

- 3) 岡本豊彦: 住友金属, vol. 5 (1953) No. 2 p. 61~84
 4) 岡本豊彦: 住友金属, vol. 6 (1954) No. 2 p. 85~102
 5) 岡本豊彦: 住友金属, vol. 6 (1954) No. 3 p. 158~170
 6) 岡本豊彦: 住友金属, vol. 7 (1955) No. 1 p. 1~6
 7) 肉厚の変化の有るとき, (6) の文献の p. 7 及び, Hill の本の p. 271
 8) 摩擦力の有るときは α の代りに $\alpha + \rho$ を用う.
 9) 岡本豊彦 “外圧と軸方向の引張応力を受ける管” 第2回圧延理論分科会 昭 30~9
 10) 空引のときは Fig. 9 b の B の代りに若干外径が減少して Fig. 5 b の C_1' となる.
 11) 著者の場合はテーパ付きのプラグにより $0.05 < \mu < 0.10$ であることを確認した.

13% Cr 鋼の機械的強度に及ぼす非金属介在物 および Mo の影響*

小野 健 二**・佐々木 良 一**

THE EFFECT OF NON-METALLIC INCLUSIONS AND Mo ON THE MECHANICAL STRENGTH OF 13% Cr STEEL

Kenji Ono Dr. Eng. and Ryoichi Sasaki

Synopsis:

The experiments herein introduced were made to clarify the tensile, impact, fatigue and creep strength of 13% Cr steel at high temperatures, and the effect of non-metallic inclusions and the Mo on the mechanical strength of the alloy.

In the experiments on the effect of non-metallic inclusions, four types of specimens were used, which contained 0.13 to 0.20% C, 12.69 to 13.13% Cr and various quantities of non-metallic inclusions. For testing the effect of Mo, five types of specimens containing 0.09 to 0.17% and trace to 1.06% Mo were employed.

The results are summarised as follows.

- (1) Tensile strength is not affected by the non-metallic inclusions.
- (2) With the increase of temperature, the tensile strength and the fatigue strength decrease, but endurance ratio, (i. e. fatigue strength divided by tensile strength,) increases.
- (3) The impact value is lowered by inclusions only slightly at room temperature but considerably at high temperatures.
- (4) Rotating bending fatigue strength decreases with the increase of inclusions on the stressed surface.
- (5) Addition of Mo increases the tensile strength and particularly creep strength at high temperatures, but affords no change in fatigue strength. 13% Cr steel containing 1.06% Mo has about twice the creep strength of that containing no Mo.

* 昭和 28 年 10 月日本金属学会講演大会および 30 年 4 月本会講演大会にて講演したものの総括

** 日立製作所日立研究所 工博 ** 日立製作所日立研究所

Table 1 Chemical composition, grain size and the degree of cleanliness & thickness of non-metallic inclusions. (Japanese Gakushin's standard)

Specimen No.	Chemical composition (%)								Austenite grain size	Cleanliness & thickness	
	T.C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo		A type	B type
1	0.13	0.31	0.30	0.011	0.009	0.32	12.69	—	7~8	1.0, 3 μ	1.5, 3 μ
2	0.17	0.15	0.29	0.018	0.012	0.20	12.90	—	7	0.5, 3.8 μ	3.3, 6.3 μ
3	0.20	0.19	0.28	0.022	0.012	0.21	13.13	—	7~8	1.5, 3.2 μ	3.9, 6.5 μ
4	0.18	0.28	0.29	0.021	0.012	0.17	12.93	—	7	3.4, 4.9 μ	3.9, 6.7 μ
1—M	0.15	0.19	0.53	0.018	0.012	0.14	12.17	1.06	7	1.0, 2.6 μ	3.9, 4.6 μ
M	0.15	0.11	0.31	0.018	0.012	0.20	12.87	0.38	7~8	1.5, 3.0 μ	2.2, 5.5 μ
A	0.17	0.15	0.29	0.018	0.012	0.20	12.90	tr	7	0.5, 3.8 μ	3.3, 6.3 μ
M*	0.09	0.34	0.43	0.020	0.021	0.31	13.24	0.40	6~7	0	3.8, 4.4 μ
A*	0.11	0.24	0.40	0.010	0.022	0.32	14.20	tr	5	0	4.0, 4.0 μ

