

ばね鋼の不均一なスラック焼入組織と機械的性質との関係*

内山道良**・上正原和典***・関 不二雄***

Relation between Slack-Quenched Heterogeneous Structure and Mechanical Properties of Spring Steel.

Michira UCHIYAMA, Kazunori KAMISHOHARA and Fujio SEKI

Synopsis:

As part of a study for the mechanical properties of spring steel, investigation was made on the effects of sorbitic microstructure, containing proeutectoid ferrite or hardness gradient, on the mechanical properties of C and Mn-Cr steels.

Specimens were prepared mainly from spring steels and also from structural steels or case-hardening steels for a supplementary purpose. They were quenched & tempered, high-frequency induction-hardened & tempered, or quenched after carburizing & tempered, and divided into following two groups:

- A. Specimens, heat-treated to the spring hardness (Hv 400 approx.) throughout the diameter and containing 0~35% of proeutectoid ferrite.
- B. Specimens, heat-treated to the spring hardness at the surface but to the lower hardness (Hv 210~400) at the center.

Results obtained after mechanical tests were summarized as follows.

1. The proeutectoid ferrite shows no clear effect upon the tensile strength.
2. The elongation, reduction of area, Charpy impact value, proportional limit in twisting, proportional limit in bending, and repeated impact value are lowered by the existence or increase of proeutectoid ferrite.

The degree of lowering is more remarkable in C steel than in Mn-Cr steel.

3. The fatigue limit in rotary bending is also decreased by the proeutectoid ferrite, but the behaviors in each kind of steel were not revealed distinctly.

4. When the yielding shear stress curve along the radius of specimen, which is determined by the hardness gradient curve, is crossed over by the theoretical load stress line, the maximum shear stress and also the reversed twisting fatigue limit are lowered.

5. To improve the proportional limit in twisting or reversed twisting fatigue limit for the steel bar having hardness gradient, the depth of hardened layer or core hardness must be increased. The relationship between those is given in a following formula:

$$\tau_{\max} = \tau_p \cdot d/d - 2t,$$

Where τ_{\max} : proportional limit of bar in twisting

τ_p : proportional limit of core in twisting

d : diameter of bar

t : depth of hardened layer.

I. 緒 言

ばね鋼の機械的性質におよぼす均一なスラック焼入組織の影響については既に前報¹⁾に報告してあるので、今回は不均一なスラック焼入組織の影響として、初析フェライトを含んだソルバイトおよび硬さ勾配を有するソルバイトまたは細粒パーライトからなるばね鋼の機械的性質に関する2, 3の実験結果を報告する。

II. 試料および実験法

試料としては Table 1 に示した化学成分のばね鋼・

構造用鋼・肌焼鋼・などを実験の種類に応じて Table 2 ~ 3 のように使い分けた。すなわち Table 2 は主な実験の種類とこれに使用した試片の主要寸法ならびに試料との関連を示したものであるが、さらにこれを Table 3 と照合すれば各試片の処理の状況を知ることが出来る。ここに

F 40-1-F はC系ばね鋼の初析フェライトを増して結果を見易くするためのC構造用鋼に対する熱処理で、F

* 昭和36年10月本会講演大会にて発表

** 三菱鋼材株式会社, 工博

*** 三菱鋼材株式会社

Table 1. Chemical composition of samples.

Kind of samples	Kind of steels	Chemical compositions (%)					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
F40	C structural steels	0.40	0.35	0.76	0.018	0.011	—
F4	Mn-Cr //	0.41	0.33	0.79	0.024	0.024	1.12
T4	C spring steel	0.89	0.30	0.57	0.014	0.009	—
T6	Si-Mn //	0.64	1.54	1.02	0.029	0.008	—
T9	Mn-Cr //	0.50	0.28	0.81	0.014	0.013	1.79
T35	C structural steel	0.37	0.27	0.70	0.017	0.010	—
T45	C spring steel	0.45	0.26	0.67	0.017	0.009	—
T55	// //	0.54	0.30	0.70	0.014	0.008	—
T21	Cr case-hardening steel	0.15	0.29	0.84	0.014	0.010	1.07

Table 2. Dimensions of specimen.

