

スチールコード用鋼線の高強度化

Strengthening of Steel Cord Wire

高橋 稔彦^{*(1)} 落合 征雄^{*(2)} 田代 均^{*(3)} 大橋 章一^{*(4)}
Toshihiko TAKAHASHI Ikuo OCHIAI Hitoshi TASHIRO Shoichi OHASHI

西田 世紀^{*(5)} 樽井 敏三^{*(4)}
Seiki NISHIDA Toshimi TARUI

抄 録

スチールコードの高強度化を阻害するデラミネーションの発生を防ぐためには、塑性異方性の発達を抑えて強化することが必要で、このためにはパテンティング材の強化と伸線工程での加工硬化率を増加させることが有効であることを明らかにした。この方針に沿って過共析-Cr 鋼を開発し、3 600MPa 級のスチールコードの実用化に成功した。

Abstract

In order to prevent the generation of delamination which hinders steel cord wire from high-strengthening, it is necessary to restrain the development of plastic anisotropy in the steel cord wire. This paper makes it clear that, to attain this, strengthening of patenting materials and increasing of work hardening rate are effectual methods. On the basis of this findings, hypereutectoid-Cr steel has been developed, with the steel cord wire of 3600MPa grade being successfully put to practical use.

1. 緒 言

スチールコードは最も主要なタイヤ補強材として全世界で年間100万 t 以上使用されている。最初2 800MPa 級で出発したコード用のワイヤの強度は鋼中の介在物あるいは中心偏析低減技術の進歩に支えられて、1980年代の後半には3 400MPa 級にまで増加した¹⁾。その後、自動車の燃費改善の要請からタイヤの軽量化を目的にスチールコードの高強度化を求める声が急速に強まった。

著者らはこの要請に応じて、ワイヤの強度を3 600MPa から4 000 MPa、更には鉄の理想強度といわれる10 000MPa の1/2の5 000MPa をも視野に入れた開発を進めた。

スチールコードはピアノ線を冷間で伸線加工することによって強度を得るものなので、原理的には冷間加工量を増加させればいくらでも強度を増加させることは可能である。しかし現実の高強度化が困難なのは、強度の増加に伴ってワイヤの延性が低下しワイヤをコードに撚る工程で割れが生じ、撚ることができなくなるためである。スチールコードの高強度化の開発のキーは撚り加工性を向上させる技術の開発にある¹⁾。

著者らは撚り線工程における割れの発生機構の解明と抑制方案の開発を進め、3 600MPa ワイヤの開発、実用化に成功した。又、4 000 MPa 以上のワイヤの開発の目途も得つつある。以下に、この開発経

緯を述べる。

2. 実験方法

パーライト鋼の強化を図る上での基本元素であるCとCrの含有量を変えた鋼を供試鋼とした。表1に代表的な供試鋼の組成を示す。Mnは強化にほとんど効果がなく、一方で中心偏析し易くかつパーライト変態を遅延させるので0.3%と低く抑えた。真空溶解鋼、及び実炉鋼とも実機線材圧延で5.5mmに圧延した。

パテンティング処理は鉛炉を用いて行った。加熱は950°C×80秒に取り、鉛温度は550°Cから650°Cの範囲に取った。

伸線は線径が0.8mm以上は乾式で、0.8mm以下は湿式で行った。なお湿式伸線の伸線速度は600m/minである。

パーライトラメラ間隔は、1万倍で撮影したSEM写真10枚を用い

表 1 供試鋼の化学組成 (重量%)

鋼番	C	Si	Mn	Cr	P	S	Al
1	0.82	0.20	0.52	0.01	0.004	0.003	0.001
2	0.82	0.19	0.32	0.19	0.001	0.001	0.002
3	0.92	0.21	0.32	0.00	0.002	0.001	0.001
4	0.92	0.21	0.31	0.22	0.002	0.001	0.001
5	0.96	0.21	0.30	0.21	0.005	0.003	0.001

*⁽¹⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 部長 工博

*⁽²⁾ 技術開発本部 君津技術研究部 主幹研究員 工博
(現 鈴木金属工業㈱)

