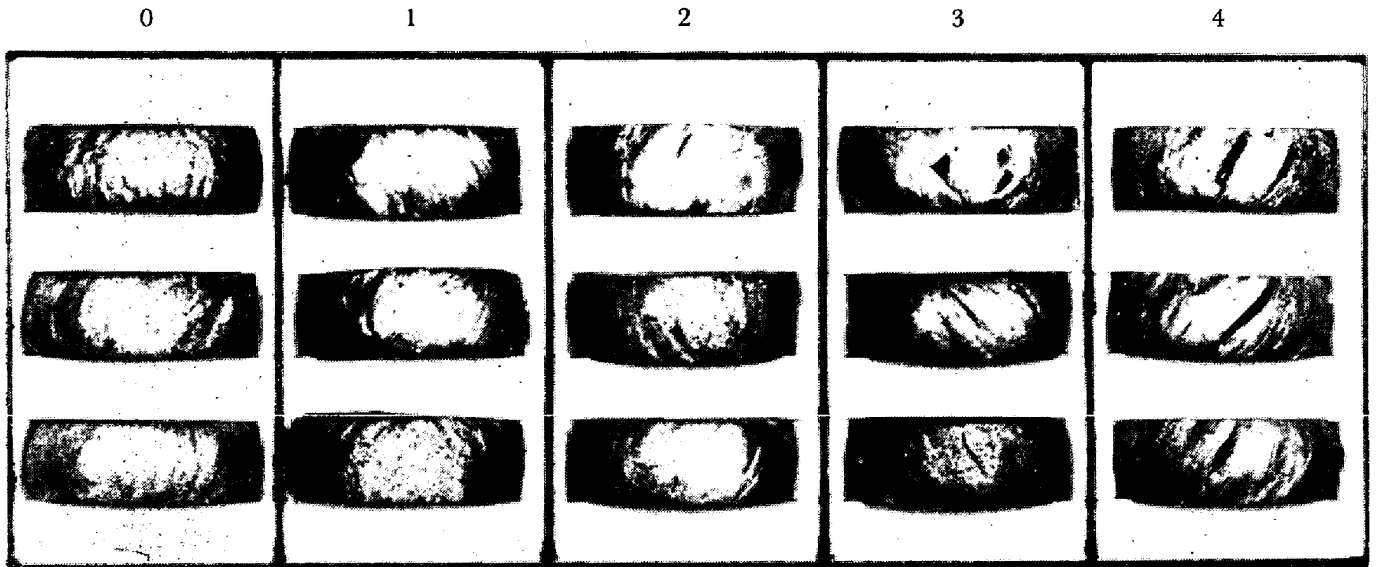


Photo. 2. Crack index.

らしめた。

Photo. 2 は割れの程度と index の関係を示したものである。

2.4 フェライト量の測定

上述した円柱試験片を用い、鑄込みのままの状態および 1200°C, 1250°C, 1300°C の各温度に 30 min 加熱した状態のそれぞれについて点算法 (視野数=10) によりフェライト量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 割れ発生傾向に及ぼす化学成分の影響

二始めに Cu 含有量の影響についてであるが、Fig. 2 は

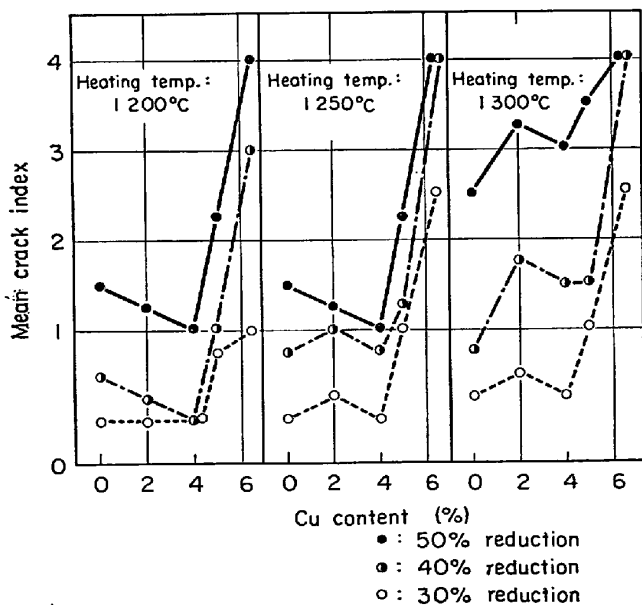


Fig. 2. Effect of Cu-content on crack index of 17.5%Cr-6.5%Ni-2%Mn alloy.

Cu シリーズについて得られた結果であり、横軸に Cu 含有量を、縦軸には割れ指数をとつて各加熱温度、各圧下率について示したものである。図から明らかなように、Cu 含有量が 4% 以上になると、どの加熱温度、どの圧下率でも極端に割れが発生しやすい傾向を示している。

また、Cu を 4% 以上含有する試料中には、Photo. 3 に一例を示したように、遊離 Cu の析出が認められるものがあり、遊離 Cu 析出量は、地金中の含有量が増大するほど多くなっているが、Cu が 4% 以下の試料中には光学顕微鏡で観察されるかぎりでは Cu 析出をまったく認めることができなく、しかも、これらの状況は鑄込みのままでも、また、加熱後においてもほとんど変わっていない。

したがって、Cu 含有量が 4% 以上で極端に割れやすくなるのは析出している Cu の影響がかなり大きいもの



Photo. 3. Photomicrograph of precipitated Cu in as-cast state of 17.5%Cr-6.5%Ni-2%Mn-6%Cu alloy.

