

Cr-Mo 鋼のファイア・クラック特性*

渡 辺 十 郎**

Fire-Cracking Characteristics of Cr-Mo Steel.

Jūroh WATANABE

Synopsis:

Fire-cracking characteristics of Cr-Mo steel which was widely used for blooming and slabbing mill rolls were investigated by means of the cyclic thermal stress test developed by the author.

The test results were as follows:

- 1) The maximum crack depth of Cr-Mo steels of various carbon contents and microstructures had the linear relationship on the log-log coordinates with the U-notched Charpy impact value.
- 2) The relation between hardness and fire-cracking characteristics depended upon the carbon content, and the lower the carbon content the shallower the crack.
- 3) Among the Cr-Mo steels which had been normalized and annealed at the various temperatures the spheroidized structure had the best characteristics. The structure containing the marked network of the primary cementite was relatively inferior.
- 4) Longitudinal characteristics were improved by increasing forging reduction, but transverse property showed its best at the rather small forging rate and the excessive forging injured the transverse fire-cracking property.
- 5) Porosities of cast steel became the starting point of the crack, and with the transverse specimen the crack took its path in the crystalline segregation.

I. 緒 言

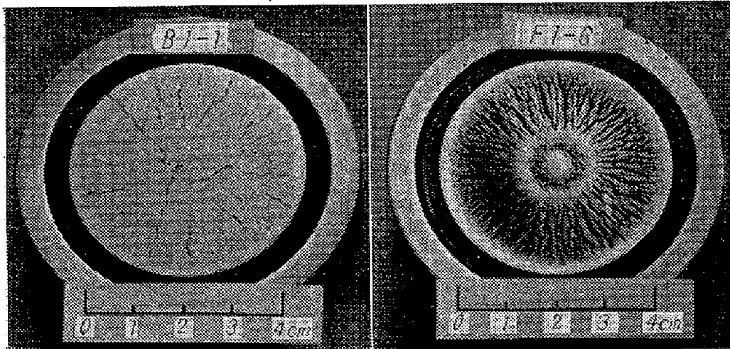
分塊ロールは、その表面に発生したファイア・クラックに起因する折損によつて寿命が制限されており、他の熱間工具においても、同種の熱疲労クラックが障害となる例が多い。筆者は筆者らが考案した繰返し加熱冷却試験装置^{1)~3)}を用いて、いろいろの鉄鋼材料のファイア・クラック特性について研究を進め、その一部はすでに報告されている⁴⁾。本報は、分塊圧延用ロールとして広く用いられている Cr-Mo 鋼について、その靱性とファイア・クラック特性の関係を取纏め、その結果に基づい

て、C含有量、組織および鍛造比とファイア・クラック特性の関係を説明したもので、これらの鋼の熱疲労強度が、靱性によつても比較できることを示している。

II. 試験装置と試験方法

筆者らが考案した繰返し加熱冷却試験装置^{1)~3)}を用いて試験した。この装置は、電気炉中で加熱された直径70mm、厚さ25mmの円板状試験片の一端面を、一定温度範囲で自動的に繰返し加熱冷却するもので、Photo.

1は、最高加熱温度を600°Cとし、水道水を用いて1000回の繰返しを行なった後の、Cr-Mo 鋼および0.37%炭素鋼試験片表面である。試験結果は、直径約30mmの円に接する縦断面に現われたクラックの数と深さで示される。本報では試験条件を最高加熱温度を600°C、冷却水を止める下設定温度を450°Cとし、1000回の加熱冷却サイクル後に発生したクラックの数と深さをもつて、試験材料のファイア・クラック特性値とした。



(a) Cr-Mo cast steel. (b) 0.37%C steel
600~450°C, 1000 cycles

Photo. 1. Surface cracking of the test piece.

* 昭和35年10月本会講演大会にて発表

** 株式会社日本製鋼所室蘭製作所研究所 工博

Table 1. Steels tested.