I. 結 言

13% Cr 鋼に現われやすい欠陥として非金属介在物がある。介在物の少い、いわゆる清浄な鋼を製造することについては製鋼者側において努力されているが、鋼中に多少の介在物が存在することは避けられない。動的応力を受ける機械部品の疲労破損は非金属介在物から出発することが多いこと¹⁾²⁾³⁾、また諸種の鋼について非金属介在物の存在は疲れ強さを低下させることが⁴⁾⁵⁾⁶⁾多くの研究者によつて報告されている。また Mo の添加が鋼の高温における機械的強度特にクリープ強さを向上させることはよく知られており、13% Cr 鋼についても Mo を添加した鋼種がとりあげられ、実験結果も報告⁷⁾⁸⁾されているが、高温における機械的性質特に疲れについてはあまり発表されていないようである。

よつて 13% Cr 鋼についても機械的強度におよぼす非金属介在物および Mo の影響を明らかにするため、介在物量および Mo 量の異なる 13% Cr 鋼について高温の各種機械性試験を行った。

II. 試料の調質および組織

(1) 試料

非金属介在物の影響を求めるためには組成が近似し、非金属介在物量のみ異なる 4 種を、Mo の影響を求めるためには非金属介在物量が近似し、C 量および Mo 量の異なる 5 種を選び試料とした。Table 1 は試料の組成、オーステナイト結晶粒度および学振鋼品位判定法による清浄度と平均厚みとを示す。いずれの試料も 22×23 mm 角に熱間圧延後所定の寸法に切断された。

(2) 試料の熱処理

実験の正確を期するため材料はすべて焼入焼戻しによつてブリネル硬さ H_B 201~206 の範囲に調質した。す

なわち焼入れはいずれも 990°C 30 分保持油焼入とし、焼戻温度は硬さ対焼戻温度曲線から Table 2 のように決定した。

Table 2 Heat treatment of specimens
note: (990°C × 30mn → Oil quench. Air cooling after 1h tempering)

Specimen No.	Tempering temperature (°C)
1	770~775
2	740~745
3	790~795
4	770~775
1—M	795~800
M	783~788
A	740~745
M*	785~790
A*	785~790

(3) 組織

Photo 1 は調質された試料の代表的な組織を示す。No. 1~No. 4 および A 試料はおおむね (a) 或いは (b) (c) のような一様なソルバイト組織を示した。M* および A* には (d) のように相当量の遊離フェライトが存在し、1-M は (e) のようにこれより少く、M にはわずかに認められた。

III. 実 験

Fig. 1 は各種試験に用いた試験片の寸法を示す。

(1) 引張試験

20ton アムスラー型試験機を用い、常温、100, 300, 400, 500, および 550°C の各温度で 2~3 本試験して平均値を求めた。

(2) 衝撃試験

30 kg m シャルピー衝撃試験機を用い、常温、300,

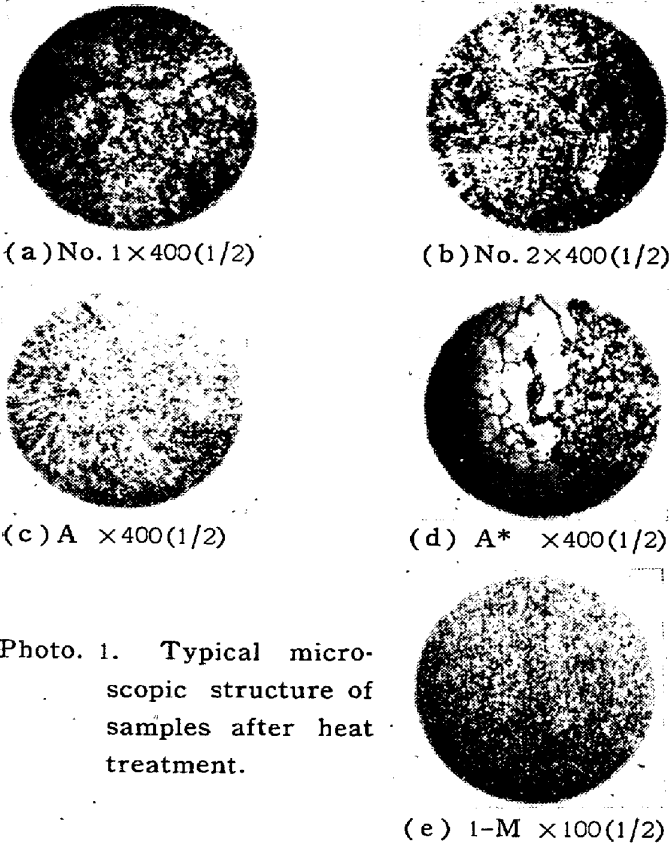


Photo. 1. Typical microscopic structure of samples after heat treatment.