と考えられる。

このように Cu が 4% 以上で Cu の影響がかなり大きいと考えられるので、以下に述べる Cr, Ni および Mn の各シリーズでは, Cu の影響が少ないと考えられる Cu=2% に定めて各成分の影響を求めた。

Fig. 3 は Cr シリーズについて求めた結果であり, Cr 含有量と割れ指数の関係を示したものである。図から明らかかなように, Cr 含有量は少ないほど割れ難くなり, Cr=16.0% ではほとんど割れなくなっている。

Fig. 4 および 5 は Ni 含有量の影響を示したものであり, Fig. 4 は Cr=17.5% の場合を, また, Fig. 5 はこ

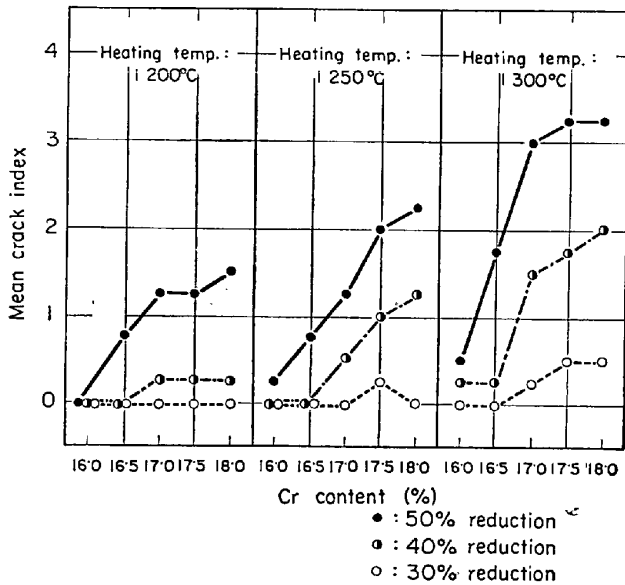


Fig. 3. Effect of Cr-content on crack index of 6.5%Ni-2%Mn-2%Cu alloy.

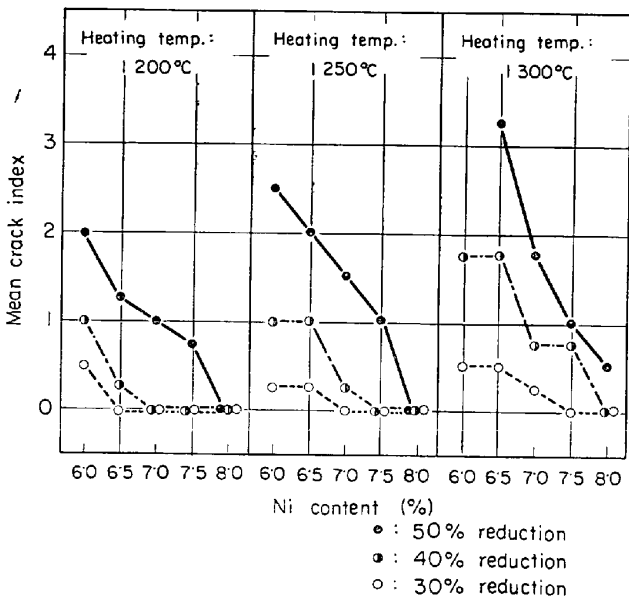


Fig. 4. Effect of Ni-content on crack index of 17.5%Cr-2%Mn-2%Cu alloy.

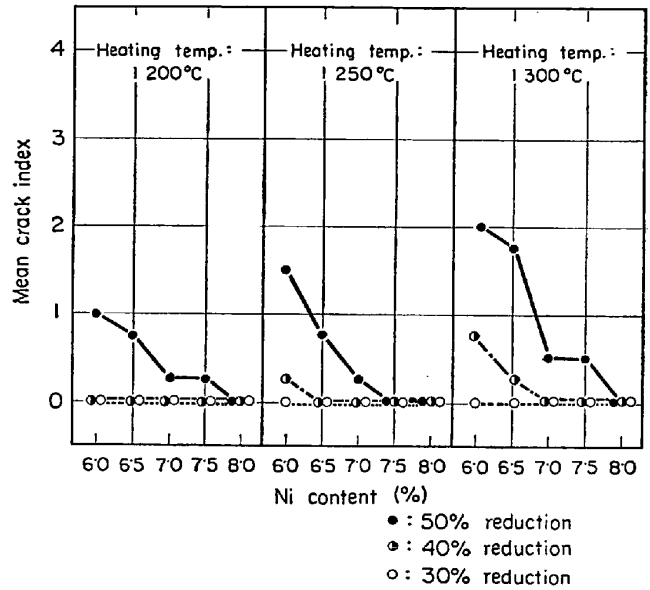


Fig. 5. Effect of Ni-content on crack index of 16.5%Cr-2%Mn-2%Cu alloy.