*⁽³⁾ 釜石製鐵所 製造部 主幹研究員 工博

*⁽⁴⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員

*⁽⁵⁾ 技術開発本部 君津技術研究部 主任研究員

切断法で行った。デラミネーションは捻回試験において降伏直後に鋼線の長手方向に沿って発生する割れである。割れ発生は捻回トルク曲線を測定することによって検出可能である。図1にデラミネーションが発生したことを示す捻回トルク曲線を示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 スチールコードの高強度化のためのキー技術

図2はスチールコードの捻り線工程における断線率とワイヤのデラミネーション発生特性の関係を示したものであるが、デラミネーションが発生するワイヤで捻り線断線が生じることが分かる。これは、スチールコードの高強度化のためのキー技術がデラミネーションの発生を防止する技術の開発にあることを示している。

3.2 デラミネーションの抑制指針とその根拠

スチールコードワイヤの強度は、パテンティング材の強度の増加及び伸線加工量の増加によって増加させることができる。図3は、デラミネーションの発生傾向に及ぼすワイヤの強化法の影響を見たものである。同じ強度を得るにしても伸線加工率の増加によらないでパテンティング材の強度の増加による方がデラミネーションの発生防止の点からは望ましいことが示されている。

これは高強度化方案設計のよりどころとなる重要な結果であるが、更に普遍的な抑制指針を確立するためにこの理由を解析した。

真歪1を超えて伸線されたワイヤは $\langle 110 \rangle$ 繊維集合組織を持ち、且つ各結晶粒は扁平形状を有している。図4にこの鋼線のすべり系を示した^{2,3)}。

さて振り加工を行うと、伸線方向と直角な面内の2つの $\langle 111 \rangle$ すべり系が活動して振り変形が始まる。しかしある結晶粒と隣接する結晶粒では変形する方向が異なるので、結晶粒間の compatibility を

保つためには一方の結晶粒が隣の結晶粒の方へ追従する回転変形が付加的に起きることが必要になる。鉄は $\langle 111 \rangle$ 方向にしかすべることができないので、回転変形は伸線方向に沿うすべり系の活動によって起きる。

ここで、伸線方向と直角な面内のすべり系で進む主変形に結晶粒間の compatibility を保つための回転変形が追従できないと、結晶粒間に亀裂が発生しデラミネーションに至る。