Kind of tests	Effective dimensions of specimen (mm)		Kind of specimens
	Cross section	Length	
Tensile test	10 ϕ	35	F40-1, F4-2
Twisting test	10 ϕ	80	F40-1, F4-2
	25 ϕ	190	T4-3, T6-4, T9-5, T35-6 T4-7, T6-8, T9-9, T35-10 T35-11, T45-12, T55-13, T21-14
Bending test	4×10	120	F40-1, F4-2
Rotary bending fatigue test	10 ϕ	35	F40-1, F4-2
Repeated impact test	12 ϕ	147	F40-1, F4-2
Reversed twisting fatigue test	25 ϕ	190	T35-6, T21-14

40-1-S はこれに対応する同一試料のソルバイト処理であり、F4-2-F は Mn-Cr 系ばね鋼の初析フェライトを増して結果を見易くするための Mn-Cr 構造用鋼に対する熱処理で、F4-2-S はこれに対応する同一試料のソルバイト処理であり、

T4-3 T6-4 T9-5 T35-6 は焼入・焼戻しによつて軽度の硬さ勾配をえるための C ばね鋼・Si-Mn ばね鋼・Mn-Cr ばね鋼および C 構造用鋼に対する熱処理であり、

T4-7 T6-8 T9-9 T35-10 は高周波焼入・焼戻しによつて中間程度の硬さ勾配をえるための C ばね鋼・Si-Mn ばね鋼・Mn-Cr ばね鋼および C 構造用鋼に対する熱処理であり、

T35-11 T45-12 T55-13 T21-14 は浸炭・焼入・焼戻しによつて強度の硬さ勾配をえるための C 構造用鋼・C ばね鋼および Cr 肌焼鋼に対する熱処理である。

試片は精密に仕上げてからそれぞれ、秤量 25 t の引張試験機を用いての引張試験・秤量 4000 kg·cm の振り試験機を用いての 10 mm ϕ 試片に対する振り試験・秤量 40000 kg·cm の振り試験機を用いての 25 mm ϕ 試片に

対する振り試験・秤量 300 kg の引張試験機による曲げ試験・小野式試験機による回転曲げ疲労試験・松村式試験機による繰返衝撃試験・シエンク式 200 kg·m 試験機による繰返振り疲労試験・などを行なつた他補足的な 2, 3 の実験を加味した。

III. 実験結果および考察

1. 初析フェライトの影響

(1) 試片の組織

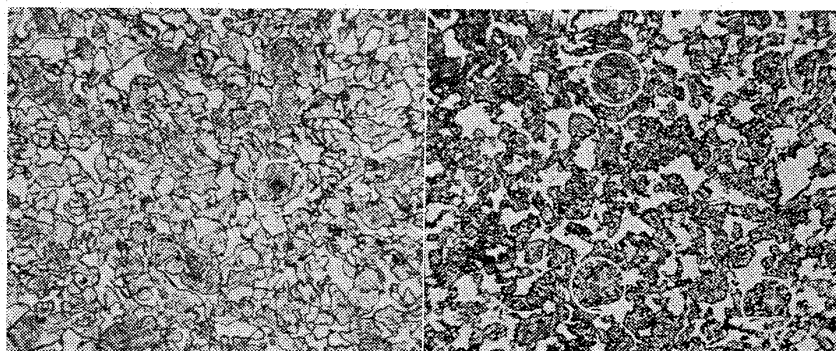
Table 3 の中 A₂ 点と A₁ 点の中間から焼入れた F40 および F4 は目的通り初析フェライトを伴つたマルテンサイトになつており、これを焼戻しすることによつて初析フェライトを含んだばね鋼のソルバイト組織をえたが、いま F40-1-F について例示すれば Photo. 1 のごとくである。

なお本実験においては、各試片に対する Hv 30 kg の硬さと、試験終了後に確めた試片有効部分の面積法によるフェライト量の測定値とによつて結果を整理した。

(2) 引張性能

Table 3. Heat treatment of specimens.

Kind of specimens	Normalizing (°C·mn·cooling)	Quenching (°C·mn·cooling)	Tempering (°C·mn·cooling)	—
F40-1-F F40-1-S F4-2-F F4-2-S	850·10·Air // // //	750·10·water 850·10·// 750·10·// 850·10·//	260~400·40·air 300~480·40·// 400~500·40·// 420~540·40·//	—
—	Normalizing (°C·mn·cooling)	Quenching (°C·mn·cooling)	Tempering (°C·mn·cooling)	—
T4-3 T6-4 T9-5 T35-6	850·10·Air // // //	780·10·water 750·10·oil 850·10·deterio- rated oil 830·10·water	480·40·air 460·40·// 450·40·// 375·40·//	—
—	Normalizing (annealing) (°C·mn·cooling)	High frequency induction hardening (KC/S·s·cooling)	Tempering (°C·mn·cooling)	—
T4-7 T6-8 T9-9 T35-10	850·10·furnace // 850·10·air //	500·35·water // // //	480·40·air 460·40·// 450·40·// 375·40·//	—
—	Normalizing (°C·mn·cooling)	Carburizing (°C·h·carburizing reagent)	Quenching (°C·mn·cooling)	Tempering (°C·mn·cooling)
T35-11 T45-12 T55-13 T21-14	850·10·air // // //	925·8·solid // // //	850·10·oil // // //	550·40·air // // 570·40·air



