

669.14.620.178.3

1620, 192, 45

(152) FeO 系介在物と鋼の疲労

(鋼の疲労性質と介在物に関する基礎的研究—I)

金属材料技術研究所

○角田 方衛・工博 内山 郁
東京大学, 工学部, 工博 荒木 透

FeO Inclusions and Fatigue of Steel.

(Fundamental research on relationship between fatigue properties of steel and inclusions—I)

Masae SUMITA, Dr. Iku UCHIYAMA
Dr. Tōru ARAKI.

1. 緒 言

金属材料の疲労強度におよぼす非金属介在物の影響については、多くの研究がなされており、一般に介在物が

Table 1. Chemical composition of specimens and area proportion of inclusions (%).

No. of specimen	C	Si	Mn	P	S
S 13	0.005	0.002	0.003	0.001	0.002
S 22	0.002	—	—	0.001	0.003

No. of specimen	Al	O	Area proportion of inclusion
S 13	0.007	0.127	0.288
S 22	—	0.037	0.058

材料の疲労性質に悪影響をおよぼすとされているが、その明確な解析はまだなされていない。これは、介在物それ自体が多様で、その物性についても未知な点が多く、また、介在物だけの影響を調べるために適した試料の作製がむづかしく、したがって疲労性質に影響をおよぼすと考えられる諸因子、たとえば、すべり帯¹⁾、交叉すべり帯²⁾、変形双晶の交叉³⁾、炭化物⁴⁾などから介在物だけの影響を切りはなして考察することがむづかしいためと考える。

一方、材料力学的に介在物と疲労性質の関係を考えた場合、介在物は切欠作用の役割として討論されている。そして、介在物の周辺に生ずる応力に対しては、(1) 介在物と基地鉄の密着 (coherency) の度合、(2) 両者の弾性定数の相異、(3) 介在物の形状などが関係すると考えられる。前二者については、介在物の組成によつて異なるため、それらと疲労性質との関係を一義的に結びつけることはむづかしい。形状に関しては、著者の一連の研究⁵⁾ などからその多様性が明らかであるが、切欠作用として介在物を考えた場合には、いわゆる A 系、B 系および C 系介在物に分けて考察するのが適切と考える。

本研究は、上記の点を考慮して、鋼中の介在物が疲労におよぼす影響を基礎的に追究することを目的とし、本報においては、先づ C 系介在物 (主として FeO) を多量に含む試料と真空溶解した介在物のきわめて少ない試料とについて繰返曲げ疲労試験を行なつたさいの疲労破壊に関して報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

電解鉄を高周波溶解炉で大気中溶解した試料 (S13: 以後高酸素材と記す) および真空溶解した試料 (S22: 以後低酸素材と記す) をおのおの鍛造、熱間圧延 (1200~1000°C) により約 3 mm 厚の板とし、さらに冷間圧延により約 0.5 mm 厚の板とした。同板から疲労試験用試験片 (図は略す) を圧延方向に切出し、それらを 750°C × 100 min 真空焼鈍した。なお、試料の化学組成およびその含有介在物の面積率を Table 1 に示す。

2.2 疲労試験

試験片を氷酢酸-クロム酸電解液で表面を電解研摩後、4 kg·m シェンク型繰返し疲労試験機により、両振り繰返し曲げ疲労試験を行なつた。繰返し速度は 3000°/min で、曲げ応力は次式により算出した。

$$\sigma = \alpha \cdot t \cdot E / 2l$$

ここで、 α : 振動角 (rad), t : 試験片の厚さ (mm), E : ヤング率 (kg/mm²), l : 試験片の長さ (mm) である。

2.3 微小割れの数と長さの測定

微小割れの数は、光学顕微鏡により、介在物面積率測定用の接眼レンズを用いて 400 倍で視野中に存在する数を数えた。割れ数の多い場合には適当に 50 視野測定してその合計をとり、少ない場合には 100 視野測定して 50 視野に換算した。また、同時に、おのおのの割れについ