れより Cr 含有量を低め, Cr=16.5% とした場合の実験結果である。図から明らかかなように, いずれの Cr 含有量でも Ni 含有量の増加とともに割れ指数は低下し, 割れ難くなる傾向にある。また, Cr=17.5% の場合と, Cr=16.5% の場合を比較すると, 明らかに Cr=16.5% のほうがどの圧下率, どの加熱温度でも割れ指数は Cr=17.5% のときよりも下にあり, Cr 含有量を低め Ni 含有量が高めることにより割れという観点から見た熱間加工性は非常に向上することがわかる。

Fig. 6 および 7 はそれぞれ Cr=17.5% と Cr=16.5% の場合の Mn 含有量の影響を示したものであり, Cr=

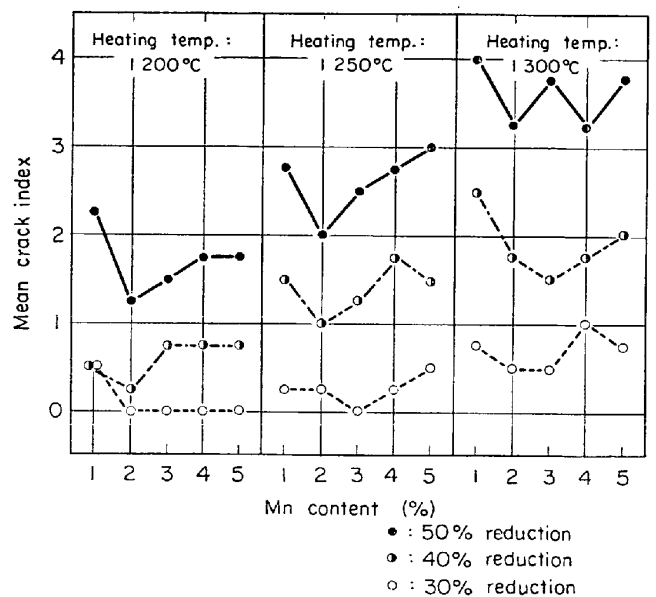


Fig. 6. Effect of Mn-content on crack index of 17.5%Cr-6.5%Ni-2%Cu alloy.

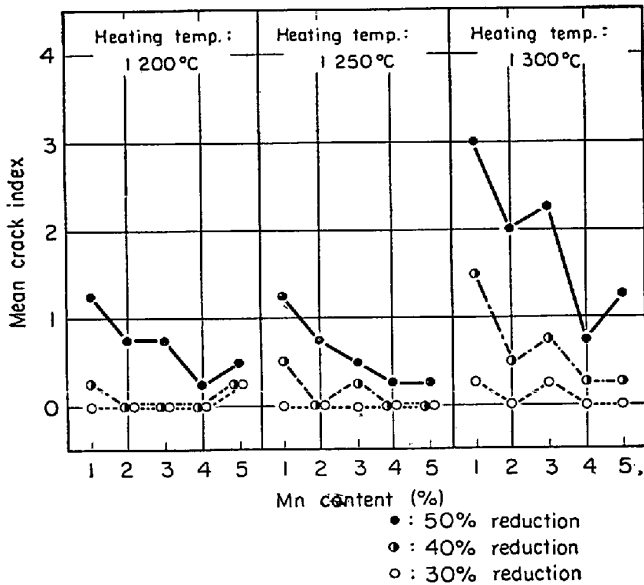


Fig. 7. Effect of Mn-content on crack index of 16.5%Cr-6.5%Ni-2%Cu alloy.

17.5% の場合は Mn 含有量と割れ指数との関係はほとんど見出すことができなく、いずれの Mn 含有量でもかなり指数が大きくて割れやすいことがわかる。一方、Cr 含有量を低め、Cr=16.5% とした場合は、一、二の不規則な点もあるが、全体としてみれば、Mn 含有量の増大とともにかなり割れ難くなる傾向を示している。すなわち、Mn 含有量の増大は低 Cr 含有量の場合には明らかに割れ防止に効果を示すが、高 Cr 含有量の場合には割れ防止の改善に全く寄与しないものであるといえる。

3.2 化学組成上の割れ発生領域

上述では、Cu, Cr, Ni, Mn 個々の元素と割れ発生傾向の関係を調べてきたのであるが、ここで、Cu シリーズについては除いて、他の Cr, Ni, Mn シリーズの結果をまとめて、化学組成上から見た割れ発生の領域を示すことにする。

Fig. 8 は Mn 含有量をほぼ 2% とした場合の Cr, Ni 含有量の組み合わせと割れの発生・不発生の関係を示したものである。また、同様に、Fig. 9 は Ni 含有量をほぼ 6.5% とした場合の Cr, Mn 含有量の組み合わせとの関係を示したものである。なお、Fig. 8 中には割れの発生一不発生の境界を実線で示した。

Cr, Ni 含有量と割れ発生領域の関係についてみると、圧下率 40% を例にとると、Cr=17.5% では、1200°C 加熱で Ni \geq 6.5%, 1250°C 加熱で Ni \geq 7.0%, 1300°C 加熱で Ni \geq 7.5% の Ni 含有量がなければ割れを発生し、また、もし Ni=6.5% とするならば、1200°C 加熱で Cr \leq 17.5%, 1250°C 加熱で Cr \leq 17.0%, 1300°C