As-quenched microstructure
Hv 540
Martensite(H_{MV} 613)+ferrite

As-tempered microstructure
Hv 418
Sorbite(H_{MV} 473)+ferrite

Photo. 1. Examples of microstructure including proeutectoid ferrite. ×400 (2/3)

C鋼および Mn-Cr 鋼試料 F40-1・F4-2 を対象にし、25~35%の初析フェライトを含むものと均一なソルバイト組織のものについて行なつたばね硬度域に対する引張・衝撃・硬さ・などの試験結果は Fig. 1 に示したが、これによれば硬さを揃へた両鋼の引張強さは初析フェライトの有無に拘らず同一であるのに対し、伸び・絞り・衝撃値・などは初析フェライトの存在によつて低下している。そしてこの傾向は Mn-Cr 鋼より C鋼が著

しい。

(3) 振りおよび曲げ性能

初析フェライトの量を異にする F40-1 および F4-2 試料に対する振りおよび曲げ試験の結果は Fig. 2~3 に示す通りであつて、均一なソルバイト組織のものとの性能は両鋼種共ほとんど前報¹⁾の結果に一致しているが、これに初析フェライトが混つて来ると、その量の増加に伴つて、振りまたは曲げ比例限度・降伏点(0.3%)などの値が低下する。そしてこの傾向は Mn-Cr 鋼より C鋼が著しい。

(4) 曲転曲げ疲労性能

均一なソルバイト組織を有する試料 F40-1 および F4-2 の疲労限度は前報¹⁾で吟味したばね鋼の値と変わらないが、これに初析フェライトが混つて来ると、其の量の増加と共に疲労強度は低下する²⁾。然し Fig. 4 が上記の鋼に対する均一なソルバイト組織と初析フェライト25~35%を含む組織との S-N 曲線の対比であつて、この場合低下した疲労限度の値が従来の諸実験^{1)~3)}における疲労限度の数値分散より小さい点からみれば、硬さを

Hv 380~400 に焼入・焼戻したC系・Mn-Cr系のばね鋼ではソルバイト組織の中に上記のような多量の初析フェライトを介在させることが出来ないことと相俟つて、本来のばね鋼における初析フェライトがその疲労強度に大きな影響をおよぼすとは思えない。

(5) 繰返衝撃性能

Fig. 5は試料 F40-1 および F4-2 に対する繰返衝撃強度であつて、25~35%の初析フェライトがその耐衝撃性をかなり低下させていることを知り得るが、低下の程度はMn-Cr鋼よりC鋼に著しくあらわれている。

2. 硬さ勾配の影響

(1) 振り性能

Table 3による T4-3 T6-4 T9-5 T35-6 の焼入・焼戻試片・T4-7 T6-8 T9-9 T35-10 の高周波焼入・焼戻試片および T35-11 T45-12 T55-13 T21-14 の浸炭・焼入・焼戻試片について得られた種々の硬さ勾配並にこれを振つた時の比例限度の値は Fig. 6 およびこの中に数値として示した通りであるが、その値は硬さ勾配の著しい試片群の振り強度の低いことを示している。

こまこの結果を硬さ勾配を考慮に入れない前報¹⁾と比べて見ると、振りの場合においては硬さ勾配によつて生ずる試片内部の弱点が負荷にもとづく理論応力直線に接触した時の値以上の表面最大応力はえられず、負荷の増加は単に弱点の部分からの降伏を助長するのが Fig. 6 の値をえた理由と考へられるのであるが、その状況は Fig. 7 により一層明かである。

すなわち Fig. 7 は硬さ勾配を有する試片の中からその程度によつて選んだ T21-14 および T35-6 を対象とし、硬さ勾配曲線を一旦負荷限度勾配曲線に直し*て

