

技術論文

棒鋼・線材の圧延ロール用ハイス材の特性評価 Characteristic evaluation of high-speed steel for steel bar and wire rod rolling



技術開発センター
商品・生産技術開発室
室長 博士(工学) 園田 晃大
Akio Sonoda

技術開発センター
商品・生産技術開発室
主任 木村 健治
Kenji Kimura

技術開発センター
センター長
博士(工学) 永吉 英昭
Hideaki Nagayoshi

要旨

当社では CPC プロセスによって棒鋼・線材工場の圧延用ハイスロールの製造を行っている。高品質で低コストな材料開発として、本稿では、含有される V、Cr、Mo、W 等の特殊元素を調整して作製した新たなハイス材の評価方法と結果について紹介する。新たに作成したハイス材は従来材と同等以上の casting、thermal processability、wear resistance を示した。新たに作成したハイス材は高品質で耐用に優れた圧延用ロールとしての適用が期待できる。

Synopsis:

FUJICO has produced a new type of high-speed steel roll for steel bar and wire rod rolling through the CPC process. With regard to the development of this high-quality and low-cost material, this paper presents the evaluation method and results of the new high-speed steel material, the high-speed steel composed of special elements such as V, Cr, Mo and W are adjusted. The castability, thermal processability, and wear resistance of the new high-speed steel are found to be equal to or higher than those of conventional materials. Thus, new high-speed steel is of the expected high quality and wear resistance required in rolling mill rolls.

1. 緒言

当社の CPC (Continuous Pouring process for Cladding) 法によって製造された、棒鋼・線材の熱間圧延用ロールでは、高温、高圧下での使用条件に対応するために、ロール表面に硬質で高温強度に優れたハイス層をクラッドしている¹⁾。さらに、適用する圧延スタンドの使用条件によって、CPC でクラッドするハイス層における V、Cr、Mo、W 等の特殊元素量を調整し、圧延条件に最適な材質を選定している。

特殊元素の配合比率により、ハイス材の特性は異なるが、それに加えてロール製造原価にかかわる材料費への影響も大きい。ハイス材の特殊元素量を増加させれば、一般に耐摩耗性は向上する傾向にあるが、製造

原価が高くなるデメリットもある。これに対して、当社では、特殊元素の配合比率の適正化を行い、耐摩耗性を損なわないような材質の研究開発にも取り組んできた。

本稿では、さらなる当社のハイス材のラインナップ強化のため、上記の特殊元素の配合比率の適正化を行った材質の改善として、新たなハイス材を作成し、特性評価を行った結果を紹介する。

2. 実験方法

2.1 供試材及び試験方法

供試材を作成するために、C、V、Cr、Mo、W 等の添加元素の調整を行い、Ar ガス雰囲気の高周波誘導炉

で溶解した。溶湯温度 1680°Cで溶解した後、10 分間保持後に砂型モールド (200×200×150mm) および金型モールド (内径 φ90×400mm) に鑄造した。鑄造時にはカントバック用の試料を採取して、添加元素の成分分析を行った。

供試材についての組成の特徴と基地中への固溶Cを表す C_{bal} を整理して Table 1 に示す。A 材と B 材は従来のハイス材であり、A 材の方が B 材と比べて、特殊元素の含有量が多い材料である。C 材～I 材は今回新たに設計した材料であり、製造原価の観点から特殊元素の含有量を B 材と同等として、材料費も同等となるような成分系にしている。

供試材は鑄造後に 850°Cで焼鈍を行い、焼き入れと焼き戻し処理を行った。その後、所定の試験片形状へ加工して特性評価を行った。

材料の評価は、まず、①CPCにおけるハイス層の鑄造性に大きく関わる凝固特性について行った。次に、②熱処理特性に影響するマルテンサイト変態の開始温度 M_s 点の測定を行った。 M_s 点の温度によっては、熱処理後の残留オーステナイト(γ)量も変わってくる。残留 γ が多いほど熱処理後の金属組織は不安定であり、硬度にバラツキが出てくるなど、製造性においても悪影響となる。また、実使用においても、残留 γ を含む金属組織は耐摩耗性に悪影響となるため²⁾、残留 γ は少ない方が望ましい。