Heating temp.	Red %	1200°C					1250°C					1300°C				
		Ni Cr %	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	6.0	6.5	7.0	7.5
30	18.0															
	17.5	Δ	○	○	○	○	Δ	Δ	○	○	○	Δ	Δ	Δ	○	○
	17.0		○					○				Δ	Δ			
	16.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	16.0	○					○					○				
40	18.0		Δ					X					X			
	17.5	X	Δ	○	○	○	X	X	Δ	○	○	X	X	Δ	Δ	○
	17.0		Δ					Δ					X			
	16.5	○	○	○	○	○	Δ	○	○	○	○	Δ	Δ	○	○	○
	16.0	○					○					Δ				
50	18.0		X					X					X			
	17.5	X	X	X	Δ	○	X	X	X	X	○	X	X	X	X	Δ
	17.0		X					X					X			
	16.5	X	Δ	Δ	○	○	X	Δ	Δ	○	○	X	X	Δ	Δ	○
	16.0		○					Δ					Δ			

○ : No cracks (Mean crack index = 0)
 Δ : Cracked (Mean crack index = 0.25 ~ 0.75)
 X : Marked cracks (Mean crack index > 1)

Fig. 8. Summaries of the crack initiation regions with the contents of Cr and Ni, at the constant Mn content of about 2%.

Heating temp.	Red. %	1200°C					1250°C					1300°C				
		Mn Cr %	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
30	18.0															
	17.5	Δ	○	○	○	○	Δ	Δ	○	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	X	Δ
	17.0		○					○					Δ			
	16.5	○	○	○	○	Δ	○	○	○	○	Δ	Δ	○	Δ	○	○
	16.0	○					○					○				
40	18.0		Δ					X					X			
	17.5	○	Δ	Δ	Δ	Δ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	17.0		Δ					Δ					X			
	16.5	Δ	○	○	○	Δ	Δ	○	Δ	○	○	X	Δ	X	X	Δ
	16.0		Δ					○					Δ			
50	18.0		X					X					X			
	17.5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	17.0		X					X					X			
	16.5	X	Δ	Δ	Δ	Δ	X	Δ	Δ	Δ	Δ	X	X	X	Δ	X
	16.0		○					Δ					Δ			

○ : No cracks (Mean crack index = 0)
 Δ : Cracked (Mean crack index = 0.25 ~ 0.75)
 X : Marked cracks (Mean crack index > 1)

Fig. 9. Summaries of the crack initiation regions with the contents of Cr and Mn, at the constant Ni content of 6.5%.

加熱で Cr \leq 16.5% としなければ分塊圧延や鍛造などの熱間加工時に割れる恐れがあることを示している。すなわち、一定量 Cr では Ni 含有量を多くするほど、高温側の加工割れ防止に役立ち、Ni 含有量の少ないほど割れの発生を避けるためには加工温度を下げなければならぬことがわかる。

したがって、実操業では、加熱温度と初期の圧下率をいかにするかによつて Cr と Ni 含有量の適当なる組み合わせを選ぶ必要があり、もし Cr, Ni 含有量が厳しく制限されるなら、生産性のある程度犠牲にしてもできるだけ低温加熱の熱間加工を行なうことが望ましい。また、生産性向上のために高温度での熱間加工を必要とする場合は、Ni 含有量を増大させるか、Cr 含有量を低下させるかの処置をとらざるを得なく、Ni 含有量を増すことは本鋼種の Ni 節減の主旨に沿わないことになり、高温度で割れずに加工するためには、必然的に Cr 含有量をできるだけ低下させるということにならざるを得ないものと考えられる。

つぎに、Cr, Mn 含有量と割れ発生領域の関係であるが Fig. 9 においては、さきの Cr-Ni の場合 (Fig. 8) のようには明らかな境界線を引くことができない。このことは、割れ抑止に対して Mn は Ni ほど顕著に効果を示さないことを示しており、本鋼種に関しては、いたずらに Mn 含有量を増大させる必要はないものと考えられる。ただ、Fig. 9 では明りように表示されなかつたが、さきの Fig. 7 にて説明したように、低 Cr 含有量側では Mn の効果を認めることができるので、この場合にかぎり含有量を増大させたほうが割れ抑止に効果があるように考えられる。

3.3 割れの顕微鏡観察結果

これまでの、主として化学組成上から割れとの関係を調べたのであるが、ここで、割れの直接的な原因をミクロ的に観察した結果について述べる。

落重試験によつて圧縮変形した後の試験片は Fig. 10 (a) のようになつており、これを中央から切断して Fig. 10(b) に示した切断面に存在する割れを光学顕微

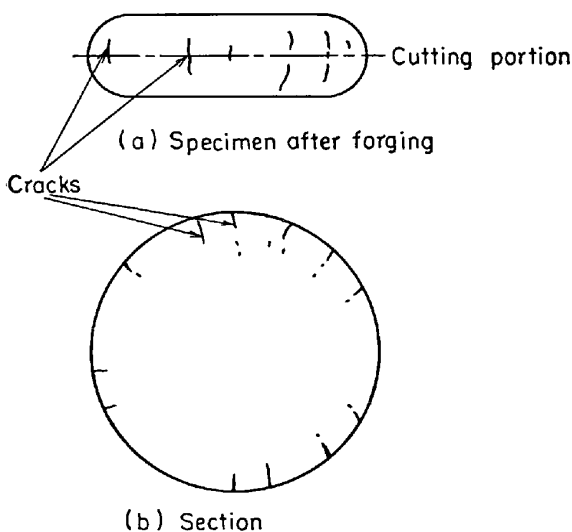


Fig. 10. Sketch of cracks on the specimen.