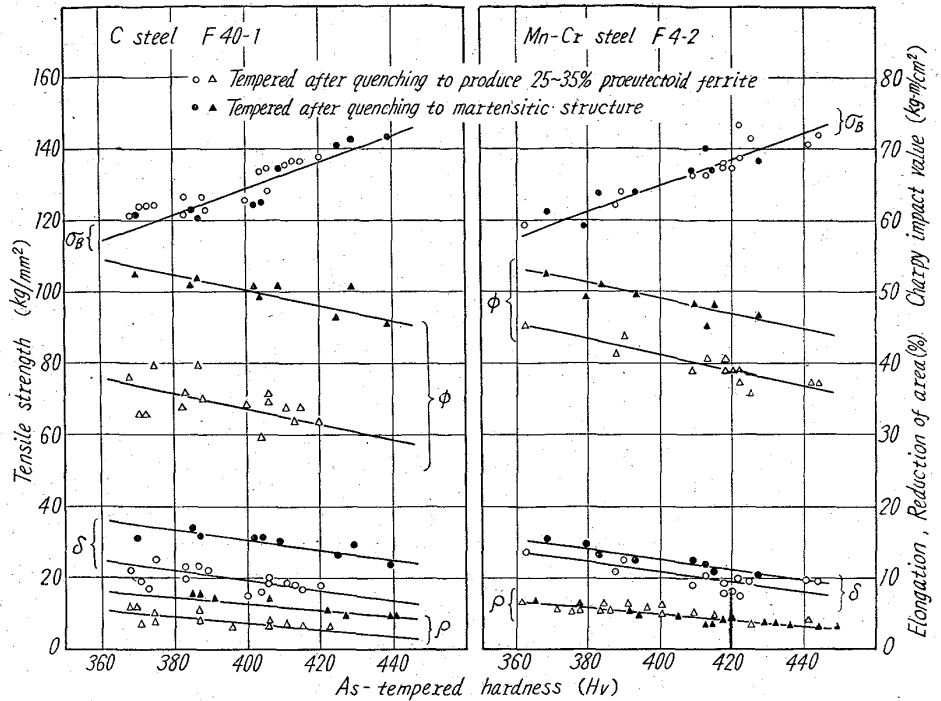


Fig. 1. Effect of the proeutectoid ferrite on mechanical properties of C and Mn-Cr steels.

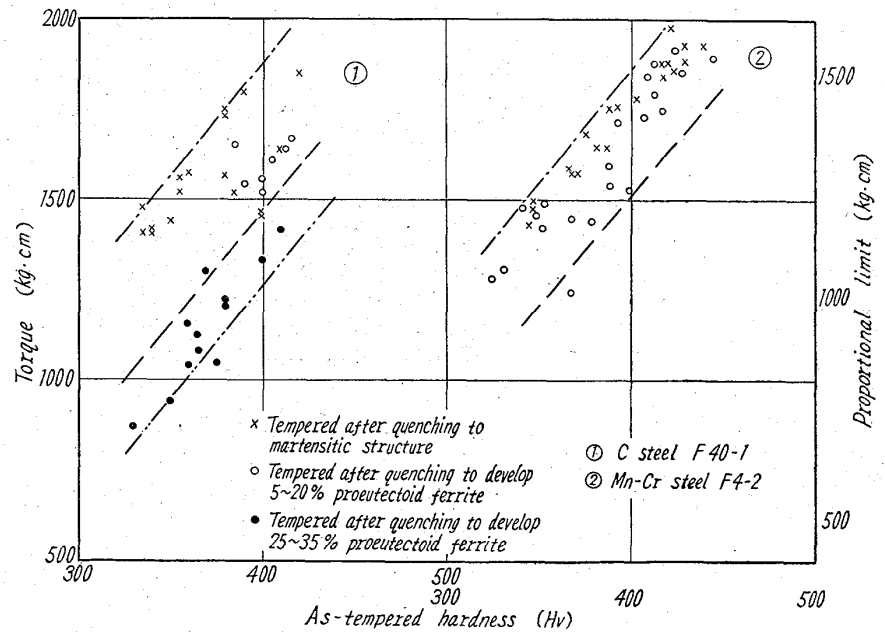


Fig. 2. The relation between hardness and 0.3% yielding torque or proportional limit¹⁾ for C and Mn-Cr steels.