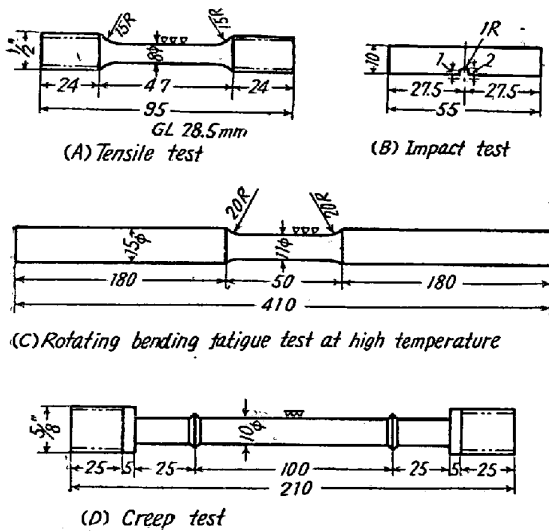


Fig. 1. Dimensions of test pieces.

350, 400, 450, 500 および 550°C の各温度で 3~4 箇試験して平均値を求めた。

(3) 疲労試験

a) 疲労試験

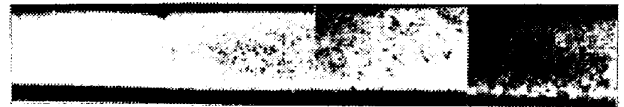
スパンの長い特型小野式回転曲げ疲労試験機を用い、常温 300, 400, 500 および 550°C の各温度で試験を行った。長さ 22cm の管状電気炉によつて試験片の中央部を加熱し、炉温は自動電圧調整器と電位差計式自動温度調節計とで調節され、試験中の炉温の変化は ±2°C 以

下である。なお表面の粗さが試験結果に著しい影響を与えることが知られているので、試験片の R 部および中央平行部はエメリー紙 05 まで研磨した。試験片は切削後すべて次に述べる赤血塩試験法⁹⁾ で非金属介在物の多少を判定した。応力繰返数は最大 10⁷ に指定し、それに対する疲れ限を求めた。

b) 赤血塩試験による介在物等級の判定

鋼材中の非金属介在物の分布は一様でないから、同一鋼塊に属するものであつても、個々の試験片の介在物量は異なり、学振法による清浄度は同一鋼塊に属する試験片全体について 1 つの目安を示すにすぎない。疲労試験においては試験片の表面に現われた介在物の量および分布が影響を及ぼすと考えられ個々の試験片について介在物の多少を判定する必要がある。よつて次の方法で個々の試験片表面の介在物を検出した。

試験片の表面を研磨、脱油脂および水洗した後、稀塩酸に暫時浸漬し、次に水洗し、稀薄赤血塩水溶液に短時間浸漬し、引き上げて自然乾燥すると、疵および介在物が存在するところはいわゆるタンブル青を生じて、介在物の存在が誇張され肉眼判定が可能になる。Photo 2 は



A 級 B 下級 C 級 D 級
Photo. 2. Example of test by potassium ferricyanide.

赤血塩試験を行つた一例である。タンブル青の斑点の少ないものから A, B, C および D の 4 等級に分類した。試料 No. 1, 2, 3 および No. 4 の試験片は、それぞれ、A 級, A 下~B 級, C 級および D 級と判定されたものがそれぞれの試験片数の 2/3~3/4 を占めた。試料 1-M, M および A は A 下~B 級が大部分で、M* と A* は A 級が大部分であつた。この結果と Table 1 とを比較するとおおむね清浄度が悪くなるに伴い赤血塩試験による介在物等級が低下することがわかる。各試料ごとになるべく介在物等級のそろつたもののみ試験に供した。

(4) クリープ試験

KWI 第 1 種短期試験法を採用した。すなわち負荷後 3~6h における平均クリープ速度が 0.005%/h に対応する応力をもつてクリープ限とした。Mo の影響を確かめるため 1-M, M, A, M* および A* について 500°C および 550°C で試験を行つた。