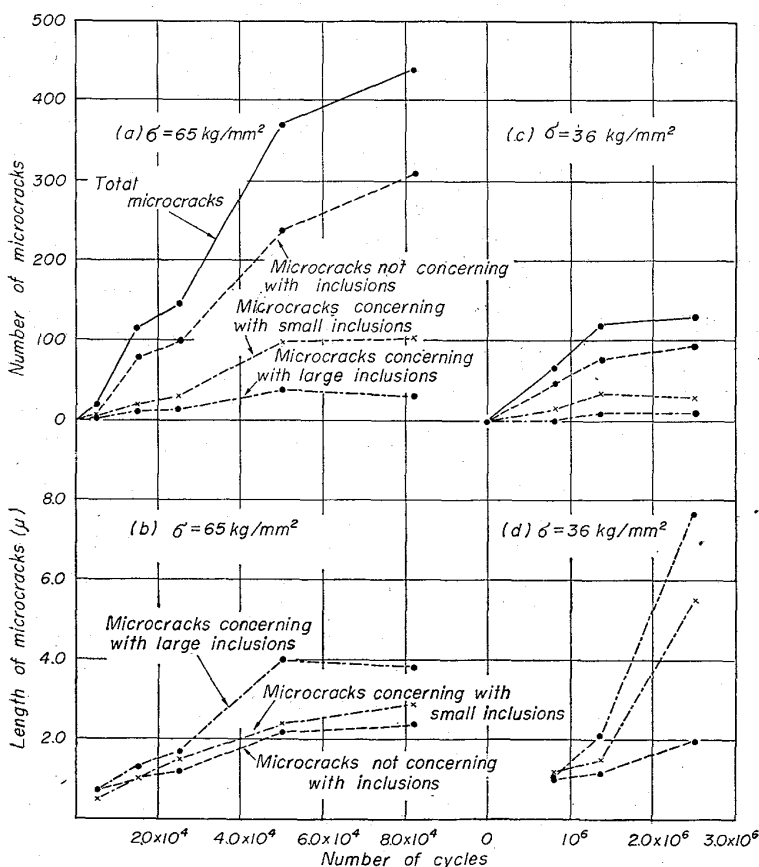


Fig. 1. Relations between number of microcracks and number of cycles, and between microcrack length and number of cycles in case of specimen S 13.

て線分比法により割れの長さを調べた。

2.4 観察方法

光学顕微鏡観察のほか、レプリカおよび透過法により、電子顕微鏡観察を実施した。

3. 結 果

種々の実験に先だち、Table 1の試料について両振繰返し曲げ試験を実施し、そのS-N曲線を参考のために作成した(図は省略)。次に、各試料について高応力レベル(破壊までの繰返し数 $10^4 \sim 10^5$)および疲労限に近い低応力レベル(破壊までの繰返し数 $2 \sim 3 \times 10^6$)で試験を実施し、破壊に到るまでの途中の数段階で試験を中断して試料表面の微小割れ数とその長さを測定した。測定は試料上の応力最大集中部近辺に限定し、測定に先だつて試験片を数分間電解研磨して塑性変形によるすべり帯を除いた。この研磨により表面が $1 \sim 2 \mu$ 研磨されるが、割れの現れ方に対してはほとんど影響は認められなかつた。

高酸素材(S13)についての測定結果をFig. 1に示す。高応力レベルの場合、Fig. 1(a)に示すように、総割れ数は試験片が破断するまで繰返し数が増すにしたがい増加する。上記の割れ数を数えるさいに、大型介在物($5 \sim 25 \mu$)に関係するもの、小型介在物(5μ 以下)に関係するものおよび介在物に関係していないものに分けたが、繰返し数の増加とともに割れ数が増加する傾向は3

者とも類似しており、介在物が特に割れ発生に寄与しているとは考えられない。ここで、試料表面上で介在物と関係していない割れが、試料内部の介在物と関連があるかどうかについては、表面を順次研磨して調べた結果および繰返し曲げ試験においては表面で最大応力となることを考え合せると、これらの割れの発生と内部の介在物が直接関係することはほとんどないと思われる。割れ長さと繰返し数については、Fig. 1(b)に示すように、一般に繰返し数の増加とともに割れ長さは増大している。この傾向は介在物と関係している割れにおいて著しく、とくに介在物が大きくなるほど顕著である。

低応力レベルの場合、Fig. 1(c)および(d)に示すように、割れ数および割れ長さと繰返し数の間の関係は、高応力レベルの場合と同様であるが、高応力レベルの場合にくらべて、その割れ数は、はるかに少ない。