Steel	Chemical composition (%)								Heat treatment	Hardness Hv	U-Charpy impact value kg-m/cm ²		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo					
A 1	Cast steel (3.5kg ingot)	0.54	0.29	1.08	0.017	0.023	0.11	1.00	0.38	Spheroidized	214	11.3	
A 2		0.61	0.30	1.13	0.016	0.020	0.11	1.02	0.37		225	10.3	
A 3		0.89	0.25	1.06	0.016	0.022	0.10	1.01	0.37		234	4.1	
A 4		1.12	0.31	1.08	0.015	0.022	0.10	0.99	0.37		252	2.0	
A 5		1.23	0.29	1.03	0.014	0.020	0.10	1.01	0.37		270	1.2	
A 6		0.54	0.32	1.10	0.028	0.026	0.11	1.03	0.38		N at 650°C and at 750°C	319	
A 7		0.54	0.34	1.09	0.017	0.022	0.11	1.00	0.40		A* at 775°C	231	
A 8		0.53	0.30	0.91	0.017	0.024	0.11	1.01	0.38			227	
B 1	Cast steel (Surface zone of a large steel roll)									N at 700°C	303	2.1	
B 2										N at 725°C	285	2.5	
B 3										N at 750°C	256	2.9	
B 4										A* at 800°C	250	3.1	
B 5										A* at 850°C	252	3.0	
B 6										A* at 775°C	254		
C 1	Forged steel B									Spheroidized	252		
C 2		Forging rate=3									250		
C 3		Forging rate=9									250		
C 4											251		

* Normalized and annealed.

この試験方法の特徴を要約すれば、

- 1) 試験片の最高加熱温度は 600°C で、A₁ 変態による歪は関与していない。
- 2) 試験片表面に生ずる熱応力は、試験片自体の剛性により生じており、外部的拘束は与えられていない。

III. 試験材料

試験材料の種類および化学組成を Table 1 に示す。これらの試験材は、すべて Cr を約 1%、Mo を約 0.4% 含有する Cr-Mo 鋼で分塊圧延用特殊鑄鍛鋼ロールとして広く用いられている鋼種である。その中で A₁ ~ A₈ は、C を 0.53 ~ 1.23% 含み、高周波電気炉で溶解されて鋼製鑄型に鑄込まれた重量約 3kg の小型鋼塊から採取された。B₁ ~ B₆ は、直径約 1m の分塊圧延用鑄鋼ロールの胴部表面から採取された。これら A、B₂ 種類の試験材から採取された直径 80mm、厚さ 30mm の試験片は、焼準したのち、700 ~ 850°C のいろいろの温度に 2h 保持後炉冷された。冷却速度は 50°C/h である。また C₁ ~ C₄ は、B と同じロールの同じ位置から採取し、鍛造比 3 および 9 に鍛伸した試験材から切出した。そのさい試験面が試験材の鍛伸方向に平行になるように取られている。C₁ ~ C₄ 試験片には球状化焼鈍が施されている。

IV. 実験結果と考察

1. ファイア・クラック特性と靱性および硬さとの

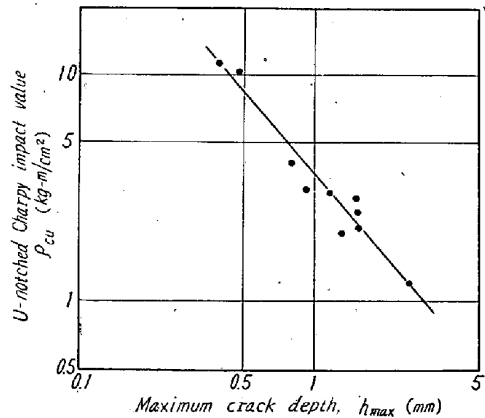


Fig. 1. Relation between maximum crack depth and Charpy impact value of Cr-Mo cast steel.

