

(vi) オースフォームドベイナイト鋼

オースフォームドベイナイト鋼はNbを添加することで未再結晶域圧延を利用する従来のTMCP法をより強化したもので、オーステナイト域での強圧下加工によって多くの転位を導入し、その転位を圧延後の急冷で変態後まで引き継ぐことによって高強度化させる。また同時にベイナイト組織のパケットサイズが微細化されるため靱性も向上する。

(vii) ニッケル系高耐候性鋼板

0.05 mddを超える飛来塩分量の、いわゆる海浜地域でも使用可能な新耐候性厚鋼板が開発されている。これらの厚鋼板の海浜地域における優れた耐候性の詳細なメカニズムについては、特にNi添加の有効性が注目されている。Niの添加は鋼板表面に形成されるさびを緻密化し、その結果Clイオンが地鉄界面へ侵入することを抑制する。

耐候性鋼を裸で使用する場合、保護性さびが形成されるまでの期間は、さびの色調や均一性の点で外観は必ずしも良好でない場合がある。また、腐食により生成した鉄イオンを含む雨水はコンクリートなどの着色を引き起こす場合がある。この汚染の軽減と外観を良好にし、実用上優れた保護性さびを形成可能とするさび安定化処理技術が開発され始め、最近では保護性さびを早期に形成するさび安定化処理技術も開発されている。

(viii) 厚鋼板および溶接継手の疲労強度向上技術

鋼の降伏強度を上昇させても、それを用いた溶接継手の疲労強度は一般には向上しない。このことが疲労設計される溶接構造物への高強度鋼適用の妨げになってきた。最近、溶接金属の変態膨張を利用した疲労強度向上技術が開発されている。

通常の溶接材料を用いた場合、溶接金属は500℃程度で変態膨張し、その後の温度低下に伴い熱収縮するため、室温で溶接部は引張残留応力となる。一方、溶接材料の変態開始温度(Ms点)を室温付近に制御すると、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態にともなう膨張過程で冷却が終了するので溶接部には圧縮の残留応力が導入される。この効果にもとづく溶接部の疲労強度が向上する溶接材料が開発された。

また、結晶粒の微細なフェライト・ベイナイト2相組織鋼を利用して疲労き裂進展速度が従来鋼の約1/2となる疲労亀裂進展抑制鋼が開発されている。この疲労き裂進展速度抑制のメカニズムとして、相境界でのき裂進展抑制などが挙げられている。

(ix) 形状制御厚鋼板

LP鋼板(Longitudinally profiled plate)は、厚鋼板長手方向で板厚を変化させており、これをフランジまたはウェブに使用することにより、さらに合理的構造とすることが出来る。LP鋼板を使用することにより、鋼材の重量が低減され

るだけでなく、接合部の等厚化によりフィラープレートやテーパー加工の省略など、作業性も改善できる。LP鋼板は厚板圧延時に厚鋼板長手方向の厚さを変化させるため、高度な油圧式板厚制御技術が必要である。またTMCPの適用も可能であり、種々の長手方向断面形状が製造可能となっている。

(x) 厚板の新製造プロセス

加速冷却はTMCP技術の根幹のひとつをなす技術であり、1980年に実用が開始されたが、最近、熱伝達係数の高い核沸騰現象を冷却開始と同時に実現する水冷却方式が実用化され、高い冷却能とすぐれた冷却停止性能が実現した。

また、2004年には世界ではじめて厚鋼板のオンライン加熱設備が開発・実用化され、オンラインでの焼き入れ焼き戻しの連続熱処理が可能となり、またオンライン組織制御の自由度も拡大された。