から、その各部の値を 20~50 kg/mm² の間種々に想定した表面応力の場合の理論応力直線上の対応値で除したものであるが、本図によれば、T21-14 は表面から 2.6mm 内側の所に弱点が生じ T35-6 は表面が弱点となること、ならびにこれら弱点の位置は負荷の大小に関係なく、硬さ勾配曲線の形状によつて定まるものであることを知りうる。そこで

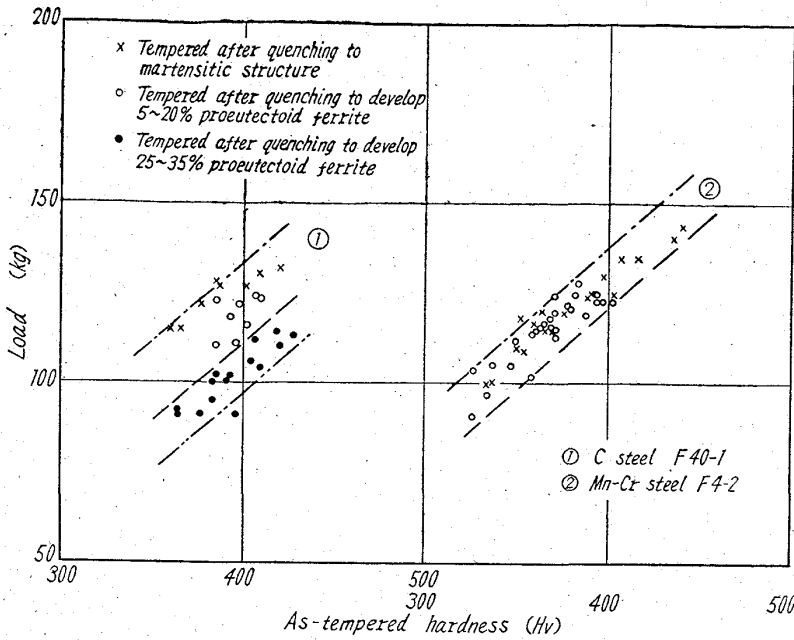


Fig. 3. The relation between hardness and proportional limit of bending for C and Mn-Cr steels.

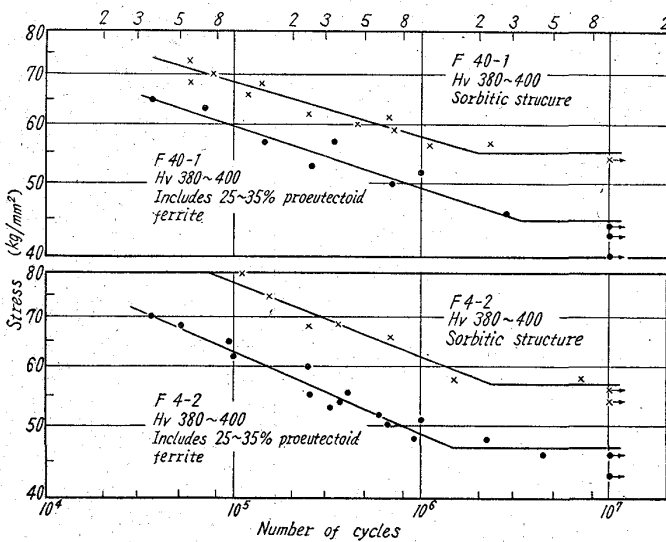


Fig. 4. Effect of the proeutectoid ferrite on the rotary bending fatigue strength of C and Mn-Cr steels.

鋼径 = d (mm) 表面から弱点までの深さ = t (mm)
 最大振り応力 = τ_{max} (kg/mm²)
 弱点の振り比例限度 τ_p (kg/mm)^{*}

と置けば $\tau_{max} = \tau_p \cdot d / d - 2t$ が成立し、これを種々の内部硬さと鋼径との組合せの下で図示すれば次の Fig. 8 のようになる。ここに XY は試片の各部が均一なばね硬さ Hv 400 に熱処理された場合各部に生じ得る最大振り応力の限界値であり、O は試片の内外部分が図

に示した値と同一硬さに熱処理されている場合に表面に生じうる最大振り応力であり、各曲線はそれぞれ数値を示した鋼径の試片に XY の値以上の応力を生じうるような表面硬化を横座標の深さだけ行なった場合の O と XY との関連である。したがって、内部硬さ Hv 250・径 20 mm の試片はそのままでは 31 kg/mm² 以上の表面応力は生じ得ないし、これに上記のような表面硬化を行なえば、その深さの増加に伴って OA に沿った最大応力の増加が起り、硬化域の厚さが 5.4 mm 以上ではこの値が一定となつて、変化は AY をたどるが、内部硬さが Hv 350 の場合は OBY をたどることになる。そして試片の内部硬さが Hv 400 の場合は OY、内部硬さが Hv 450 の