関係

A₁ ~ A₅ および B₁ ~ B₅ の計 10 種の試験材のファイア・クラック特性と、室温における U ノッチシャルピー衝撃値とを両対数軸にプロットすれば、Fig. 1 のごとくで、ほぼ直線的関係があり、(1) 式が得られる。

$$3.68 \times h_{\max}^{-1.21} = \rho_{cu} \dots \dots \dots (1)$$

ここに h_{\max} : ファイア・クラック特性値¹⁾で、測定面に現われたもつとも深いクラックの深さ (mm)

ρ_{cu} : 室温における U ノッチシャルピー衝撃値 (kg-m/cm²)

これらの試験材は、いろいろの C 含有量と焼鈍温度の

もので、したがって組織、硬さも広い範囲にあるが、そのファイア・クラック特性が衝撃値と密接な関係にあることが明らかにされた。

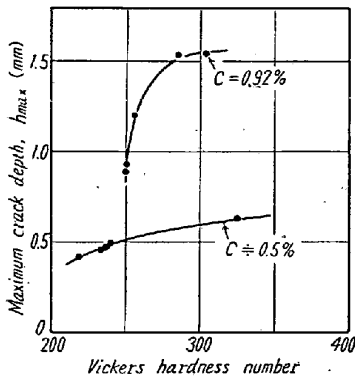


Fig. 2. Relation between maximum crack depth and hardness of Cr-Mo cast steel.

Fig. 1 と Fig. 2 から Cr-Mo 鑄鋼のファイア・クラック特性が、硬さの高低のみでは比較できないが、衝撃値の大小によつて判定できることが知られる。したがつて、Table 1 の試験材のファイア・クラック特性は、衝撃値に影響する要因であるところの C 含有量、組織および鍛造比などの要因との関係において考えることができよう。

2. C 含有量とファイア・クラック特性の関係

C 含有量が 0.54~1.23% で球状化組織を有する A1~A5 試験材のファイア・クラック特性と、C 含有量の関係をプロットすれば Fig. 3 のとおりである。n は測定されたクラックの数で、h_{max} はもつとも深いク

また試験材 A の中で C 含有量が約 0.5% のものと試験材 B について、硬さとファイア・クラック特性の関係をプロットすれば、Fig. 2 のごとくで、C 含有量によつて 2 本の線に分れる。

Fig. 1 と Fig. 2 から Cr-Mo 鑄鋼のファイア・クラック特性が、硬さの高低のみでは比較できないが、衝撃

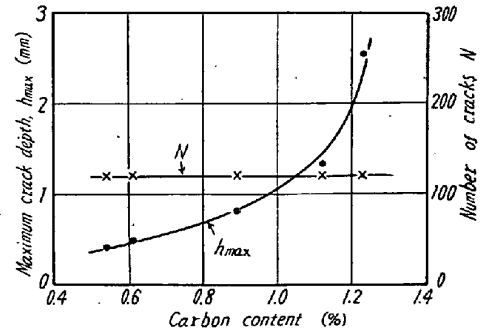


Fig. 3. Relation between fire-cracking characteristics and carbon content of Cr-Mo cast steel.

ラックの深さである。この図によるとクラックの数 n は C 含有量にはほぼ無関係であるが、クラックの深さ h_{max} は C 含有量の低い方が良い値を示す。なお C 含有量が 1% 以上の試験材でクラックが急に深くなるのは、未溶解初析セメンタイトの残留がいちじるしかつたためと考えられる。

3. 顕微鏡組織とファイア・クラック特性の関係

大型鑄鋼ロールの胴表面部から採取した B 符号の、直径 70mm、厚さ 25mm の試験片を焼準し、その後 625、725、775、800、850 および 875°C の各温度にそれぞれ 2h 保持後炉冷 (冷却速度 50°C/h) すれば、試験片表面部の顕微鏡組織は Photo. 2 のごとくであつて、800°C で完全球状化組織を示している。これらの焼鈍温度の異なる B1~B6 試験材のファイア・クラック特性を、横軸に焼鈍温度を取つて示せば Fig. 4 のごとくで