IV. 実験結果

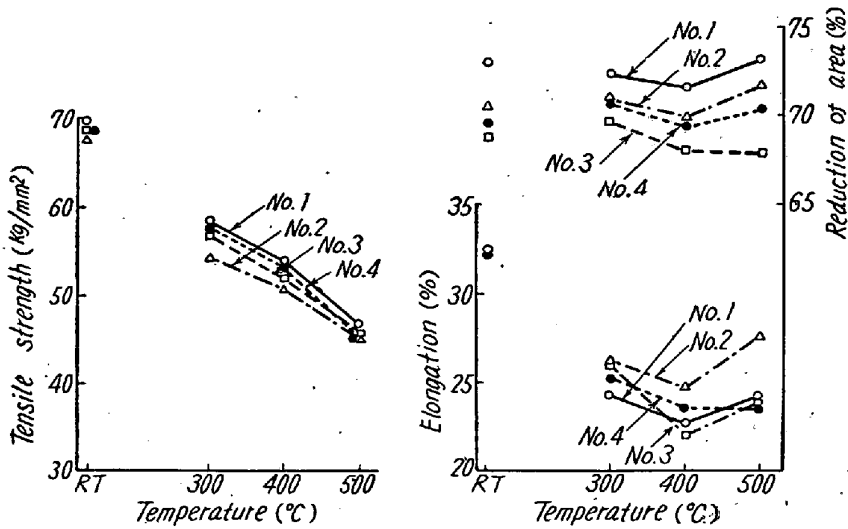


Fig. 2. Results of tensile test (No. 1~No. 4)

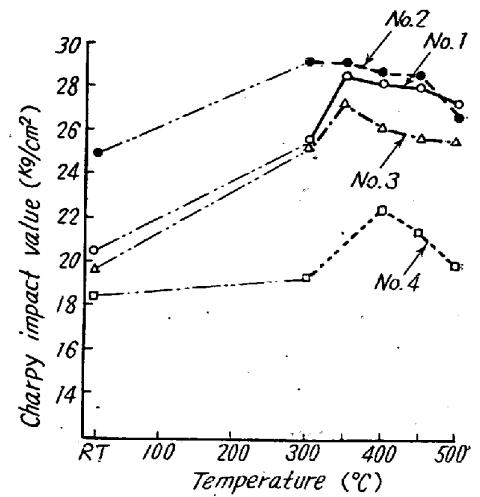


Fig. 4. Results of impact test.

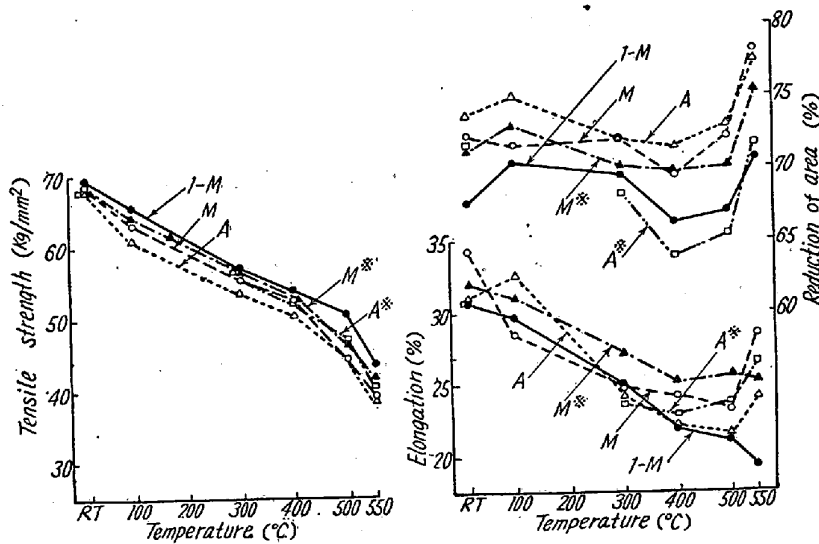


Fig. 3. Results of tensile test (1-M~A*)

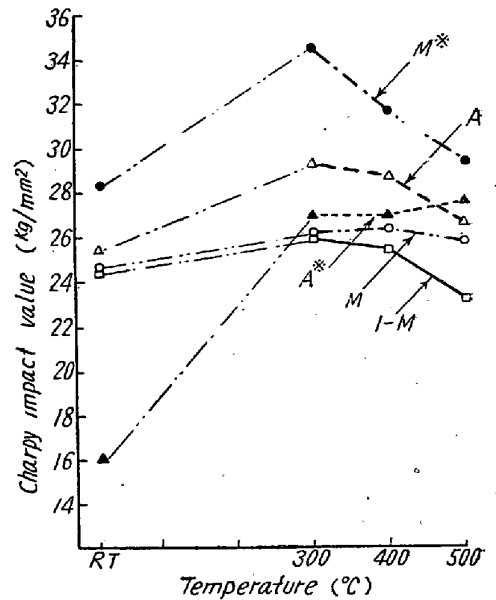


Fig. 5. Results of impact test.