これら①、②の評価を先行して行うことで、CPCでの鑄造性や、後工程である熱処理性、さらに実機適用時の影響を評価して、供試材の選定を行った。選定した供試材については、さらに追加の物性評価を継続して行った。なお、本稿では、新たに作成した C 材～I 材が、①、②の評価において従来材である B 材よりも改善し、追加の物性評価についても同等以上となることを指標としている。

Table 1 Chemical composition of sample materials

	No.	Composition	C_{bal}
Conventional	A	high alloy(High cost)	-0.25
	B	low alloy(Low cost)	0.2
Developed (Low cost)	C	Cr increase compared to B	0.01
	D	Cr increase compared to B	-0.19
	E	Mo,V,W adjustment compared to B	0.018
	F	Mo,V,W adjustment compared to B	-0.18
	G	Mo,V,W adjustment compared to B	-0.18
	H	Cr increase compared to B	0.02
	I	Cr increase compared to B	-0.1

2.2 凝固特性の評価方法

供試材を砂型モールド鑄造時に、凝固までの温度測定を行った。その際、材料の相変態温度を確認するこ

とで、液相線(LL)から固相線(SL)の凝固温度範囲 (以下 ΔT と記す) を求めた。

また、同様に供試材の ΔT を求めるために、示差熱分析でも相変態温度の測定を行った³⁾。φ5×5の試験片を Ar 雰囲気中で 5°C/min で 1500°Cまで加熱して、その後冷却した。冷却中の供試材と基準物質との温度差を測定して供試材の相変態時の反応を確認した。

2.3 熱処理特性の評価方法

評価には高周波誘導加熱方式を熱源とした金属材料の変態測定装置であるフォーマスター試験機を用いた⁴⁾。φ3×10の円柱状試験片にφ2で深さ3mmの熱電対溶着用の穴を空けた試験片を1050°Cから冷却し、熱膨張率の変化を測定することで M_s 点を求めた。測定は冷却速度を 3°C/min と 6°C/min の2通りで行った。

2.4 物性評価方法

供試材の金属組織観察は、3次元レーザー顕微鏡を用いて行った。さらに画像解析により炭化物の面積率を計算した。

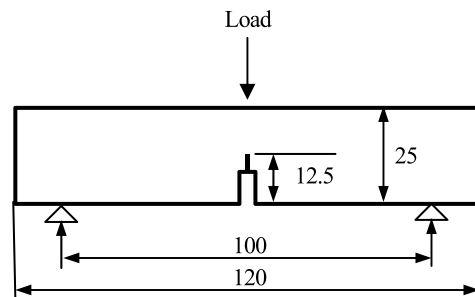
熱間摩耗試験は当社が開発した熱間摩耗試験機⁵⁾を用いて Table 2 の試験条件にて行った。

引張試験は JIS 4号試験片を用いて万能試験機を用いて測定を行った。

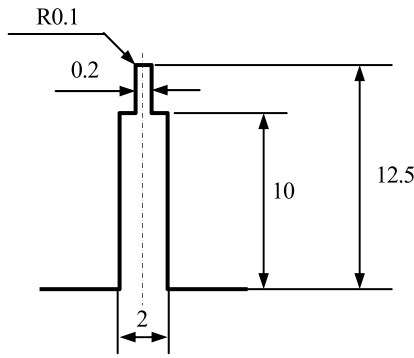
破壊靱性値(K_{IC})の測定は、Fig.1の試験片を用いた3点曲げ試験によって行った。

Table 2 Experimental conditions of wet rolling-sliding wear test at high temperature

Counterpart material	S45C
Size of counterpart piece	φ 100×15mmt
Size of test piece	φ 80×10mmt
Load	10kg
Rolling velocity	600rpm
Sliding ratio	5%
Temperature of counterpart material	600°C&800°C
Cooling conditions	Water cooling, 600ml/min
Test time	50min&15min



(a) 3-point bending test piece



(b) details of notched department

Fig.1 Dimensions of specimen for measurement of the fracture toughness value

3. 実験結果及び考察

3.1 凝固特性の評価

各供試材とも砂型への鋳造を行い、凝固までの温度変化を測定したが、その一例として今回新たに作成したC材の測定結果を Fig.2 に示す。測定開始温度は約 1500°Cからであり、まず 1360°Cで温度の降下が緩やかとなり、次に 1170°Cにおいて降温のカーブが変化していることがわかる。これは、それぞれの温度において相変態が起こっているためである。本合金系の凝固においては、初晶オーステナイトに続き、MC 炭化物、その後共晶の M₂C および M₇C₃ 炭化物が晶出した後、凝固が完了するが⁶⁾、Fig.2 では、まず 1360°Cにおいて凝固が開始(LL)して、1170°Cで凝固が完了(SL)したと考えられる。すなわち、ΔTは 190°Cということになる。