低酸素材(S22)の測定結果をFig. 2に示す。割れ数あるいは割れ長さと繰返し数の間の関係は、高酸素材の場合とその傾向は同じである。ただ、介在物に関係した割れ数が非常に少ない。これは、Table 1に示したように、低酸素材の介在物量が少ないことおよび結晶粒界が著しく弱いことに原因があると考えられる。また、割れ数も高酸素材にくらべてやや少なくなっている。

4. 考 察

疲労破壊の第一段階である微小割れの発生の原因について、種々の報告がなされているが、本実験で使用したような酸素含有量の高い試料においては、とくに粒界の不純物あるいは介在物が原因として考えられる。一方、疲労試験による破壊においては、塑性変形が先行するので、結晶粒界の果す役割は大きく、多結晶においては結晶粒の方向性によりすべり帯の発生の仕方が異なり、そのためにPhoto. 1(a)に示すように粒界で割れが発生しやすい。G. T. HAHN²⁾らも同じようなことを報告している。粒界がそれほど脆弱でない場合には、R. C. BOETTNER²⁾らが述べているように、塑性変形のさいの深い入り込み(intrusion)が割れの原因となるであろう。この傾向は高酸素材(S13)において認められた。しかし、真空溶解した低酸素材(S22)のように、粒界が著しく弱い場合には、最初に粒界に割れが入り、それにより応力集中が除去されるので表面の入り込みが割れの原因になるまでには至らない。顕微鏡観察によると、この入り込みにより発生した割れの長さは粒界に発生した割れにくらべて短い。Fig. 1およびFig. 2の介在物に関係していない割れの長さを比較してみると、入り込みによる割れの多い高酸素材(S13)の割れの長さのほうが低酸素材(S22)のそれより短いのは上記の理由によると思われる。また、入り込みの現象の特性から考えて、高応力レベルの試験の場合の割れ発生の方が低応力レベルの場合のそれよりもこの入り込みが関係していることは推察できる。ただ、真空溶解材(本報では低酸素材)の粒界が非常に弱いことはしばしば出会う事実であるが、その原因につい