(1) 引張試験

Fig. 2 および Fig. 3 は試験結果を示す。試験温度の上昇と共に引張強さは低下し、伸びは減少するが、伸びは 400°C で最少値を示し、それ以上で増加する。Fig. 2 について見ると等しい硬さに調質されたにもかかわらず、各試料間の引張強さに若干の差はあるが、介在物量との関係は認められない。Fig. 3 を見ると常温の引張強さにはほとんど差はないが高温では 1-M が強く、C 量の等しい 1-M, M, A 間で比較すると Mo を添加したものは引張強さが若干高く、伸び、絞りは幾分小さいようである。

(2) 衝撃試験

Fig. 4 および Fig. 5 は試験結果を示す。衝撃値は

温度の上昇と共に増加し、300~350°C で極大を示し、以後減少する。Fig. 4 について見ると No. 2, No. 1, No. 3, No. 4 の順に衝撃値は低下し、特に高温でその差が著しい。Fig. 5 についてみると、C 量の高い 1-M, M および A 試料の間では A, M, 1-M の順に衝撃値は低下している。M* は著しく高い値を示し、また 1-M および M の温度による変化は他の試料に比べて小さい。

(3) 疲労試験

Fig. 6 および Fig. 7 は S-N 線図で Table 3 にこれから得られた疲れ限および耐久比を一括した。温度の上昇と共に疲れ限は減少するが耐久比はかえって増加している。No. 1~No. 4 の間では介在物の少ない No. 1 が最も高い疲れ強さを示し、No. 2, No. 3, No. 4 の順