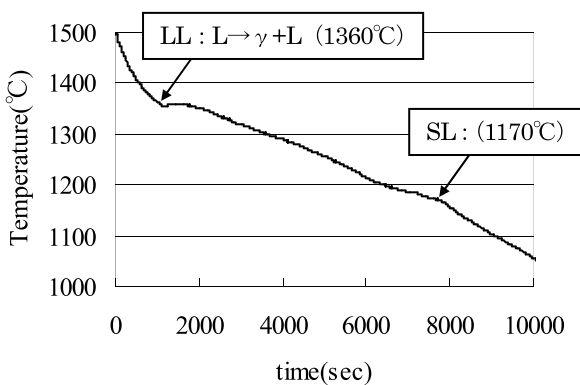


Fig.2 Result of solidification temperature analysis

さらに、示差熱分析を実施した一例としてC材の測定結果を Fig.3 に示す。発熱の反応を示すピークがいくつか現れており、温度が高い方から順番に、L→L+γ、L→γ+MC、L→γ+M₂C、L→γ+M₇C₃の反応を示すピークであると考えられる。Fig.3 においては、LL

は 1330°Cで SLは 1138°Cであった。すなわち、ΔTは 192°Cということになる。

同様に各供試材についても、砂型による鋳造での凝固温度の測定と、示差熱分析で読み取った ΔTの結果をまとめて Table 3 に示す。

鋳造においては、液相線(LL)と固相線(SL)間の凝固温度範囲 ΔTが大きいほど、最終凝固部に液相が残存したままとり、引け巣欠陥が出来やすく、ΔTが小さいほど鋳造性が良いといえる。ここでは、ΔTを比較することで、大まかにではあるが、各供試材の鋳造性を評価した。

今回作成したハイス材には、従来材である B材よりも ΔTを小さくし、鋳造性を改善するという指標がある。そのため、C材、H材、I材を改善候補材として、続いての熱処理特性の評価を継続して行うようにした。その他のサンプル D材、E材、F材、G材については、ΔTの改善がみられなかったため、これ以上の評価は打ち切った。

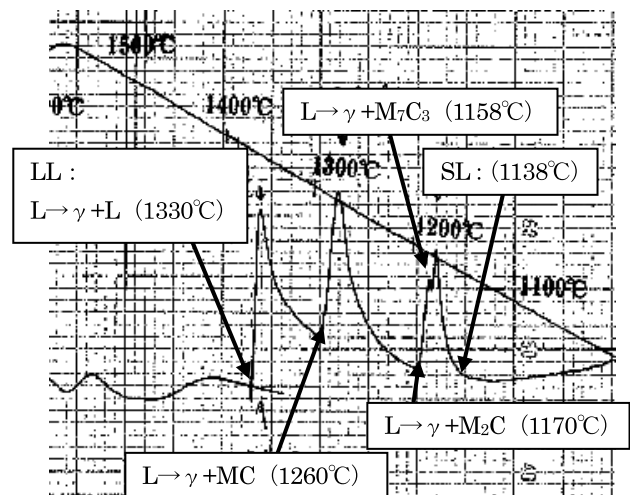


Fig.3 Result of differential thermal analysis

Table 3 Result of ΔT analysis

	No.	ΔT (°C)	
		Thermometry	Differential thermal analysis
Conventional	A	123	153
	B	223	210
Developed	C	190	192
	D	210	no data
	E	214	no data
	F	295	no data
	G	248	no data
	H	180	228
	I	no data	180