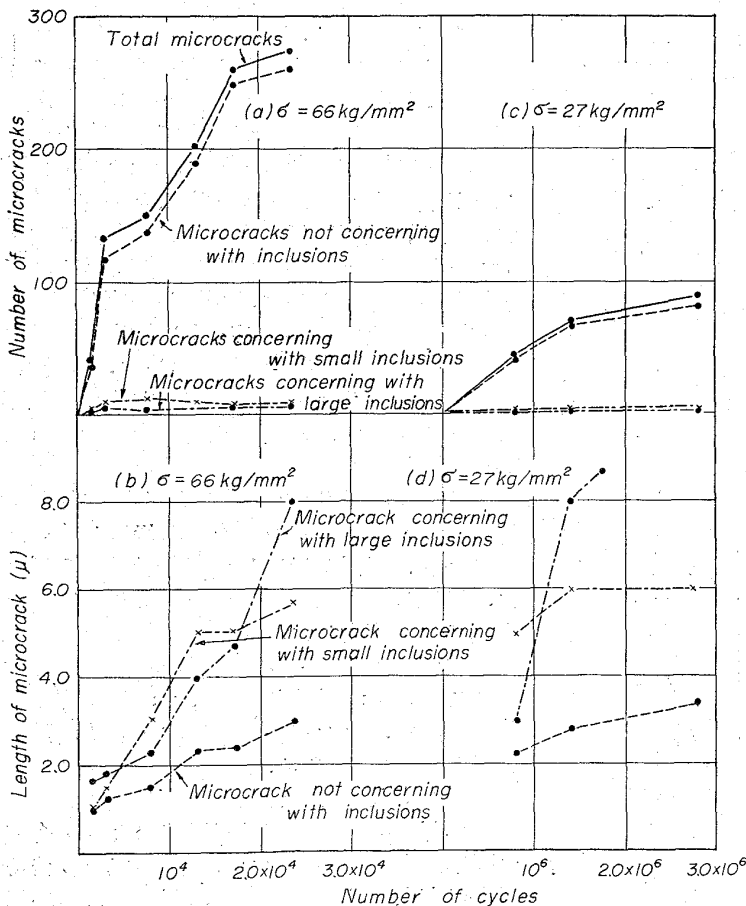
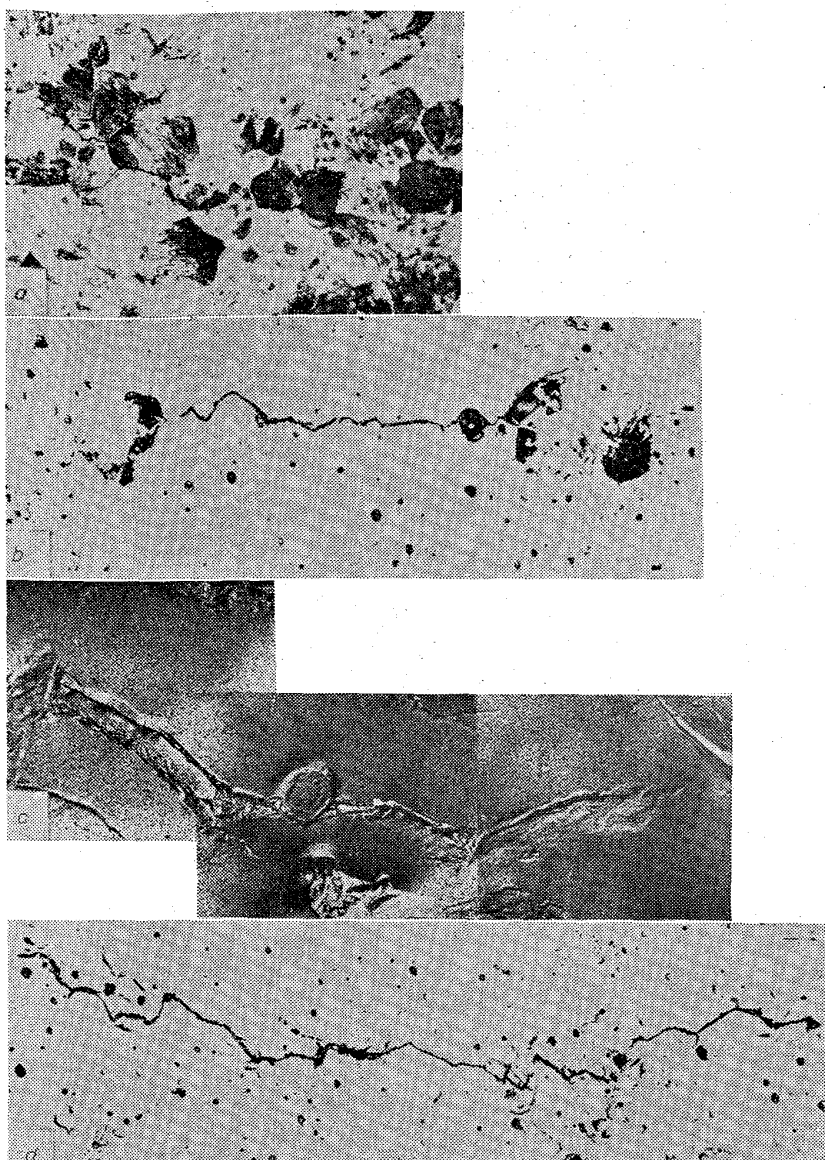


Fig. 2. Relations between number of microcracks and number of cycles, and between microcrack length and number of cycles in case of specimen S22.



- (a) Microcracks initiated from elastic-plastic boundary. $\sigma=31\text{kg/mm}^2 \cdot 2 \times 10^6$ cycles. $\times 400$
- (b) Microcrack stopped by plastic deformation formed at the tip of microcrack, and microcrack initiated by the elastic-plastic boundary. $\sigma=31\text{kg/mm}^2$, 1.95×10^6 cycles. $\times 400$
- (c) Microcrack stopped by grain boundary and plastic deformation formed in neighbour grain. $\sigma=64\text{kg/mm}^2$, 7.5×10^3 cycles. Electron micrograph. $\times 3000$
- (d) Microcrack propagated by inclusions. $\sigma=34\text{kg/mm}^2$, 1.34×10^6 cycles. $\times 400$ (3/5)

Photo. 1. Microcracks in specimen S 13. (no etching)