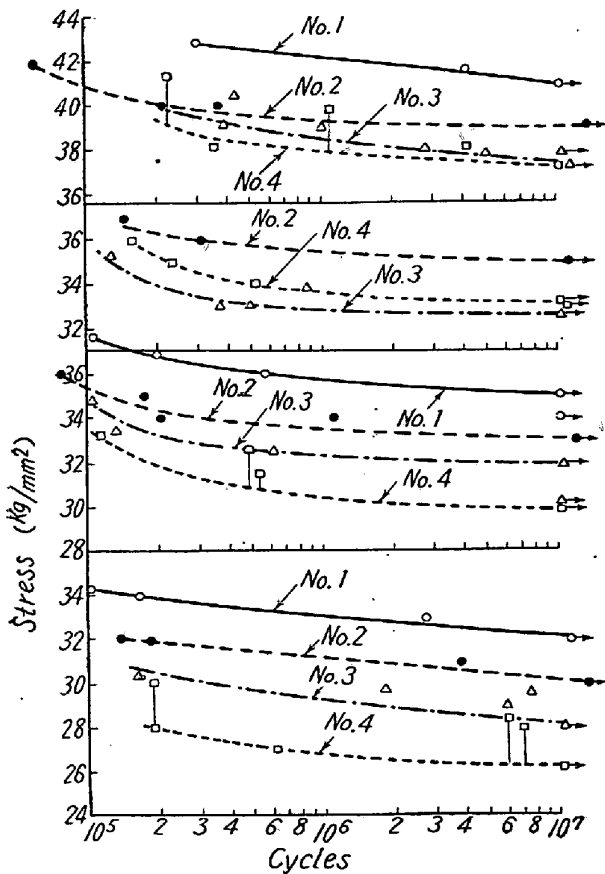


Fig. 6. S-N Diagrams for No. 1~No. 4

Table 3. Fatigue limit and Endurance ratio

Specimen No.	Temperature (°C)	Temperature (°C)				
		R.T	300	400	500	550
No. 1	σ_w' (kg/mm ²)	40.9	—	35.0	32.0	—
	σ_w'/σ_B	0.59	—	0.65	0.69	—
No. 2	σ_w' (kg/mm ²)	39.0	35.0	33.0	30.0	—
	σ_w'/σ_B	0.58	0.65	0.65	0.67	—
No. 3	σ_w' (kg/mm ²)	37.2	32.6	31.8	28.1	—
	σ_w'/σ_B	0.54	0.58	0.62	0.62	—
No. 4	σ_w' (kg/mm ²)	37.2	33.2	29.8	26.2	—
	σ_w'/σ_B	0.54	0.58	0.56	0.58	—
1-M	σ_w' (kg/mm ²)	39	31	32	29	26
	σ_w'/σ_B	0.56	0.54	0.59	0.58	0.59
M	σ_w' (kg/mm ²)	38	34	32	29	26
	σ_w'/σ_B	0.55	0.62	0.61	0.65	0.65
A	σ_w' (kg/mm ²)	39	35	33	30	—
	σ_w'/σ_B	0.58	0.65	0.65	0.67	—
M*	σ_w' (kg/mm ²)	40	31	31	29	25
	σ_w'/σ_B	0.59	0.55	0.59	0.62	0.60
A*	σ_w' (kg/mm ²)	38	34	32	25	24
	σ_w'/σ_B	0.56	0.59	0.61	0.53	0.59

σ_w' : Fatigue limit, σ_B : Tensile strength
 σ_w'/σ_B : Endurance ratio

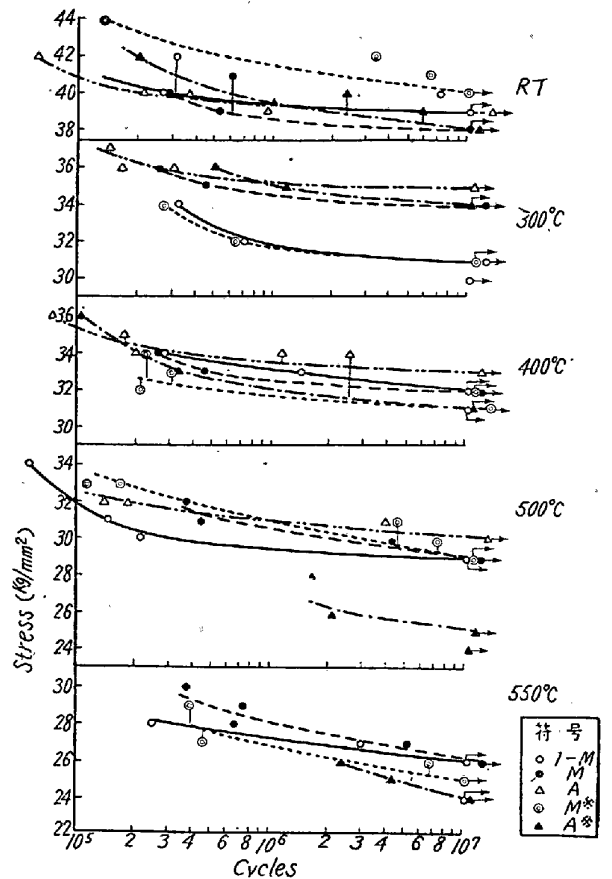


Fig. 7. S-N Diagrams for 1-M~A*

に低下している。1-M~A*の間では全般的にAが最も高いようであるが、大きな差はない。1-MとM*の300°CおよびA*の500°Cにおける値が特に小さい。

(4) クリープ試験結果

Fig. 8は試験結果を示し、Table 4はこれから得られたクリープ限を示す。Moを1%含む1-Mは最も高い値を示し、M、M*、A*、Aの順に弱くなる。

V. 結果の検討

(1) 耐久比と温度

疲れ限および引張強さは温度の上昇と共に低下するが耐久比はかえって幾分増加している。この傾向は高温疲労試験にしばしば現われる一般的な現象で多くの研究者の実験結果にも認められている⁹⁾。疲労が内部歪の蓄積によるものである¹⁰⁾と考えると、内部歪は温度の上昇により幾分開放されるから、疲労は回復の傾向にあることになり、したがって高温では耐久比が大きくなるものであろう。