3.2 熱処理特性の評価

フォーマスター試験機により、Ms 点を測定した結果を Table 4 に示す。

C 材、H 材、I 材いずれの供試材でも従来材である B 材よりも Ms 点の上昇がみられた。C 材、H 材、I 材については、従来材の B 材よりも Cr を調整して増量している。李らの報告⁷⁾による高クロム系鋳鉄の Ms 点の計算式 (1) からは、Cr の増量は Ms 点を上昇する効果が期待でき、今回の測定結果とも一致する。

$$Ms(^{\circ}C)=19.36 \times (\%Cr/\%C)+112.4 \quad \dots\dots\dots(1)$$

従来材の B 材よりも Ms 点が増加すると、焼き入れと焼き戻し熱処理時の残留 γ の量は、従来材の B 材と比較しても C 材、H 材、I 材では少なくなると推定される。その結果、基盤が軟質と硬質の複層組織となる傾向が小さくなり、耐摩耗性の改善も期待できる。

追加の物性評価については、前項の凝固特性の評価結果と合わせて考慮した結果、C 材と I 材については継続し、H 材の評価は打ち切った。

Table 4 Result of Ms temperature analysis

	No.	Ms point (°C)	
		-3°C/min	-6°C/min
Conventional	A	216	250
	B	160	173
Developed	C	210	210
	H	233	254
	I	266	266

3.3 物性評価

3.3.1 ミクロ組織

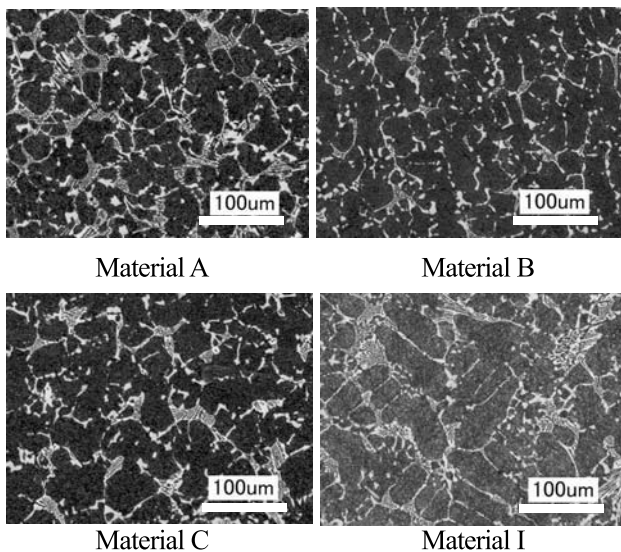


Fig.4 Typical microstructure of sample materials

Fig.4 に A 材、B 材、C 材、I 材のレーザー顕微鏡組織写真を示す。また、Table 5 にそれぞれの供試材の炭化物面積率を算出した結果を示す。従来材の A 材は V、Cr、Mo、W 等の炭化物を生成する特殊元素の含有量が多いため、全炭化物の量は他と比較しても多くなっている。また、今回作成の C 材、I 材については、従来材である B 材よりも Cr 量を増加させているため、ネットワーク状の M_7C_3 炭化物の増量が確認された (Table 5 では MC 以外の炭化物として記載している)。さらに、C 材と I 材とでは、I 材の方が Cr 量は多いため、 M_7C_3 炭化物の増加傾向もより顕著である。

Table 5 Image analysis result of microstructure

	No.	Carbide area (%)		
		All carbide	MC	Except for MC
Conventional	A	25.2	7.0	18.3
	B	18.9	10.8	8.0
Developed	C	22.7	10.1	12.5
	I	27.0	9.6	17.4

3.3.2 熱間摩耗試験

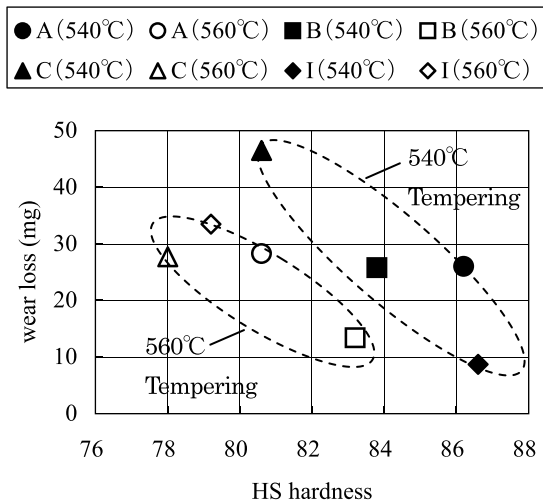
熱間摩耗試験は相手材の温度を 600°C と 800°C で行った。なお、試験は A 材、B 材、C 材、I 材で行い、それぞれの供試材では焼き戻し温度を 540°C と 560°C の 2 種類に変化させ、高硬度と低硬度に調整した試験片を用いている。摩耗量と供試材の硬度の関係を整理した結果を Fig.5 に示す。