場合は OXY すなわち OX だけ表面軟化が起つても応力上差支えないと言ふようなことの説明が Fig. 8 によつてなされていると言ふ。

以上は振りにおける最大応力と表面硬化域の関連についての一般解であるが、表面硬化域が深いことは応力的に有利であるとの研究^{4)~5)}もあり、今次の実験でも Fig. 7 から求めた負荷限度勾配曲線* に理論応力直線を重ねた場合、両線が完全に分離しているものの比例限度は負荷限度勾配曲線が傾斜していない時と変りなく、両線が交差しているものの比例限度は著しい低下を示し、両線が接しているものの比例限度はこれらの中間に位することを知り得た²⁾のであつて、ばね鋼は内外部分は均一に熱処理しなければならない^{6)~7)}と言ふ従来の考へ方はかならずしも肯定出来なくなる^{8)~9)}。

(2) 繰返振り疲労性能

Fig. 9 は振り時において負荷限度勾配曲線と理論応力直線とが接近してはいるが、交差してはいない試片 T35-6 と、両線が深く交差している T21-14 についての繰返振り疲労強度を示したのであるが、いま T35-6 の疲労限度を、硬さ勾配を有しない試片で得た前報²⁾の値と比較すると、双方の間には違ひがないので両線の接近は疲労強度と関係のないことがわかるが、これに比べ T21-14 の疲労強度は明らかな低下を示している。なお T21-14 の疲労破壊は表面から約 1.5 mm 内側の部分から始まるのが認められた。

IV. 総 括

今次実験の結果を収約するとつぎのごとくである。

* 前報²⁾の Fig. 2 ならびに同時に示した剪断応力の計算式

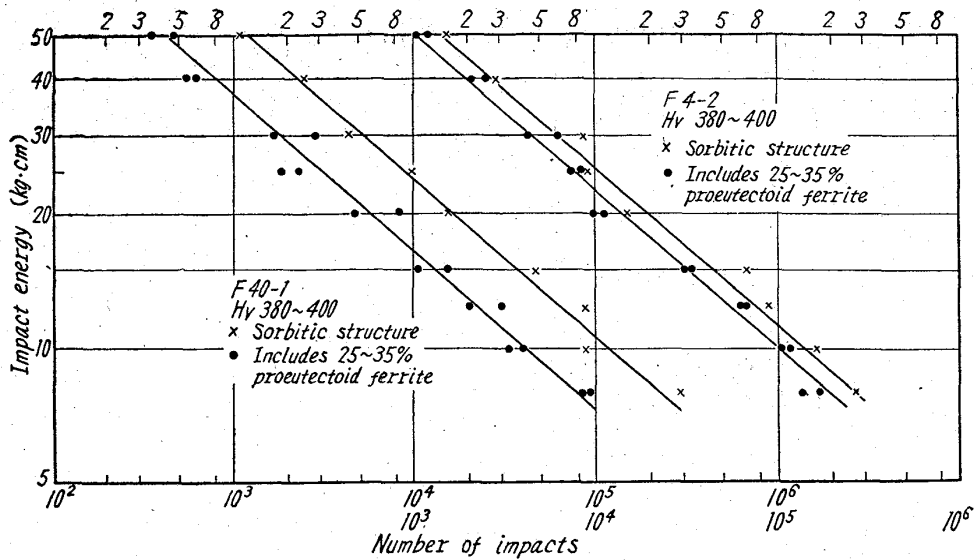


Fig. 5. Effect of the proeutectoid ferrite on the repeated impact strength of C and Mn-Cr steels.