(2) 非金属介在物の影響

a) 引張試験

引張強さは Fig. 2において No. 1~No. 4の間に若

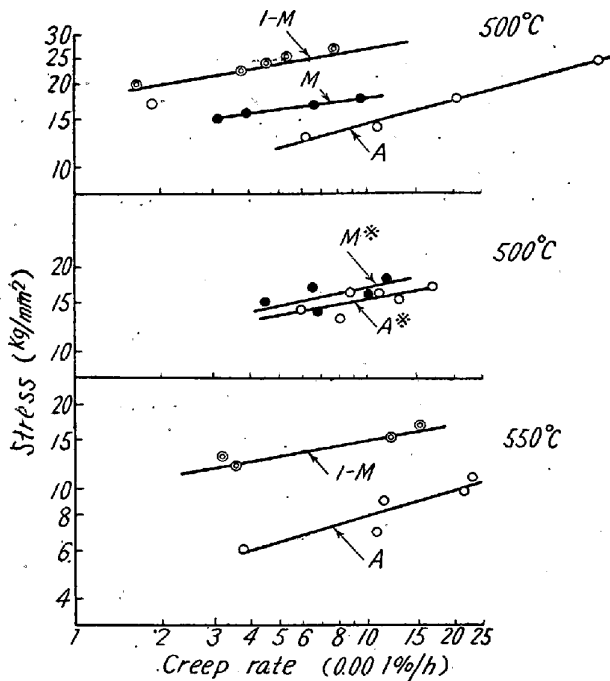


Fig. 8. Creep curves for 1-M~A*

Table 4. Creep strength (kg/mm²)

Temperature (°C)	500	550
Specimen No.		
1-M (Mo 1.06%)	24.0	13.0
M (Mo 0.38%)	16.1	—
A (Mo tr)	12.5	6.5
M* (Mo 0.40%)	14.7	—
A* (Mo tr)	13.4	—

(Note: by KWI (1) method. mean creep rate 0.005%/h)

Table 5. Summary of tests for significance of differences in tensile strength.

Materials compared	Results of F test at 5% level
No. 1—No. 2	Significant •
No. 1—No. 3	Significant
No. 1—No. 4	Not Significant
No. 2—No. 3	Not Significant
No. 2—No. 4	Significant
No. 3—No. 4	Not Significant
1-M—A, M, M*A*	Significant •
M—A	Not Significant
A*—A	Not Significant
M*—M	Not Significant
A*—M	Not Significant
M*—A	Significant

•: Significant at 1% level.

干の差があるが、試験値のばらつきを考慮した場合に平均値の差が充分意味を持っているか否かを検討するため F 検定により有意差検定を行った。Table 5 はその結

果を示す。これによると No. 1 と No. 2 の差は有意で No. 1 と No. 4, No. 3 と No. 4 の差は有意ではなく、その差を介在物の多少と関連づけることができない。したがって No. 1 と No. 2 の差は介在物以外の理由に基づくものでこの程度の介在物の多少は引張強さにほとんど影響しないといえよう。

b) 衝撃試験

衝撃値についても同様 F 検定を行った。Table 6 は F 検定結果である。衝撃値は Fig. 4 および Table 6 に示されるように、おおむね介在物の少ないものが高く、殊に高温ではその差が著しい。衝撃値には C 量も関係するから介在物の影響のみを示しているとは考えられないが特に高温における差は介在物によるものであろう。すなわちソルバイト地は温度の上昇に伴い靱性を増すが、介在物は比較的脆くかつ温度が上昇しても靱性を増さないから、ソルバイト中の介在物がクラックの伝播を助け、衝撃抵抗を低下させるものと考えられる。

c) 疲労試験

Fig. 6 および Table 3 に示したように、介在物の多い試料は疲れ限が低く、No. 1 と No. 4 との差は常温で約 10%、500°C で約 20% で、介在物の存在が 13% Cr 鋼の疲れ強さを低下させることは明らかである。すなわち介在物の存在が 1 つの切欠として働き、そこに応力が集中して疲れ強さを低下させるものと解釈される。しかし切欠作用は Stewart, Williams 両氏が指摘しているように介在物の大きさ、形状、分布等が影響しその量だけに関係するのでは考えられない。

(3) Mo の影響

a) 引張試験

Fig. 3 および Table 5 の F 検定結果から考えると 1% Mo を含む 1-M の引張強さが高温で高いのは確かであるが、0.4% Mo を含むものと Mo を含まないものと間に差があるとはいえない。Mo を含まないものとして A 試料の代りに No. 1~No. 4 をとつて M および M* 試料と比較するとほとんど差はない。したがって等しい硬さに調質した場合は 0.4% 程度の Mo は引張強さに影響を与えないと考えてよいであろう。

b) 衝撃試験

Fig. 5 および Table 6 に示したように、衝撃値は、M* 試料だけが著しく高い値を示したために、Mo の影響について判定しにくいこれは M* の C 量が特に低いためと考えられ、C 量および非金属介在物量が比較的近似している 1-M, M および A 試料を比較すると、Mo の高いものの衝撃値はわずかに低下する傾向が認められ

Table 6. Summary of tests for significance of differences in impact value.