すなわち、伸線方向と直角な面内のすべり系での変形応力に対し

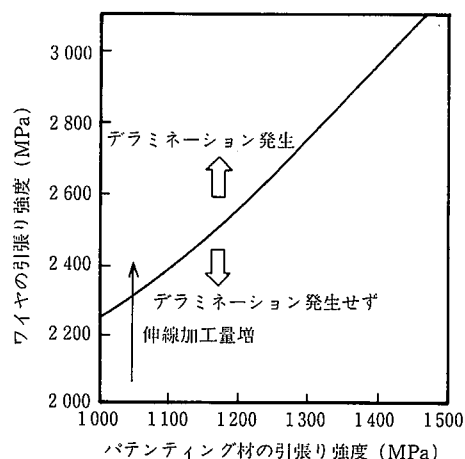


図3 デラミネーション発生強度に及ぼすパテンティング材強度と伸線加工量の効果

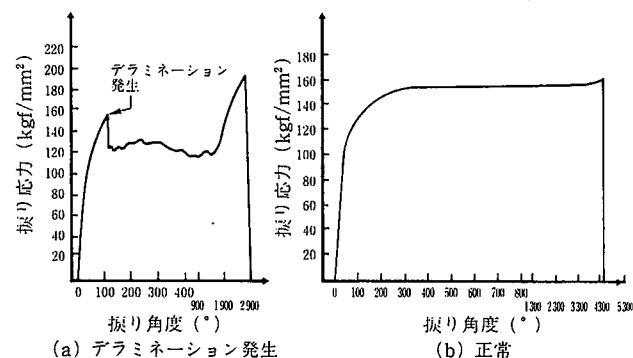


図1 捻回トルク曲線

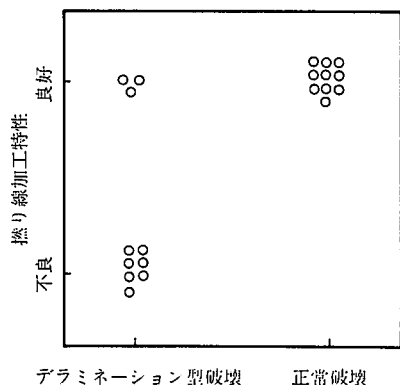
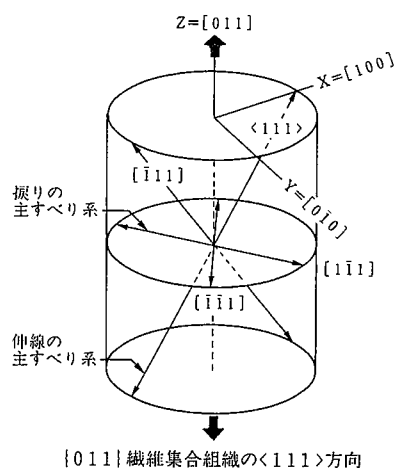
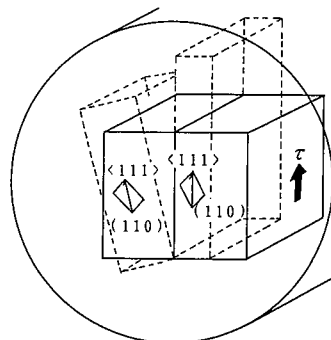


図2 スチールコードの捻り線断線とデラミネーション発生特性



{011} 繊維集合組織の $\langle 111 \rangle$ 方向



実線：変形前、点線：変形開始後

振り加工における Grain の変形開始の模式図

図4 $\langle 110 \rangle$ 繊維集合組織を持つ鋼線のすべり系と振り加工での結晶粒の変形挙動

て伸線方向に沿うすべり系の変形応力が高くなるほど、回転変形が追従し難くなりデラミネーションは発生し易くなる。

図5に伸線方向に沿うすべり系での変形応力を引張り試験の降伏応力(σ_y)で、又伸線方向と直角な面内のすべり系での変形応力を振り試験の降伏応力(τ_y)で評価して、それらの伸線加工の進行に伴う変化を示した。伸線方向に沿うすべり系の変形応力は伸線に伴う加工硬化によって著しく増加するのに対して、直角方向のすべり系の変形応力はそのすべり系が付加的な回転変形に使用されただけなのでわずかにしか硬化していない⁹⁾。従って図5に示されているように、同じワイヤ強度を得るにしても伸線加工量を大きく取って得たものほど τ_y に対して σ_y が高くなっている。図6はこれを τ_y と σ_y の關係に整理して示したものである。

同じ強度を得るにしても伸線加工率の増加によらないでパテンティング材の強度の増加による方がデラミネーションの発生防止の点から望ましいのは、このようにデラミネーションの発生が振り変形での各結晶粒の回転変形の追従のし易さに支配されるためである。

伸線加工度を大きく取ることが τ_y と σ_y のアンバランスを大きくするので、パテンティング材の強度を増加させることに加えてワイヤの加工硬化率を大きくすることもデラミネーションの抑制の点から好ましい。

3.3 パテンティング材の強度と加工硬化率を増加させる方法の開発

最初にパテンティング材の強度の増加及び伸線加工での加工硬化率の増加法について検討した。図7はパテンティング材の強度に及ぼすC量とCr添加の効果を示したものである。良く知られているようにCrの効果は大きい⁵⁾がC量の増加も硬化に有効で、575°Cでパー

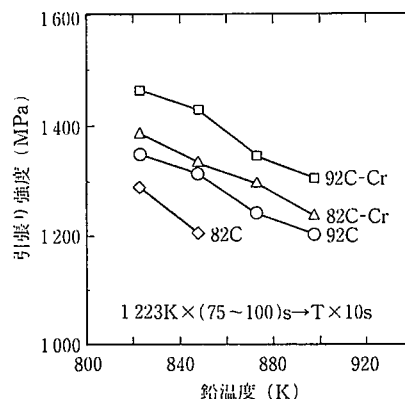


図7 パテンティング材の強度に及ぼすC量とCr添加の効果

ライト変態させた場合、C量を0.82%から0.92%へ増加させることによって約90MPa強度が増加する。C及びCrの作用はいずれもパーライトラメラ間隔を微細化させることによって⁵⁾。