600°C の試験では硬度に比例して耐摩耗性は向上する傾向がみられた。一般に、耐摩耗性は材料の硬度に比例する傾向がみられるが²⁾、この試験結果も同様であるといえる。

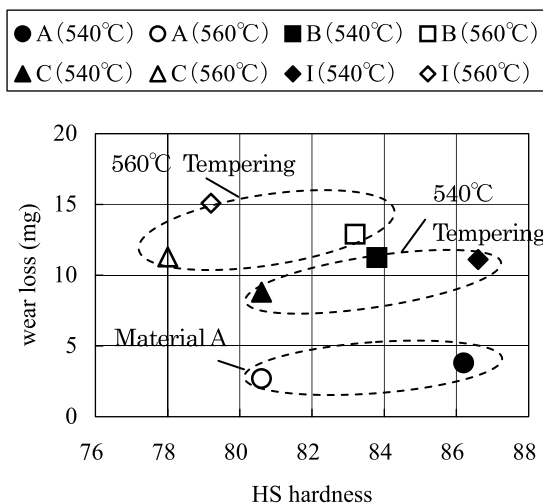
ただし、800°C の試験では、600°C の試験と違い、硬度と耐摩耗性の関連性は少なく、従来材 A が最も少ない摩耗量を示した。これは、従来材である A 材が高合金材料であるため、基地の高温特性を強化する元素であり、炭化物を生成する元素でもある Mo、W 等を多く含む影響が考えられる。固溶 Mo(W) は高温での転位の消滅を抑制し、基地の軟化を防ぐ効果があるため⁸⁾、高温での耐摩耗性に有効に作用するためである。

また、一般には炭化物量が増加するほど耐摩耗性も上昇すると考えられるが⁹⁾、Table 5 に示したように、従来材である A 材と今回作成の I 材との比較では、炭化物量は I 材の方が多いいにもかかわらず、800°C の試験の耐摩耗性は A 材の方が優れているという結果が得られている。ハイス材のように炭化物を含有する材料の高温での摩耗現象においては、単純に炭化物量を増やすだけでは耐摩耗性の向上へは影響が少なく、形成する炭化物の強化も重要となってくる場合がある¹⁰⁾。これは、熱応力などの要因によって、炭化物の破壊が発生

した場合、炭化物量が多いほど耐摩耗性が低下するためである。炭化物中のFe原子と、FeよりもよりCとの親和力の強いCr、Mo等が置換して濃化すると、炭化物の化学的結合力が増加し、炭化物の強化に有効に作用すると考えられる¹⁰⁾。I材は主にCrの添加によって炭化物量を増加しているが、A材の方はCrに加えてMoの添加によって炭化物量を増加していることが炭化物強化の一つの要因となっており、A材の優れた耐摩耗性に寄与したものと考えられる。



(a) at 600°C



(b) at 800°C

Fig.5 Result of hot wear test

3.3.3 基礎物性評価

引張強度 σ_B と破壊靱性値 K_{IC} の測定結果を Table 6 に示す。今回作成の C 材、I 材は、従来材である A 材、B 材と比較しても、引張強度および破壊靱性値ともに大きな差は見られず同等以上を示している。

ハイス材のように、金属組織中に硬質の炭化物を含む合金での破壊現象では、炭化物は介在物や欠陥と同様に破壊の起点となりやすい。引張試験は、ハイス材が破断する現象についての評価であり、つまりロールの耐事故性を評価しているともいえる。ハイス材の引張試験では、試験片に一樣に作用する応力は、金属組織中に分散している炭化物も含む全体に作用するため、仮に本来の強度を著しく減少させるような金属組織となっていれば、引張強度に大きく影響してくると推定される。従来材である A 材、B 材は既に多くの圧延用ロールとしての実績があり、今回作成の C 材、I 材は従来材と同等以上の引張強度を示すことから、経験的であるが、実使用に耐えうる耐事故性を持つものと考えられる。