Material compared	Results of F test at 5% level
No. 1—No. 2, 3, 4	Significant •
No. 2—No. 3, 4	Significant •
No. 3—No. 4	Significant •
1—M—M	Not Significant
1—M—A	Significant •
M*—1—M, M, A, A*	Significant •
1—M—A	Not Significant
M—A	Significant
M—A*	Not Significant
A—A*	Significant •

•: Significant at 1% level.

る。しかしその低下はわずかで実用上問題にならない。M と 1-M 試料の温度に対する変化が他の試料に比較し著しく小さいのは如何なる理由に基づくか不明である。

(C) 疲労試験

疲れ強さは Mo を含まない A 試料が最も高いが、疲労試験値は著しい統計的性質を有するから、この程度の差では Mo を含まないものが最もよいとはいいい切れな。念のため二元配置法による F 検定を行つたが、5% の危険率で試料間の疲れ限の差は有意でないと判定された。耐久比は 1-M, M および A 試料間で比較すると、A が最も大きく、M, 1-M と Mo が多いもの程小さい。従つて Mo は耐疲労性の改善には効果がないといえよう。これは Photo. 1 にその一部を示したように、1-M および M 試料は少量の遊離フェライトが混在する不均一組織を呈するためであろう。13% Cr 鋼中の遊離フェライトが疲れ強さを低下させることはすでに明らかにしたところである¹¹⁾。M* および A* 試料が前 3 者に比較し、弱い傾向があるのも、同様、組織中に相当量混在する遊離フェライトのためと考えられる。

(D) クリープ試験

以上等しい硬さにそろえた場合に、Mo の引張強さに対する効果は僅少で、疲れ強さに対しては効果がないがクリープ強さに対しては Table 4 に明らかなように、Mo の効果が著しく、0.4% の添加でも効果が認められる。これは実験の当初から期待されたところである。すなわち Mo は 13% Cr 鋼の疲れ強さを低下させることなく、クリープ強さを著しく高めることができる。

VI. 結 言

以上 13% Cr 鋼の機械的強度におよぼす非金属介在物および Mo の影響を検討した。結果は要約すると次のようである。

(1) 温度の上昇と共に疲れ限は低下するが耐久比はかえつて増加する。

(2) 非金属介在物は引張強さに影響を与えないが、シャルピー衝撃値および疲れ限を低下させ、その低下は常温よりも高温の方が大きい。

(3) Mo の添加により高温の引張強さは若干高くなり、伸びおよび絞りは幾分減少する。衝撃値に対する影響は判然としないが、衝撃値を低下させる傾向がうかがわれる。

(4) Mo の疲れ強さに対する影響は認められないがクリープ強さに対する影響は顕著で、Mo の添加により疲れ限を低下させることなく、クリープ強さを向上させることができる。

本研究を行うに当り御援助を与えられた日立製作所日立工場綿森課長に厚く御礼申し上げると共に、御協力頂いた日立研究所小川浩三氏、小川卓三氏、伊藤久太郎氏、小林豊治氏、安藤克男氏また実験に従事された綿引達君に対し厚く感謝の意を表する次第である。

(昭和 30 年 6 月寄稿)

文 献

- 1) Johnson: SAE Journal, (1939), 44, 59~67
- 2) Clements: SAE Journal, (1939), 44, 68~71
- 3) Stone: Iron Age, (1931), 128, 1234~1237
- 4) Stewart, Williams: Ch. Abst. (1949), 2146g
J. Am. Soc. Nav. Engrs. (1948) 60, 475~504
- 5) Swan, Sutton, Douglas: Engineering, (1931) 131, 314~316, 374~376
- 6) Ranson: Trans. A.S.M., (1954). 46, 1254~1269
- 7) 中村: 火力発電, (1954) 19 号
- 8) 新持: 日本金属学会誌, (1953), 17, 446
- 9) 例えば学振: 金属材料 I, 応力論附表 81~90 (昭和14)
- 10) 西原, 小林: 機械学会論文集, 昭和 21, 12, 55
- 11) 小野, 佐々木: 日立評論, (1954), 36, 1066~1067