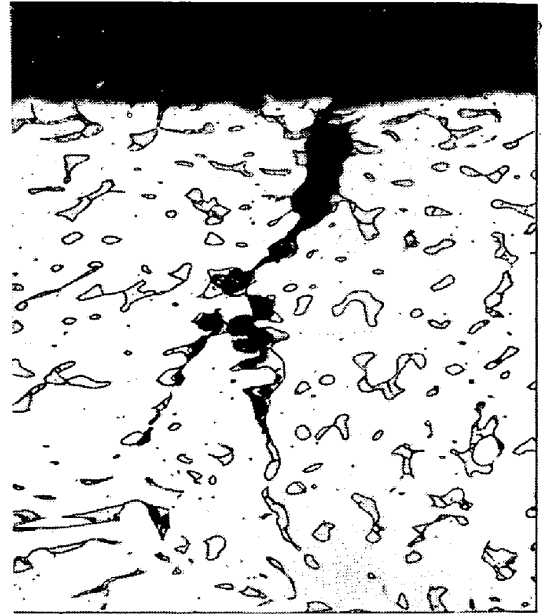


Photo. 4. Photomicrograph of cracks along δ -ferrite observed on the forged specimen of 17.5%Cr-6.5%Ni-2%Mn-2%Cu alloy.

鏡によつて観察した。Photo. 4 はその結果の一例を示したものであり、割れに沿つて必ず δ -フェライトが存在し、この状態はいずれの組成、いずれの加熱温度でも同様であつた。したがつて、本鋼種に関しては、もちろん顕微鏡下では認められない Cu の局部的濃化が割れに何らかの影響を与えているだろうとは考えられるが、それ以上に δ -フェライトの割れに及ぼす影響が大きいものと予想される。

このように、割れに δ -フェライトが関係するという観点からすれば、これまでに述べたところの割れが発生し難くなる化学組成のものは、だいたい、フェライト量を少なくする傾向のものであつた。ただし、Mn については Ni と同様オーステナイト生成元素と考えられているにもかかわらず、割れ防止の効果がまったくない場合があつた。このような不規則性については、単に化学組成のみからは律しられない面も考えられるので、つぎに、フェライト量を推定する Ni-バランスあるいはフェライト量の実測値などを因子にとつて割れ発生傾向との関係を求めた。

3.4 Ni-バランスおよびフェライト量と割れ発生傾向との関係

本報に用いた Ni-バランスの計算式は、THIELSCH⁹⁾により得られた式で、Ni 当量と Cr 当量の差で次のように示される。

$$\text{Ni-balance} = (\% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 \times \% \text{Mn} + 8.2)$$

$$-1.1(\%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb)$$

この式は化学組成からおよそのフェライト量を推定するのにしばしば用いられ、Ni-バランス=0 のときフェライト量は 0% であり、これより負で数値が大きくなるほどフェライト量は多くなるという関係にある。

Fig. 11 は今回の実験に用いた全試料（ただし、Cu シリーズの試料を除く）について Ni-バランスと割れ指数との関係を求めたものである。同図中で○印で示したものは Mn=3~5% の場合であり、●印は Mn=1~2% の場合である。また、実線は Mn=1~2%（打点は●印）の場合のみについての傾向を示したものである。

まず、Mn=1~2% の場合についてみれば、いずれの加熱温度でも、また、いずれの圧下率でも、Ni-バランスの小さいほど、つまり負で数値の大きいほど割れ指数が大きくなり、割れが発生しやすい傾向を示している。一方、Mn=3~5% の場合では試料数が少ないため、Ni-バランスの変化による傾向はあまり明瞭でないが、いずれの図においても同一の Ni-バランスでは Mn=1~2% の場合より割れ指数が大きい傾向を示している。すなわち、同一の Ni-バランスであつても Mn 含有量の高いものは割れを発生しやすいといえる。

このように、Mn 含有量の大小によつては一概に Ni-バランスのみで割れ発生傾向を律することのできないことがわかつたが、この原因としては、計算上得られる Ni-バランスと割れに関係あるとみられる実際のフェライト量とは必ずしも比例していないのではないかと考えられる。したがつて、この点を明らかにするために、本実験供試鋼塊すべてについて Ni-バランスと実測したフェライト量との関係を求めてみた。その結果は Fig. 12 に示したようであり、Mn=1~2% の場合は Ni-バランスが負で大きいほどフェライト量が多くなるという比較的明瞭な比例関係をもっているのに対し、Mn=3~5% ではこの関係があまり明瞭でなく、しかも全般に同一の Ni-バランスでも Mn=1~2% のものよりフェライト量の多いことがわかつた。つまり、THIELSCH によつて提示されている Ni-バランス式中で Mn に関する係数が、実は Mn 含有量によつて異なつており、そのために、鋼塊中のフェライト量は同一 Ni-バランスでも Mn 含有量によつて異なつてくるのではないかと思われる。