また、実使用においては、圧延用ロール表面は圧延材との接触による加熱と冷却がなされており、ロール表面には応力勾配を伴う熱応力が発生する。そのため、破壊靱性試験は、擬似的にはあるが、熱応力によって圧延用ロール表面に発生するヒートクラック発生に関する評価といえる。ロール表面にヒートクラックが発生すると、圧延の応力によってクラックとクラックの連結が起きて、表層の微小な欠け落ち現象が起きる場合があるため、ロール表面肌の性状に悪影響を及ぼす。よって、本研究では破壊靱性試験をロール表面の耐肌荒れ性の評価という位置づけとした。引張試験の評価と同様に、今回作成の C 材、I 材は、実使用に耐えうる耐肌荒れ性を持つものと考えられる。

Table 6 Tensile strength and fracture toughness of sample materials

	No.	Tensile Strength	Fracture Toughness
		σ_B (MPa)	K_{IC} (MPa·m ^{1/2})
Conventional	A	1274	27.5
	B	1077	26.0
Developed	C	1258	25.4
	I	1169	27.2

3.4 実機ロールの製造について

以上のように、供試材について評価を行った結果を総合的に整理して Table 7 に示す。材料の铸造性として凝固温度範囲 ΔT 、熱処理性として Ms 点、耐摩耗性は熱間摩耗試験、ロールの耐事故性には引張強度 σ_B 、ロールの耐肌荒れ性には破壊靱性値 K_{IC} をそれぞれ評価

した結果である。高温での耐摩耗性については、特殊元素の含有量が多い A 材が優れているものの、今回作成の C 材、I 材は、従来材である B 材よりも铸造性に優れ、耐摩耗性についても同等以上であり、実機への適用が期待できる。

C 材と I 材を比較した場合、総合的には I 材の方が C 材よりも優位性があると考えられるため、最後に、I 材を用いた CPC による実機ロールの製作を行った結果について紹介する。なお、製作を行ったロールは、従来、B 材で製造していたものである。その結果、従来材である B 材よりも铸造性が良く、最終凝固部における欠陥発生傾向も減少し、高品質のロールが製造されることが確認できた。今後は、さらに実機での使用における耐摩耗性の評価を行っていく。

Table 7 Total evaluation of sample materials

Characteristics		Material		Roll		
		cast	Heat Treatment (and Matrix Wear)	High temperature Wear	Failure	Surface Characteristics
evaluation		ΔT	Ms	Wear Loss		σ_B
				600°C	800°C	
Conventional	A	L/H	◎	○	◎	○~◎
		H/H	◎	○	◎	
	B	L/H	△	◎	△	
		H/H	△	○	○	
Developed	C	L/H	○	○	○	○~◎
		H/H	○	△	○	
	I	L/H	○	○	○	
		H/H	○	◎	△	

L/H : Low Hardness , H/H : High Hardness

参考文献

- 1) 姜、園田、木村、永吉：フジコー技報 No.15 (2007) 38
- 2) 新井、小松：鉄と鋼、59-6(1973) 738
- 3) 野田、三谷、村田、湯川：鉄と鋼、68-5(1982) 239
- 4) 栗花：東北工業技術試験場 先端技術を拓く (1988) 52
- 5) 李、坂本、斉藤：フジコー技報 No.3(1995) 26
- 6) 橋本：フジコー技報 No.13(2005) 25
- 7) 李、坂本、斉藤、笹栗、松原：フジコー技報 No.5(1997) 11
- 8) 高橋、浅野：鉄と鋼、69-5(1983) S385
- 9) 野口、渡辺、榎並：鉄と鋼、71-13(1985) S1560
- 10) 市野、石川、片岡、豊岡：鉄と鋼、89-6(2003) 680

4. 結論

熱間圧延用ハイスロールの材質開発として、ハイス材の特殊元素を変化させ、材料の铸造性、熱処理性、耐摩耗性と他の機械的物性について評価して、得られた結果は次の通りである。

- 1) 铸造プロセスである CPC 法での铸造性を凝固温度範囲 ΔT で評価した。 ΔT が小さい新たに作成したハイス材で、铸造性が優れることを実機の製造においても確認できた。
- 2) 熱間摩耗試験では、特に高温度 (800°C) になると基地の高温特性と炭化物を強化する元素である Mo、W 等を多く含むハイス材が良好な結果が得られた。
- 3) 新たに作成したハイス材は従来のハイス材の特性を維持しつつ、製造性に優れた材料として、熱間圧延用ロールへの適用が期待できる。