てはまだ明らかではない。

本実験をとおして、割れ発生源としての介在物の寄与については、他の諸因子とくらべてそれほど著しくなかつた。しかし、顕微鏡観察によると、介在物が粒界上にある場合、そこから発生した割れの長さは一般に長く、また高酸素材においては粒内に存在する介在物からも割れが発生していた。このことから、介在物の割れ発生は、基地の性質、とくに粒界状況に深い関係があると思われる。応力レベルの高低と介在物の大きさの大小、それと微小割れの発生との関係については、H. N. CUMMINGS⁸⁾らがモデルを提唱したが、本実験ではそのような事実は認められなかつた。また、C. J. McMAHON⁹⁾らが報告し

た現象すなわち発生した割れが拡大して破断に至る事実もみられなかつた。

割れの進行に関しては、割れの先端部には応力が集中するが、そこで塑性変形が生じた場合には割れの拡大は阻止され、さらにその塑性変形域で応力がある限度に達するとそこから新しい割れが発生する。その状況の1例を Photo. 1 (b) に示す。この割れの伝播を阻止するものとしては、Photo. 1 (c) に示すように結晶粒界があげられる。同写真の左端に示すように、応力集中がある程度高くなると、隣の粒内に塑性変形を起させ、そこから新しい割れを生ずるが、もしもこの時に粒界が弱ければ粒界割れを生ずるであろう。また、介在物を伝わって割れが成長する場合もあり、その例を Photo. 1 (d) に示した。さらに、M. KLESNIL¹⁾らは、疲労限より大きい荷重をかけるとすべり帯は粒界を越えて臨界長さに達し、これが成長して疲労破壊の原因となると述べている。このように割れ伝播の方法は種々あり、試料の組成、介在物の分布状態、大きさ、形状、応力の大きさなどにより、これらの方法のうちいずれかが優先して破断に至るものと推定される。本観察では、高酸素材における割れの伝播は粒界と粒内を交互に伝っていたが、低酸素材の場合には主として粒界を伝っているのがみられた。

試料の破断に至る途中の段階で試験を中断して調べた結果、破断個所に大きな介在物が浮き上つた状態で存在し、基地鉄とは密着していないようであつた。焼鈍したままの状態では、介在物はある程度基地と密着していると考えられるので、繰返し数の増加とともに密着性は悪化するものと思われる。この点から介在物の存在は疲労性質に影響をおよぼすと推察される。

透過型電子顕微鏡により、疲労試験した試料中の介在物周辺の転位分布状況などを調べた結果、彎曲した転位や疲労の特色と思われる整理されていない転位群、さらにサブバンドリなどがみられたが、介在物近

傍にみられた転位の履歴については明確ではない。M. KLESNIL¹⁾らは、応力の大きさにより、転位の配列は種々の型をとるが、表面のすべり帯の型あるいは長さとは無関係であると述べ、また、鉄のように積層不整合エネルギーの大きい場合には、一般に疲労試験したさいの表面と内部の転位の状態は異なると言われていることから、介在物周辺の転位の挙動についてはさらに検討する必要がある。

5. 結 言

1) 微小割れの発生には、介在物、結晶粒界および深い入り込みが関係しているが、介在物がとくに有効な原因になるということは認められなかつた。

2) 微小割れ数は繰返し数の増加とともに増大し、曲げ応力が高い場合に多い。

3) 微小割れの長さは、繰返し数の増加とともに長くなるが、その傾向は介在物とくに大きな介在物と関係する割れにおいて著しい。

4) 割れの伝播は、結晶粒界あるいは割れの先端での塑性変形の発生により阻止されるが、一方、介在物は割れ伝播を促進する場合がある。

文 献

- 1) M. KLESNIL, et ali.: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 203 (1965) 1, p. 47
- 2) R. C. BOETTNER, et ali.: Acta Met., 13 (1965) 9, p. 937
- 3) R. HONDA: J. Phys. Soc. of Japan, 16 (1961), p. 1309
- 4) C. J. MCMAHON, et ali.: Acta Met., 13 (1965) 6, p. 591
- 5) 内山郁, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 7, p. 1624
- 6) 内山郁, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 10, p. 1959
- 7) G. T. HAHN, et ali.: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 202 (1964), p. 677
- 8) H. N. CUMMINGS, et ali.: Trans. Amer. Soc. Metals, 49 (1957), p. 482
- 9) 内山郁, 他: 鉄と鋼, 51 (1965) 4, p. 813