したがつて、Mn 含有量にかなりの幅がある場合は、割れの発生傾向を Ni-バランスで決めることは正しくなく、むしろフェライト量そのものとの関係を求めるほう

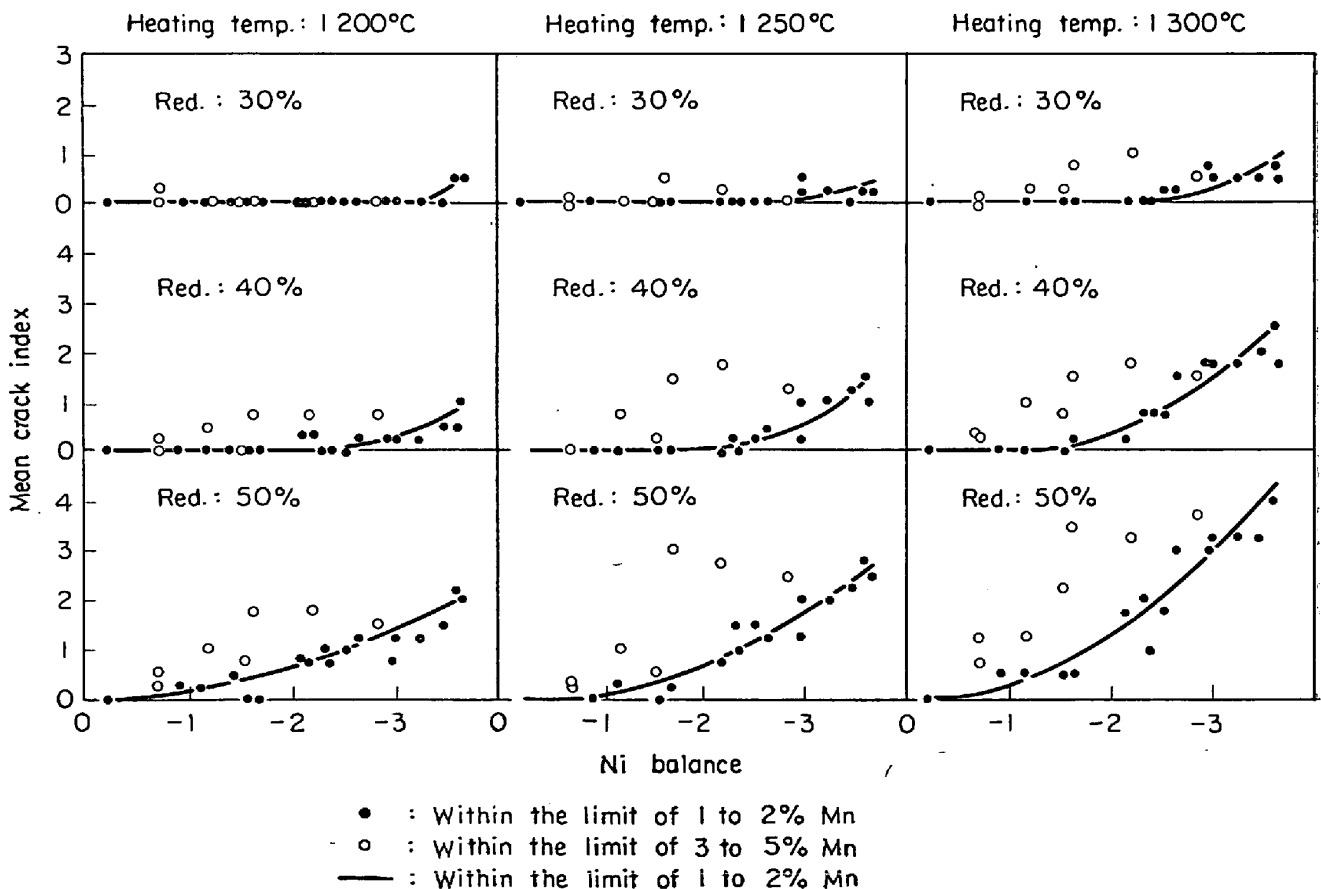


Fig. 11. Relation between mean crack index and Ni-balance.

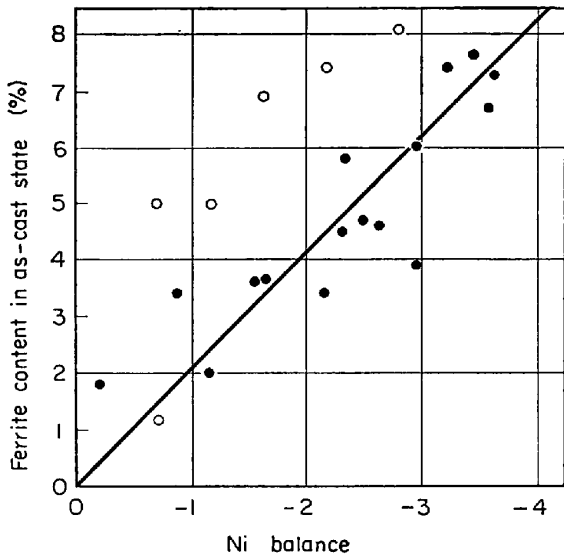


Fig. 12. Relation between ferrite content in as-cast state and Ni-balance.