4.2.3 機械構造用鋼**(1) この10年間の研究開発動向**

自動車部品などに使用される機械構造用鋼の最近10年間の動向は、地球環境問題、トータル製造コスト低減と安全性確保を主な要求として検討されてきた結果の反映である。地球環境問題としては、自動車からのCO₂ガス排出量の抑制(燃費改善)が最も重要な課題として認識されており、部品の小型軽量化に必要な鋼材の高強度化が課題となっている。高強度化を阻害する原因が部品の使われ方と製造方法によって異なるため、具体的な要求強度と特性も、部品によって異なる。従って、それぞれ部品毎を対象として研究開発が行われてきた。環境問題の一環として、スクラップで問題となる有害物質低減も求められている。これに伴い、快削鋼中の鉛を削減する鉛フリー快削鋼の開発も活発に行われ、一部採用されたと報告されている。トータル製造コスト低減可能な部品製造方法がいくつか提案されており、それに適した鋼材の開発も行われた。高強度化などの高特性化を追求する研究開発においても、トータル製造コストのミニマム化が強く要求されたことも、最近10年間の傾向として特筆できる。

以下に最近10年間の機械構造用鋼に関する主なトピックスを記述する。全ての部品、鋼材についての記述は出来ないが、全体感を把握する一助になろう。

(2) ばね鋼

自動車のサスペンションに使用される懸架ばねも、燃費改善を目的として高強度化が図られてきた。設計最大せん断応力は、1980年に980 MPaであったのが、1987年には1080 MPaまで高強度化され、さらにその後の約10年間の間に約1200 MPa程度まで向上された。これに伴い、鋼材の引

張強度も1900 MPaを超えるものが開発された。従来、大気疲労特性と耐へたり性が重要な要求特性として認識されていた。これらの特性は材料強度の上昇に伴って一般的に上昇していたが、最近10年の高強度化には、新たな観点が必要となった。路面凍結防止のために塩分を含んだ融雪材の撒布が増加したことにより、塩分による懸架ばねの腐食、および腐食疲労が課題になってきた。腐食疲労は、鋼材強度を上昇させるに伴い低下することが一般的なので、従来の方法では対応が出来なくなり、活発な研究開発が実施された。その結果、腐食疲労を改善させるためには、起点となる腐食ピットの低減と、耐水素脆化特性の向上が有効であることが判明した。この知見をベースとして、生成錆を非調質化して腐食ピットを低減するとともに、微細析出物の水素トラップ効果付与による水素脆化低減可能な成分調整がなされ、新鋼種が開発・実用化された。実用化から10年が経っていない段階においても、国内の懸架ばねの過半数が腐食疲労を考慮した高強度鋼に置き換わっている。

弁ばねはエンジンの吸・排気弁をカムの揚程曲線通りに運動させることを目的とした部品である。高速回転化、燃費低減のためのエンジン小型化などの動向により弁ばねの小型・高応力設計が指向されている。弁ばねはエンジン内で使用されるために、懸架ばねと異なり腐食疲労はそれほど重要視されないが、1億回程度の数多い繰返し荷重を受けるので、長期間の信頼性が要求される。従って、高強度化を図るためには、ばね素線の高強度化やショットピーニング・窒化などの表面処理に加え、疲労強度を低下する非金属介在物の低減・小型化が重要になる。介在物の低減・小型化には介在物組成を制御し、圧延過程で展伸・小型化しやすい低融点化が効果があることが知られている。制御方法の高度化などにより、過去10年間で最大介在物径が $1/2 \sim 2/3$ に低減している。これらの効果により、10%以上の疲労強度向上が得られ、高強度材の採用が広がっている。

(3) ボルト用鋼

ボルト用鋼においても高強度化の検討が盛んに実施された。その結果、1980年代に開発されたマルテンサイトベース高強度ボルト用鋼が自動車用に13Tとして、および建築用に14Tとして採用された。開発された高強度鋼は、メーカーによりいくらかの成分的な違いがあるが、共通点として、①高温焼戻しによる粒界炭化物の無害化、②高温焼戻しでも強度を確保するためのV、Moなどの合金炭化物析出による二次硬化の活用、③これら合金炭化物の水素トラップサイト効果としての活用、④耐食性向上、を複合化して活用している。