パーライトラメラ間隔は伸線加工においてワイヤの加工硬化率を増加させるが、同じパーライトラメラ間隔の材料でも図8に示したようにC量が多くなるほど加工硬化率が大きくなる^{5,6)}。これはC量が増えるほどパーライトラメラ間隔は同じでも転位が運動するフェライト層の厚さが減少するためと考えられる。

このような結果のもとに著者らはCの増量とCrの添加を基本に高強度スティールコード用鋼材の組成を設計した⁵⁾。

図9に0.96%C-0.2%Cr鋼のパテンティング温度と強度及び組織の關係を示したが、変態温度が560°Cを下回ると粒界に疑似パーライト組織が現れる。この組織は粒界の延性を低下させ、デラミネーションの発生につながるの、これが現れないことを条件にするとこの材料で1500MPa程度がパテンティング材強度として実現できる最高強度である。これは現状の0.82%C鋼に比べると150MPa程度高い強度である。

図10に0.92%C-0.2%Cr鋼の変態特性を0.82%C鋼と比較して示したが、0.2%Crの添加であればほとんど変態を遅延させることはなく生産性上の問題はない⁵⁾。

C量が増えるほど特にオーステナイト域からの冷却速度が小さい場合初析セメントライトが生成することが心配される。図11は初析セメントライトの発生に及ぼすC量とオーステナイト域からの冷却速度

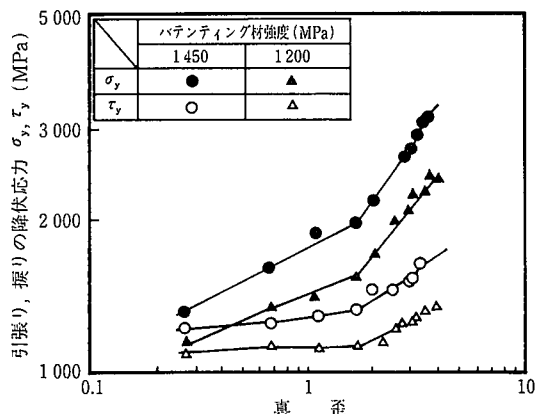


図5 伸線加工量の増加に伴う引張り及び振りの降伏応力の変化

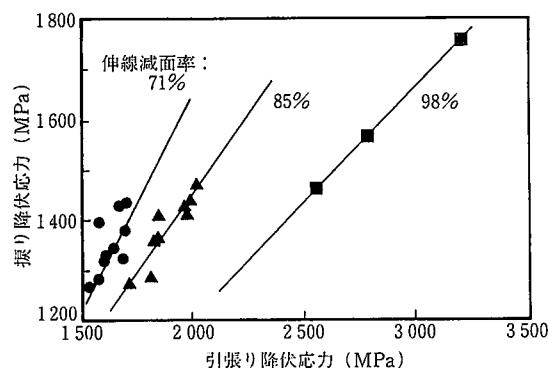


図6 引張り及び振りの降伏応力の關係

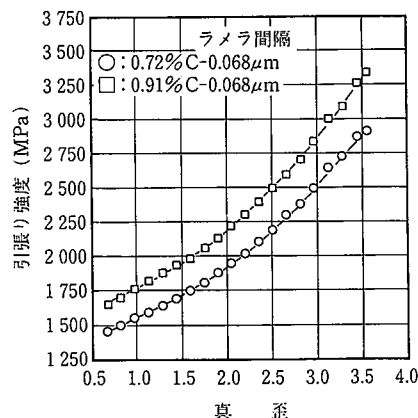


図8 パーライト鋼の伸線における加工硬化特性に及ぼすC量の効果

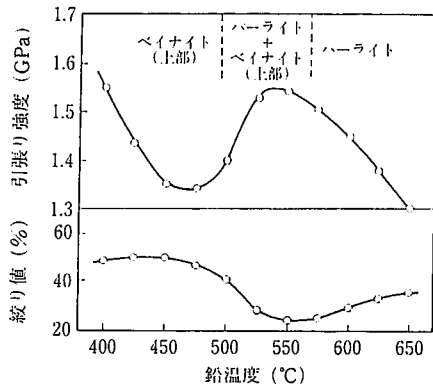


図 9 過共析鋼の強度と組織に及ぼすバテンティング温度の効果 (No.5鋼)