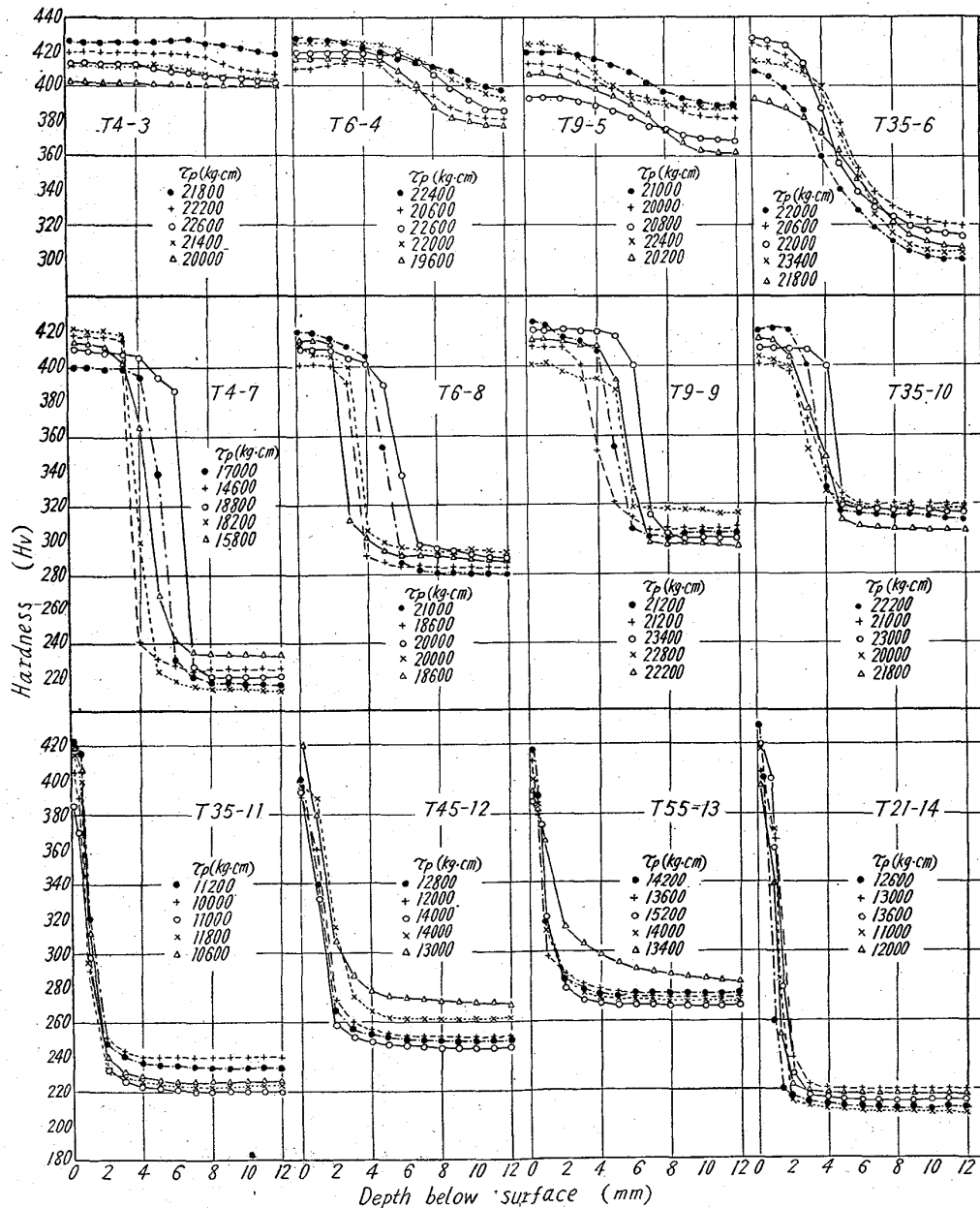


Fig. 6. Examples of hardness gradient and proportional limit in twisting.

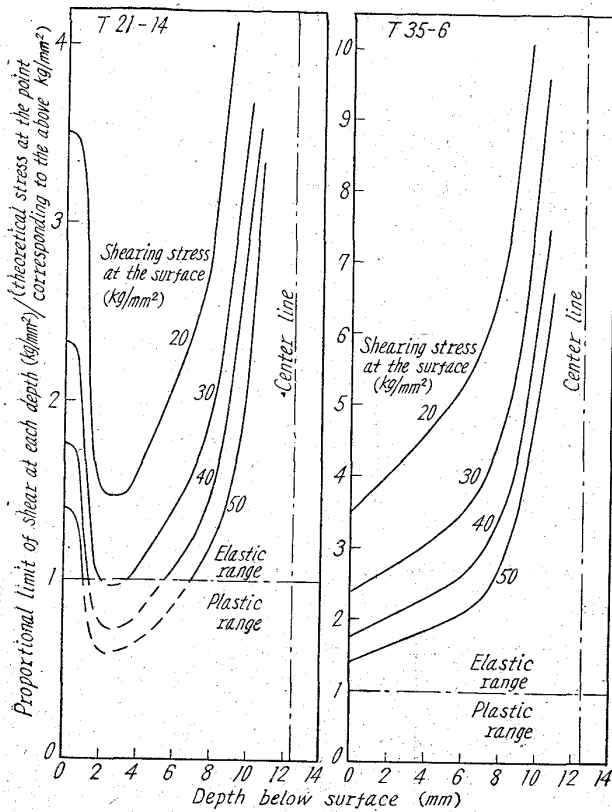


Fig. 7. Examples of the weakest point due to hardness gradient in bars.