また、従来のマルテンサイト組織ではなく耐水素脆化に優

れている伸線パーライトを活用した1600 MPa級用鋼も実用化されたことは、エポックメイキングといえる。冷間伸線加工により伸線された微細組織や高密度の転位が水素拡散やき裂進展を抑制することが耐水素脆化向上機構と考えられている。冷間加工性の向上のためのボルト形状の改善などが実施されて実用化に至った。

この10年は、上記懸架ばねやボルト用鋼において問題視された水素脆化についての研究が盛んに行われた時期でもあった。科学技術振興調整費総合研究として、「構造材料の環境脆化における水素の機能に関する研究」が1998年から5年間実施されたことと、科学技術庁・金属材料技術研究所（現：独立行政法人物質・材料研究機構）が1997年に超鉄鋼プロジェクトを立ち上げ、耐水素脆化特性に優れた高強度鋼をテーマの一つに取り上げたことが特筆できる。上記の、高強度ボルト用鋼が実用化された理由の一つとして、水素脆化（遅れ破壊）に対しての理解が深まり、信頼性が増したことも挙げられる。

(4) 歯車・CVT用鋼

自動車の変速機などに使われる歯車は、大部分が肌焼鋼と呼ばれる0.2%程度の炭素含有鋼を浸炭焼入れして製造されている。最近、変速機としての使用が増加しているCVT（Continuously Variable Transmission）のプーリー用にも、肌焼鋼が使われることが多い。歯車の高強度化には、歯元曲げ疲労、歯元衝撃強度と歯面強度の観点がある。歯元曲げ疲労はショットピーニングの採用、浸炭異常層を低減するMoの添加により大幅に向上したので、この10年間は歯面強度向上に関する研究開発が盛んに行われた。転動中に表面温度は300℃程度まで上昇するので、鋼材の軟化が起ると、ピッチングなどの表面損傷が発生しやすくなる。従って、焼戻し軟化抵抗を増大させることが耐ピッチング寿命向上に効果があることが判明し、Si量の増大などで耐高面圧歯車用鋼が開発された。

肌焼鋼においても、トータル製造コスト低減の要求が強く、軟化熱処理省略を狙った鋼材も開発された。この目的のためには、圧延材強度の低減が必要となる。この目的のために、成分的にはSiとMnの低減を行うと同時に、不足する焼入れ性を補うためにボロンを添加された。さらに、制御圧延により圧延強度低減が図られている。ボロン添加には衝撃値の向上効果もあり、この効果を活用した高衝撃強度肌焼鋼も開発された。これは、ボロンが燐（P）の旧オーステナイト粒界への偏析を抑制することによる浸炭層の粒界強度向上によると考えられている。

従来のガス浸炭に代わって、減圧（真空）浸炭技術が欧州を中心として採用が広がりつつある。減圧（真空）浸炭では、

通常950℃以下で行われるガス浸炭よりも容易に浸炭温度を上昇することが出来るなどのメリットが多い。浸炭温度上昇は、数時間以上かかる浸炭時間を短縮可能なメリットがある。ただし、高温浸炭ではオーステナイト結晶粒が粗大化し、衝撃特性低下や焼入れ歪増大などの弊害を生じる可能性が高い。これより、1000℃以上の浸炭においてもオーステナイト結晶粒の粗大化を防止する鋼材の開発が各社盛んに実施されている。今後、減圧（真空）浸炭技術の導入により、今後数年間の間に肌焼鋼の世界が大幅に変化する可能性もある。

(5) 快削鋼

地球環境問題より、スクラップ処理とリサイクル性改善の検討が盛んに行われている。その代表例として、被削性改善のために快削鋼中に広く添加されている鉛の削減の検討がある。国内自動車メーカーは使用済み自動車のリサイクルに関する自主行動計画を1996年に発表している。それによると、バッテリーを除く鉛の使用量を2000年末までに1/2以下、2005年末までに1/3以下までに低減することになっている。EUにおいても、規制を強化する動きが見られたことから、鉛フリー快削鋼の研究開発が各社で実施され、一部実用化されたとの報告がなされている。