え、そのまま衝撃試験を行なった結果を報告している。この試験では切欠底部に疲労クラックが存在するため、このクラックの切欠効果により脆化が起つている。筆者らは疲労現象は表面欠陥を除いても、内部になんらかの変化が起つていると考える。

そこで筆者らは焼ならした鋼に繰返荷重を与え、試験片平行部の内部よりシャルピー試験片を切り出して、鋼材の衝撃特性が繰返荷重によつていかに変化するかを調べてみた。

2. 試料および実験方法

本実験に使用した鋼は Table 1 に示すような化学成分で、900°Cで 30 min 均熱し、空冷したものである。その機械的性質も Table 1 に示す。

この試料を Fig. 1 に示すような試験片に加工し低サ

Table 1. Chemical contents and mechanical properties of the sample.

Chemical contents (%)					
C	Si	Mn	P	S	V
0.17	0.25	1.30	0.020	0.016	0.084
Tensile strength				55.2 kg/mm ²	
Yield point				38.3 kg/mm ²	
Elongation (JIS 5)				42%	

669.14; 620, 178.35

(153) 繰返荷重による衝撃特性の変化について

富士製土, 広畑製鉄所

工博 中西 昭一・〇土師 利昭

The Change of Impact Characteristics under the Repeating Load.

Dr. Shōichi NAKANISHI and Toshiaki HAZE.

1. 緒 言

鋼材は使用状況により、たとえば橋などに使用した場合各部材には繰返荷重を受ける。このように鋼材に繰返荷重を受けた時に、鋼材の機械的性質がいかに変わるかを知ることは興味あることである。とくに衝撃特性の変化は重要である。

荷重による衝撃特性の変化は、今まで1回の荷重で塑性歪を与え時効させてからシャルピー試験を行なう、歪時効シャルピー試験で、その脆化を推定していた。これらについての研究は比較的多数行なわれているようである。この歪時効シャルピー試験での脆化の推定は、部材に曲げ加工を施して使用する場合は適当であるが、構造物の部材として繰返荷重が加わる場合、荷重は降伏点以下の場合がほとんどなので適切でない。

筆者ら^{2)~4)}は低炭素鋼や焼入焼戻鋼について透過電子顕微鏡観察を行ない、降伏点以下の荷重でも転位の増殖は起り、繰返荷重による方がその量は多いことを知った。だから降伏点以下の荷重でも機械的性質の変化が起つていることが予想される。

J. M. LESSELLS⁵⁾は切欠付試験片に繰返荷重を与

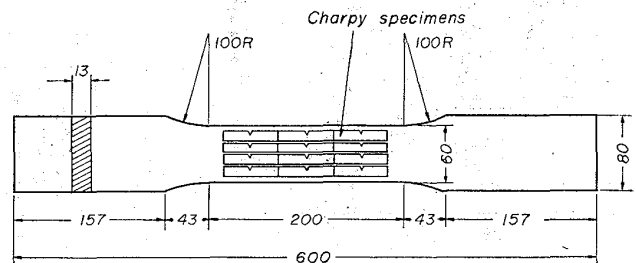


Fig. 1. Shape of specimen.

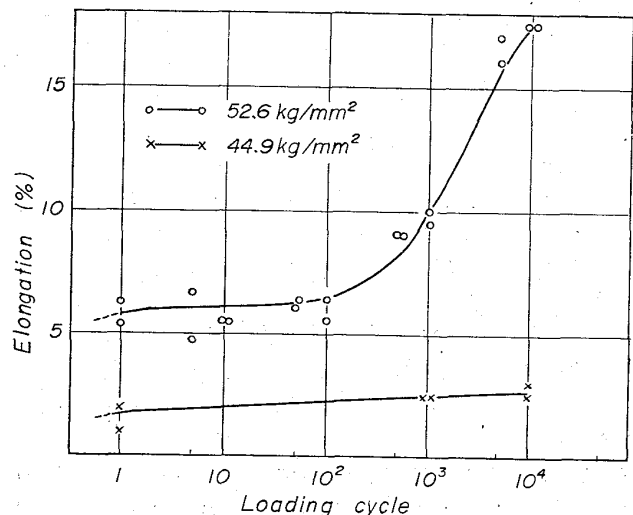


Fig. 2. Relation between elongation and loading cycle.