1. 初析フェライトの増加と引張さとは深い関係がないようであるが、伸び・絞り・衝撃値などはこれによつて低下する。そしてその影響は Mn-Cr 鋼より C 鋼に著しい。
2. 振りおよび曲げにおける比例限度または降伏点は初析フェライトの増加とともに低下するが、その影響は Mn-Cr 鋼より C 鋼が甚しい。
3. 回転曲げ疲労強度は初析フェライトの存在によつて低下するが、その程度は少なく、鋼種による違いは明瞭でない。
4. 繰返衝撃強度は初析フェライトの存在によつて低下し、その程度は Mn-Cr 鋼より C 鋼に著しい。
5. 負荷限度勾配曲線と理論応力直線の関係は振り強度に深く影響し、接近するだけの時は差支えないが、交叉すれば値が急に低下する。そして両線の近接点は試片の降伏開始位置ともなり、振り強さの最大値ともなる。
6. 上記5の関係はそのまま繰返振り疲労強度にも当てはまり、降伏開始位置は疲労破壊の起点となる。

以上によればスラック焼入によつて生ずることのある初析フェライトや硬さ勾配はともにばね鋼の性質を害するが、影響の程度は性質個々について差異があるばかりでなく、限界値の明瞭なものもあることや、C 鋼と Mn

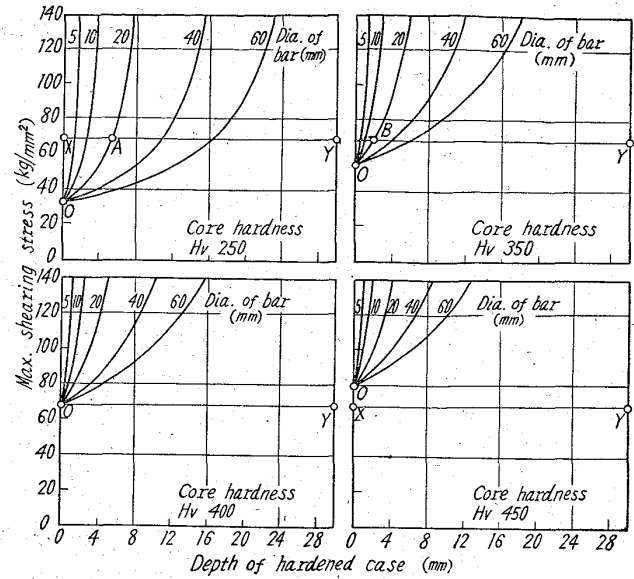


Fig. 8. The relation between maximum available stress and depth of hardened case in twisting.

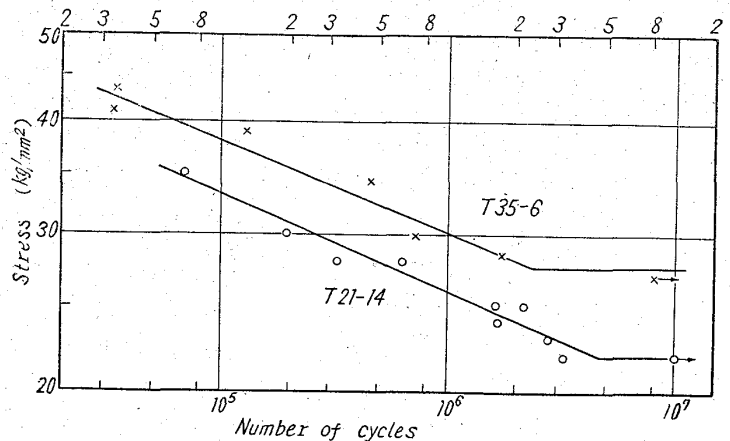


Fig. 9. The relation between hardness gradient and reversed twisting fatigue strength.

-Cr 鋼とでは常に後者への影響度が小さいことなどを結論することが出来る。(昭和36年10月寄稿)

文 献

- 1) 内山道良・関不二雄・上正原和典: 鉄と鋼, 47 (1961), 1163
- 2) 内山道良・上正原和典・関不二雄: 鉄と鋼, 47 (1961), 1535
- 3) E. HOUDREMONT, R. MAILANDER: Kruppsche Monatshefte, (1929), 40
- 4) 森本 毅: 自動車技術会論文集, No.7 (1960), 29
- 5) F. B. STULEN, H. N. CUMMINGS, W. C. SCHULTE: Machine Design, May (1961), 146
- 6) JIS: B2701 (1958)
- 7) JIS: B2702 (1956)
- 8) ASM: Metals Handbook, 1 (1961), 191
- 9) ASM: Metals Handbook, 1 (1961), 170