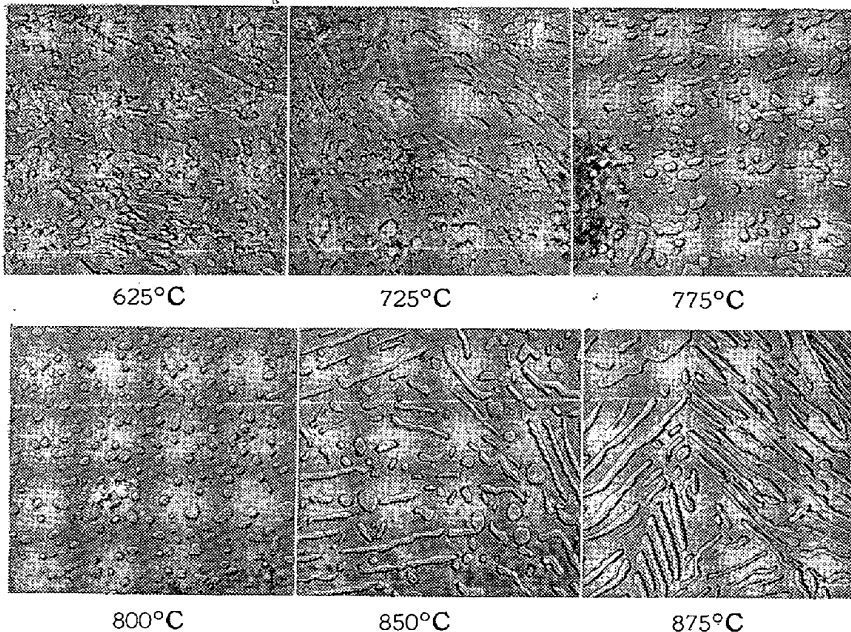


Photo. 2. Electron-micrographs of Cr-Mo steel (C=0.92%) as annealed at six different temperatures and slowly cooled (50°C/h) x7000 (1/2)

800°C の球状化組織でもつとも浅く、組織によるファイア・クラック特性の変化は、組織による衝撃値の変化と同じ傾向を有する。また前述したように、過共析鋼で初析セメンタイトの多い場合には、衝撃値も低いファイア・クラックも深く、劣つた特

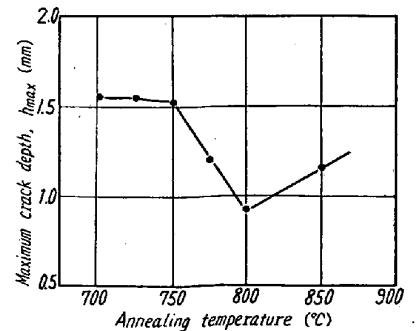


Fig. 4. Relation between maximum crack depth and annealing temperature of Cr-Mo cast steel.

性を示す。

4. 鍛造比とファイア・クラック特性の関係

大型鋳鋼ロールから採取した鋳鋼の B4 試験片と、同じ位置から採取して、鍛造比 3 および 9 に鍛伸した C1 ~ C4 試験片について鍛造比の影響を求めた。これらの試験片はいずれも球状化組織を有している。また C1 ~ C4 はすべて鍛造方向に平行な面を試験面としているが、その中で C1 と C3 は鍛造方向に平行な面を測定面とし、C2 と C4 は鍛造方向に直角な面を測定面としており、前者では鍛造方向に直角なクラックを測定して縦方向特性を求め、後者では鍛造方向に平行なクラックを測定して横方向特性を求めたものである。

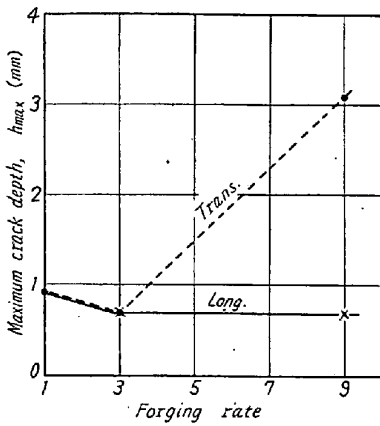


Fig. 5. Relation between maximum crack depth and forging rate.