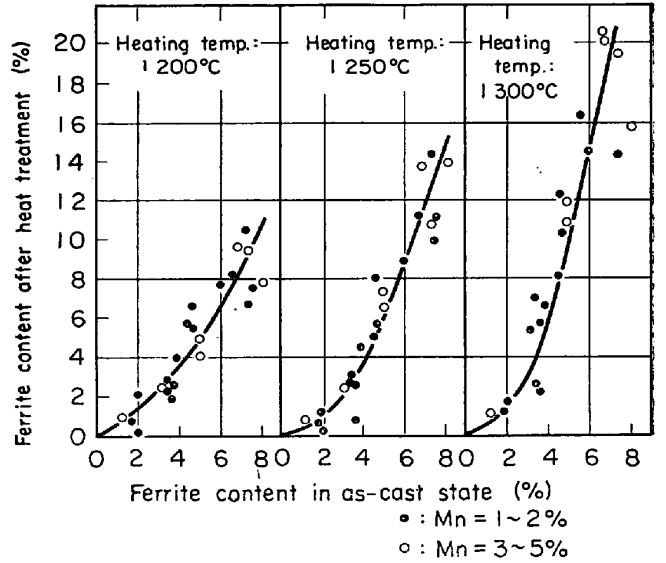


Fig. 13. Relation between ferrite content in as-cast state and after heat treatment.

が正しいものと考えられる。

ところで、これまでに述べた Ni-バランスあるいは、Fig. 12 に示したフェライト量のいずれも 鋳込みのままの状態について求めた値であるが、本実験における割れは、直接的には、加熱された状態でのフェライト量に大