鉛フリー化の手段としては、硫黄の増量添加と、硫化物系介在物の形態制御が最も一般的な手法として報告されている。Ca、MgやTi添加による硫化物の形態制御により、更なる被削性改善、並びに硫黄増量添加により低下する機械的特性の改善が可能になると報告されている。自動車用部品としては、クランクシャフトで採用されている。一般部品に多用される低炭素硫黄複合快削鋼の鉛フリー化においては、計算状態図を活用して硫化物系介在物の大型化をCr添加で試みた結果が報告されている。また、硫化物に頼らない新しい手法も検討され、鉛と類似金属のビスマスの活用、黒鉛化鋼、BNの活用などについても研究開発され、一部実用化されているとの報告もある。

(6) 非調質鋼

Vの析出強化を活用し、熱間鍛造まま、あるいは圧延ままで調質材と同等の強度を得ることが可能な非調質鋼が、自動車のエンジン部品であるコネクティングロッド（以下コンロッド）などで広く使われている。この鋼種においては、トータル製造コストダウンが重要な課題として検討されてきた。例えば、コンロッドはクランクシャフトに組み付けるために、大端部がロッド部とキャップ部に分割されている。従来、ロッド部とキャップ部を個別に熱間鍛造、機械加工されていたが、ロッド部とキャップ部の噛み合わせの整合性が重要であり、そのための丁寧な機械加工が不可欠になり、コストアッ

プの要因になっていた。この問題を解決するために、ロッド部とキャップ部を一体で成形後、破断分離する「かち割りコンロッド」が欧州や米国から採用され始めた。延性の低い材料が使用されるので、破断後は脆性破面を呈し、破断後に破面同士を再度組み合わせることが出来る。破面の凹凸により合わせ面の位置合わせが容易に出来るので、従来手法で必要であった位置合わせのための機械加工が省略でき、コストダウンが可能となった。欧州と米国では、当初、粉末冶金法で製造されたコンロッドや高炭素鋼材に適用されていた。しかし、日本国内においては、鍛造コンロッドが主流であることと、高炭素鋼では被削性が低下することにより、新たな鋼種の開発が要望されていた。被削性改善に炭素濃度を低減し、強度確保のためにVの増量添加による析出強化、PやSi添加による固溶強化を図った鋼材が提案された。この手法により良好なかち割り性と高強度化の両立が可能と報告されている。

(7) 軸受鋼

軸受に使用される鋼は、高炭素クロム鋼系、肌焼合金系、耐食、耐熱系があるが、高炭素クロム軸受鋼（主としてSUJ2）が最も多く使用されている。本鋼種は、約1世紀前に欧州で基本成分が確立されてから、合金組成はほとんど変わっていないが、転動疲労寿命は、鋼中の酸化物系介在物が、真空脱ガス処理技術の導入などにより、大幅に低減・小型化されたことにより大幅に改善された。最近10年間も同様の傾向であり、酸素量で5ppm以下の制御が当たり前になっている。

4.2.4 耐熱鋼、耐熱材料

(1) 耐熱鋼

高温で長時間使用される耐熱鋼の開発は、火力・原子力発電、化学プラント、廃棄物発電、自動車等の産業の発展の鍵を握っている。この10年間、CO₂削減、省資源、ダイオキシン等の環境リスク物質の低減化が強く求められた社会的背景の下、より高温での使用を可能とする高強度高耐食耐熱鋼開発、及び、長時間クリープ強度評価や寿命予測といった材料評価の両面で、我が国では欧米をはるかに凌ぐ大きな進展が見られた。

火力発電分野では、それまでのフェライト系耐熱鋼の使用上限温度は約620℃であったが、650℃の超々臨界圧（USC）発電プラントで長時間使用可能なボイラ系大径厚肉鋼管（パイプ）用およびタービン用の高強度9-12Crフェライト系耐熱鋼の研究開発が進められるとともに、ボイラ過熱器管（チューブ）用オーステナイト系耐熱鋼では18Cr-8Ni系から20Cr-25Ni系へ、さらに高Cr-高Ni化とW等の添加により