これらの試験材のファイア・クラック特性 h_{max} と鍛造比の関係を示せば Fig. 5 のとおりで、縦方向では鍛造比の大きい方がクラックが浅い。しかし横方向では鍛造比 3 でクラックはもつとも浅く、鍛造比 9 のものは鋳鋼に比べて、かえって深いクラックが生じている。

このような鍛造比と縦横方向ファイア・クラック特性の関係は、一般に知られている鍛造比と縦横方向靱性の関係と一致しているが、試験片表面の顕微鏡的観察によつて認められたつぎの諸事実と関連させて考えること

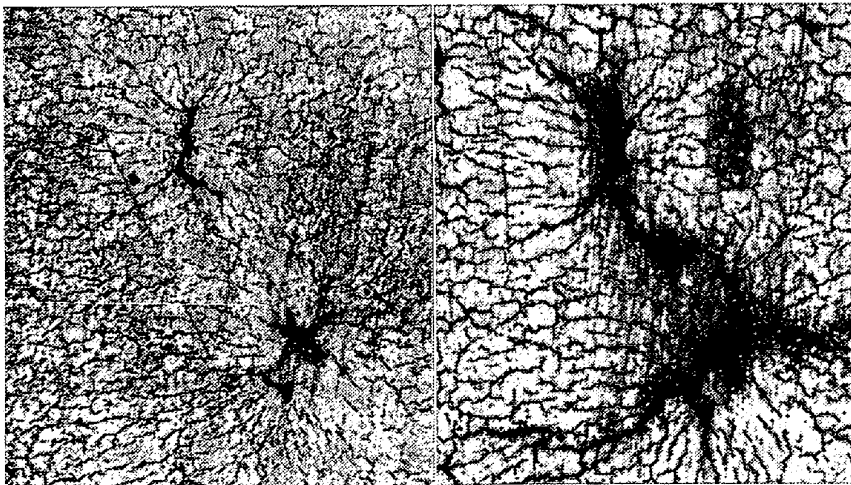


Photo. 3. Cracks started from a porosity of Cr-Mo cast steel, (N: number of repetition of thermal cycles).



Photo. 4. Cracks started from a crystalline segregation of Cr-Mo cast steel, 3% Picral.

もできる。すなわち Photo. 3 は鋳鋼試験片の表面で観察されたもので、加熱冷却の繰返数が 100 回および 500 回後における同一位置の状況を示している。図中の大きなクラックは鋳鋼のポロシテイから発生し、それを縫つて発達しているもので、ポロシテイが応力集中源となつてゐることが知られる。また Photo. 4 も B4 試験片の表面で観察されたもので、クラックは結晶偏析内に発生しており、さらに鍛鋼の横方向試験片ではクラックは結晶偏析を縫つて進んでいる。したがつてポロシテイが鍛圧着されてゐて、しかも繊維組織が発達していない、鍛造比の小さい試験材の横方向特性が良いのであると考えられる。熱応力が二軸的に加わる場合には、このような鍛造比の影響に留意する必要がある。

5. 熱疲労強度との関係

筆者はいろいろの破断歪 (fracture ductility) ϵ_f をもつ 3% Ni-Mo-V 鋼について、前述の方法で求めたクラック深さ h_{max} と ϵ_f との間に (2) 式の関係を求め、この式が COFFIN⁵⁾ の求めた金属の熱疲労強度を示す。(3) 式と対応し、この試験方法で鋼の熱疲労強度の比較ができると考えている⁶⁾。

$$0.246 \times h_{max}^{-0.64} = \epsilon_f \dots \dots \dots (2)$$

ここに h_{max} : もつとも深いクラックの深さ (mm)

ϵ_f : 破断歪

$$N \Delta \epsilon_p^{0.5} = 1/2 \epsilon_f \dots \dots \dots (3)$$

ここに N: 試験片破断までの熱応力繰返数

$\Delta \epsilon_p$: 塑性歪振巾

本報にのべた Cr-Mo 鋼の場合には、ファイア・クラック特性値と材料の靱性の間に (1) 式が求められ、この範囲では靱性によつても鋼の熱疲労強度の比較ができると考えられる。