きく影響されると考えられるので、割れとの関係を求める場合に鋳込みのままのフェライト量を因子にとることは若干問題がある。

しかしながら、鋳込みのままのフェライト量と加熱された状態でのフェライト量との関係を求めてみると

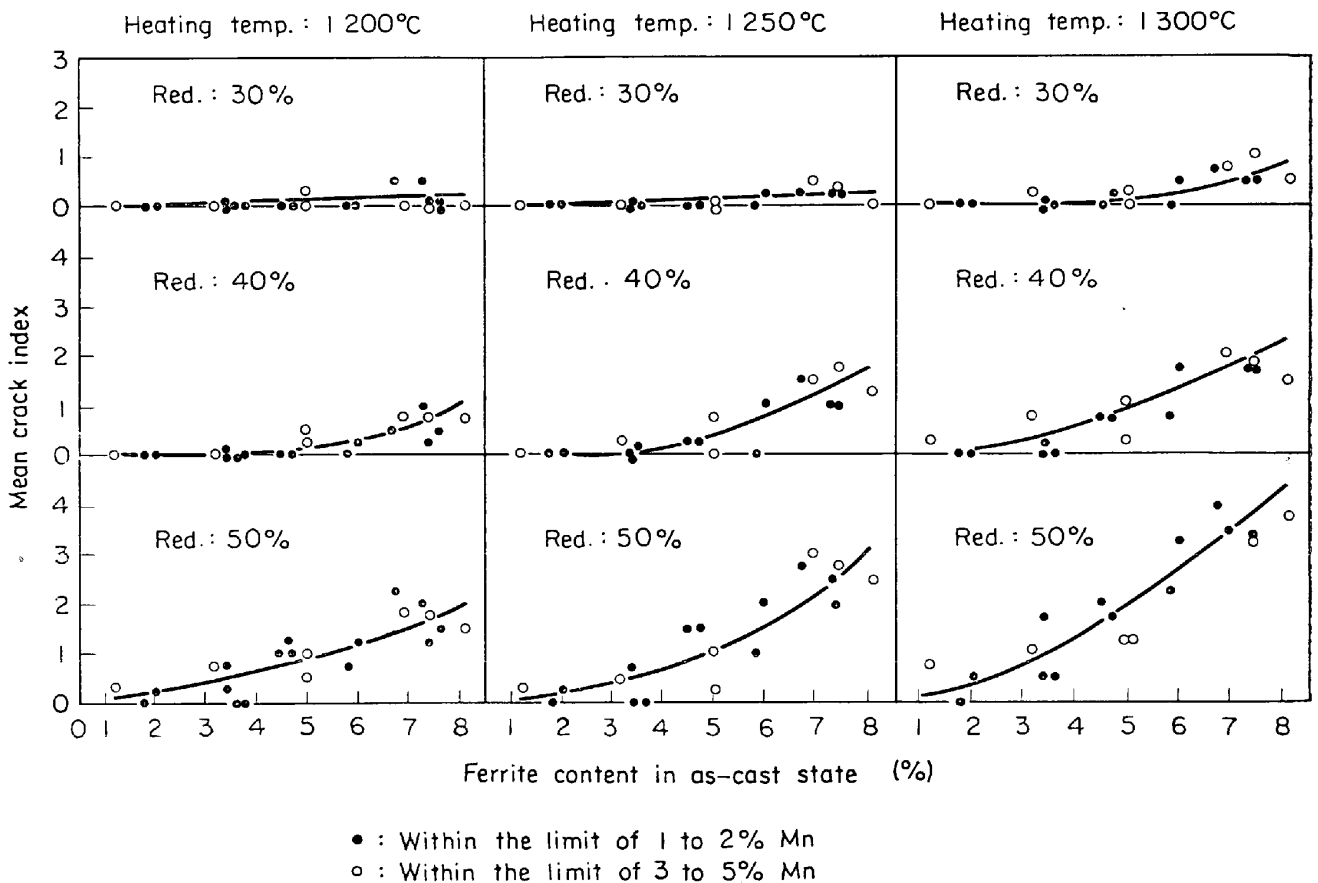


Fig. 14. Relation between mean crack index and ferrite content after heat treatment.

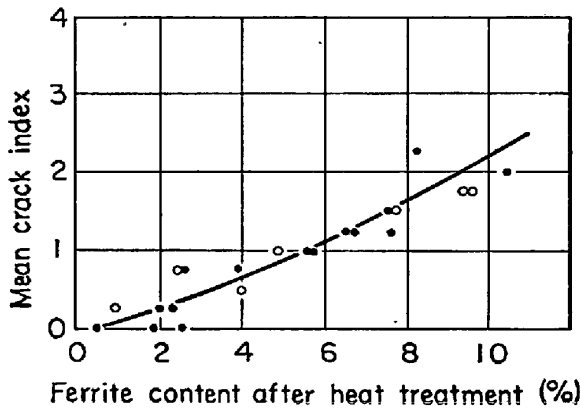


Fig. 15. An example of relation between mean crack index and ferrite content after heat treatment.

Heating temp. : 1 200°C
Reduction : 50%

Fig. 13 に示したごとくであり、両者の間にはかなりよい相関性が認められる。したがって、割れとの関係を求める場合にはいずれの状態のフェライト量を因子にとつても、ほとんど類似の結果が期待される。

Fig. 14 はその一例として、鑄込みのままのフェライト量と割れとの関係を求めた結果である。図から明らかのように、どの試験条件においても Mn 含有量のいかんにかかわらず、フェライト量と割れ指数にかなり良い相関性を示しており、鑄込みのままフェライト量の多いほど割れやすいという傾向が明らかになった。もちろん上述したように、Fig. 14 と同じ傾向を示す結果は、横軸に加熱された状態でのフェライト量をとつても得られ、Fig. 15 にはその一例として、1 200°C 加熱で圧下率 50% の場合の例を掲げた。

以上に述べたように、割れ発生傾向を Ni-バランスから予測する場合には、Mn 含有量に注意しなければ誤まった結果を招く恐れがあるのに対して、鑄込みのままのフェライト量から予測する場合には、Mn 含有量に関係なく、一義的に求められる。

4. 結 言

Cu 入り 18-8 型ステンレス鋼の熱間加工時の割れに

関し、本報では割れ発生傾向に及ぼす化学成分およびフェライト量の影響について、落重式鍛造試験法を用いて検討した。その結果は次のように要約される。

1. Cu 含有量が 4% 以上であると著しく割れを惹起するが、4% 以下では軽微な割れで Cu 含有量の大小によつて割れの程度にあまり差は見られない。
2. Cu 含有量を 2% とした場合には、Cr 含有量を低め、Ni 含有量を高めることによつて割れは著しく減少する。しかし、Mn 含有量の増大は Cr 含有量を低めたときにのみ割れ抑止に有効である。
3. 本鋼種の熱間加工時の割れは主としてフェライトに起因している。したがって、割れ発生傾向は Ni-バランスまたはフェライト量によつて予測されうるものと考えられるが、Ni-バランスと割れ発生傾向との関係においては、Mn 含有量の大小によつて相関関係が異なることがあるので、鑄込みのままの状態かまたは加熱された状態でのフェライト量によつて割れ発生傾向を予測することが望ましい。これは Ni バランスとフェライト量の関係が、Mn 含有量の大小によつては一つの数式で表示することができないためであると推定される。すなわち、THIELSCH によって提示されている Ni バランス式中の Mn の係数は Mn 含有量により変化するものと考えられる。

文 献

- 1) 清水, 高橋, 鋸屋: 金属学会会誌, 34(1970) 4, p. 428
- 2) H. THIELSCH: Welding Research Council Bulletin Series, No 9, (1951) Aug.
- 3) 間瀬: 塑性と加工, 9 (1968) 94, p. 782
- 4) C. B. Post and H. O. BEAVER: Blast Furn. Steel Pl., 41 (1953) June p. 627
- 5) K. A. REYNOLDS: ISI Publication 108, Deformation under hot working conditions, (1968) p. 107
- 6) L. H. MARTIN and L. O. BIEBER: AIME Met. Div. Symp. (1948), p. 15
- 7) 両角, 平坂: 日本鋼管技報, (1969) 47, p. 9
- 8) H. THIELSCH: Welding J., 29 (1950) 12, p. 577