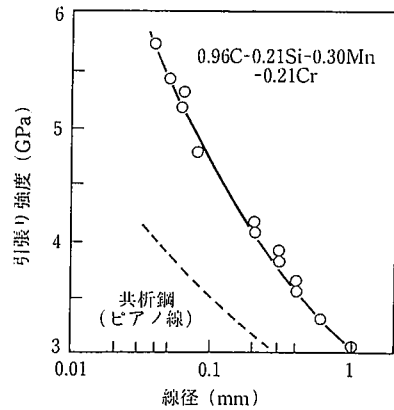


図 12 過共析鋼線の到達強度

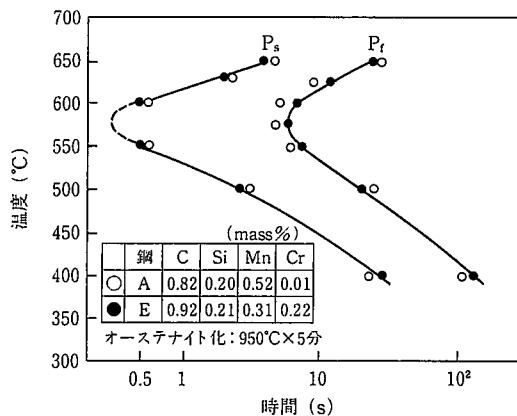


図 10 過共析-Cr鋼の変態特性

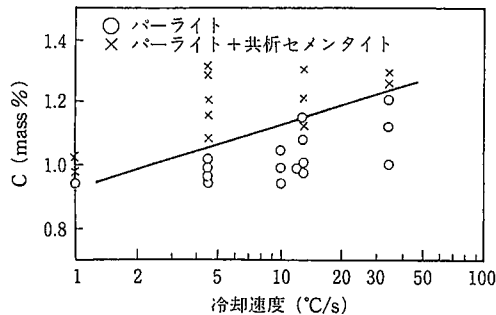


図 11 過共析Cr鋼の初析セメント析出に及ぼす冷却速度の効果

の影響を示したが、5.5mmの線材で10～15°C/秒の冷却速度を取ることのできるステルモ冷却ではCが1.1%まで増えても初析セメント析出の心配はない⁵⁾。

図12に0.96% C-0.2% Cr 鋼でデラミネーションが発生しないことを条件に実現できる強度と線径の関係を示した。80μmで5 000MPa、0.2mmで4 000MPaの強度が得られている。このうち3 600MPaのスティールコードは商品化され実際のタイヤに使用されている。

4. 結 言

スティールコードの高強度化のキーを握るデラミネーションは結晶粒単位の塑性異方性に起因すること、したがってこの異方性の発達を抑えつつ強度を増加させることが必要で、そのためにはワイヤの強化法としてバテンティング材の強度の増加と伸線加工での加工硬化率を増加させることが有効であることを明らかにした。更にこれを実現する手段としてCの増量とCrの添加が有効であることを見だし、高強度スティールコード用鋼として過共析 Cr 鋼を開発した。この材料によって3 600MPa スティールコードの商品化に成功した。今後もスティールコードの高強度化は鉄の限界強度を求めてやむことがないと考えられるが、その開発にあたっては従来にも増して経済性を重視することが求められる。デラミネーション抑制指針に沿って鋼材と加工技術の両面から具体的な方案の開発を加速し、要請に早期にこたえたい。

参 照 文 献

- 1) 高橋稔彦 ほか：新日鉄技報. (343), 86(1992)
- 2) Hosford, W.F. Jr. : Trans AIME. 230, 12(1964)
- 3) 高橋稔彦 ほか：新日鉄技報. (347), 22(1992)
- 4) 高橋稔彦 ほか：材料とプロセス. 4, 2039(1991)
- 5) 落合征雄 ほか：鉄と鋼. 79, 89(1993)
- 6) 樽井敏三 ほか：材料とプロセス. 6, 2062(1992)