IV. 結 言

筆者らが考案した繰返し加熱冷却試験装置を用いて、分塊ロールに多く用いられている Cr-Mo 鋼のファイア・クラック特性を試験した。

その結果を要約すれば、

1) いろいろの C 含有量，組織および硬さを有する Cr-Mo 鋼について試験した結果，最高加熱温度 600 °C，繰返数 1000 回とした場合の，もつとも深いクラックの深さ h_{\max} (mm) と材料の室温における U ノッチシャルピー衝撃値 ρ_{cu} (kg-m/cm²) の間に，次式の関係が求められた。

$$3 \cdot 63 \times h_{\max}^{-1.21} = \rho_{cu}$$

2) 硬さとクラック深さの関係は，C 含有量によつて異なり，C 含有量の低い方がクラックが浅い。

3) 焼準後，いろいろの温度に焼鈍した材料のクラック深さを比較すると，もつとも靱性に富んだ完全球状化組織のものクラックがもつとも浅く，良い特性を示す。また初析セメンタイトの多い組織のもの特性は劣る。

4) 鍛伸によつて，縦方向のファイア・クラック特性は改善されるが，横方向特性は低い鍛造比でもつとも良

く，鍛造比を過大にすると反つて劣化する。顕微鏡観察によれば，鋼のポロシテイはクラックの発生源となり，また横方向試験片では結晶偏析に沿つてクラックが進む。

5) これらの試験材の熱疲労強度は靱性によつても比較することができる。

終りに，本研究の発表を許可された株式会社日本製鋼所に感謝し，多くの指導を賜わつた北海道大学萩原巖教授と，日本製鋼所室蘭製作所研究所長下田秀夫博士に深く御礼申上げる。またこの研究にいろいろの便宜と助言を賜わつた日本製鋼所室蘭製作所の諸氏，とくに熊田有宏，堀内三男および中川義一の三君の協力に感謝する。

(昭和 36 年 2 月寄稿)

文 献

- 1) 渡辺: 日本製鋼技報, 5 (1960), p. 369~378
- 2) 下田, 渡辺: 鉄と鋼, 43 (1957) 9, p. 996
- 3) 渡辺: 日本製鋼技報, 6 (1961), p. 463~472
- 4) 渡辺: 鉄と鋼, 44 (1958) 3, p. 381
- 5) L. F. COFFIN, JR. and J. F. TAVERNELLI: Trans. Amer. Soc. METALS, 51 (1959), p. 438~453
- 6) J. WATANABE: Proc. 4th Jap. Cong. Test. Mat. (近刊) に掲載予定

高 Mn 鋼の炭化物析出におよぼす Ni, Cu 添加の影響*

(オーステナイト高 Mn 鋼の研究—III)

今井 勇之進**・斎藤 利生***

Effect of Ni and Cu Addition on Carbide Precipitation in Hadfield Steel.

(Study on austenitic high-manganese steels—III)

Yūnoshin IMAI and Toshio SAITŌ

Synopsis:

Some Hadfield steels added with 3% Ni and 3% Cu were studied mainly by micrography on isothermal carbide precipitation after solution treatment. By addition of 3% Ni, both carbide precipitation and pearlitic constituent precipitation in Hadfield steels were retarded and these precipitation temperature ranges were limited in a narrow range than those of the standard steel.

Growth rate of pearlitic constituents in steels was decreased remarkably by addition of 3% Ni. On the other hand, by addition of 3% Cu, pearlitic constituent precipitation in steels was only slightly retarded, but grain boundary carbide precipitation was accelerated at above about 650°C. Strength of steels after solution treatment was decreased slightly by addition of these elements, but toughness, especially elongation of steels was increased. As the content of carbon in Hadfield steels was lowered, both grain-boundary carbide precipitation

* 昭和35年4月本会講演大会にて発表 ** 東北大学金属材料研究所 工博

*** 防衛庁所属東北大学金属材料研究所派遣中 工博