

外 99-10

早稲田大学審査学位論文(博士)の要旨  
早稲田大学大学院理工学研究 2998

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

ガス浸炭鋼における表面硬化組織の形成と機械的性質に関する研究

Formation of case microstructures and mechanical properties in  
gas - carburized steel.

## 申 請 者

村 井  
Nobuhiro

暢 宏  
Murai

1999 年 7 月

近年、動力機械の高出力化や機械部品の軽量化を背景に、機械構造用鋼の高強度化が要求されている。歯車等の動力伝達部品に適用される浸炭鋼も例外ではなく、本来備えている耐摩耗性、靱性、疲労強度等のさらなる向上が要求されている。しかし、浸炭鋼の高強度化をはかるにはつぎのような問題点がある。

第一は、浸炭硬化層の脆化現象である。一般に鋼の浸炭処理では、オーステナイト域での浸炭に引き続き、直接焼入れと低温焼もどしが施される。これにより硬化層は残留オーステナイトを含んだ高炭素低温焼もどしマルテンサイト組織となる。この組織はHRC60程度の硬さを有するので圧縮もしくは接触応力下では優れた性能を示すが、曲げや引張応力下ではオーステナイト粒界を起点に低応力で脆性破壊する。このような脆化は焼入脆化と称され、浸炭部品の静的強度や疲労強度を劣化させる。

第二は、表面下に形成される異常組織である。工業的に最も普及しているガス浸炭においては、雰囲気中の酸化性ガスと鋼中の合金元素とが反応して表面下に内部酸化層が形成される。その結果、内部酸化層とその周辺ではオーステナイト中の合金固溶量が低下し、焼入れ時にパーライト等の不完全焼入組織が形成される。このような内部酸化層と不完全焼入層は浸炭異常層と総称され、内部酸化の切欠作用と軟質の不完全焼入層によりとくに疲労強度を劣化させる。

ガス浸炭では雰囲気と鋼の化学平衡反応が関与するので、焼入、低温焼もどしで形成される組織もこの化学平衡反応に影響されることになる。そこで本研究は、まずガス浸炭雰囲気中の化学平衡と焼入れ後の組織形態との関係を定量的に把握し、ここで得られた知見も活用して焼入脆化ならびに浸炭異常層を抑制するための原理と工業的手法について検討した。以下にその概要を示す。

第2章では汎用鋼のSCr420鋼と主要合金元素を変化させた鋼を工業用ガス浸炭炉で長時間浸炭し、平衡炭素量に及ぼす合金元素と雰囲気の影響を検討した。これによると雰囲気と平衡するオーステナイト中の固溶炭素量は、Cの活量係数を低下させるMn, Cr, Moの添加により上昇し、Cの活量係数を上昇させるSi, Niの添加により低下する。この合金組成による平衡炭素量の変動は低合金の範囲では希薄溶体近似により算出できる。しかし厳密には、平衡炭素量は雰囲気中の酸素ポテンシャルにも影響される。これは、酸素ポテンシャルによるCr, Mn, Si等の内部酸化でこれらの元素の固溶量が低下してCの活量係数が変化するためである。この作用を助長する元素としては酸化物として安定でかつCの活量係数に大きな影響を与えるSi, Cr, V等があげられる。

つぎに第3章では第2章での平衡反応に関する知見も活用し、残留オーステナイトと浸炭異常層の生成に及ぼす主要合金元素の影響を調査した。まず、浸炭層を模擬した高炭素鋼のMs点を測定し、化学組成との関係を定式化した結果、高炭素鋼のMs点は従来から定式化されている中炭素鋼のMs点に比べCの寄与が小さく、Mn, Ni, Cr, Moの寄与が大きくなることが判明した。Cの寄与の低下はFe-C2元合金で

の従来の知見と一致し、Mn, Cr, Moの寄与はフェライト／オーステナイト安定化パラメータの低温域での挙動と一致することからこれらの結果の妥当性が裏付けられた。残留オーステナイト量はこのような高炭素鋼のMs点と、希薄溶体近似で計算された平衡炭素量により算出できる。すなわち、浸炭層の残留オーステナイト量の把握には、鋼の組成と炭素ポテンシャルによって定まる固溶炭素量と、高炭素鋼のMs点を考慮に入れる必要があり、本研究ではこれらの寄与をはじめて定量化した。

いっぽう、内部酸化深さは酸化性元素のSi, Mn, Crの添加で増加し、単位重量%当たりの増加量はSiが最も大きい。ただし、いずれの元素においても、ある添加量を超えると内部酸化深さは逆に低下することが判明し、内部酸化深さは酸化性元素の添加に対して単調増加するとした従来の知見の修正を指摘した。不完全焼入層深さはMoの添加で最も顕著に低下するが、これはMoが非酸化性元素でかつ高炭素域での焼入性を上昇させるためである。このほか、不完全焼入層深さは内部酸化の深さや構造にも影響する。以上の結果から、Siの低減で内部酸化深さを低下させ、Moの添加で焼入性を保証することにより、浸炭異常層を効果的に抑制できることを見出した。

第4章では高炭素低温焼もどしマルテンサイト鋼の焼入脆化に及ぼすCの影響を調査するため、高炭素鋼の静的曲げ試験を実施した。また、第2章での合金元素による平衡炭素濃度の変化に着目し、Cr量を変化させたはだ焼鋼(浸炭用鋼)のガス浸炭後の静的曲げ試験も併せて実施した。この結果、炭素量が0.6~1.0%の範囲の低温焼もどしマルテンサイト鋼はオーステナイト粒界を起点に破壊し、炭素量の増加に伴って曲げ強度は低下することが判明した。すなわち、高炭素化により高炭素低温焼もどしマルテンサイト鋼の焼入脆化は顕著になる。いっぽう、浸炭鋼においては、雰囲気との平衡反応によりCrの増加とともに表面炭素量も増加し、これに伴って焼入脆化も顕著になる。つまり、Crに限らず浸炭層の焼入脆化への合金元素の影響は、その元素固有の影響のほか、平衡反応による炭素量の変動を考慮し、その影響を検討することが重要である。

焼入脆化ではオーステナイト粒界が脆化するが、これを防止するにはオーステナイト粒を微細化させ、粒界への応力集中を緩和することが有望と考えられる。こうしたオーステナイト粒の微細化には再加熱焼入れが有効であるが、浸炭鋼に再加熱焼入を施した場合、浸炭層にはセメンタイトがしばしば残留する。そこで第5章ではクロムモリブデン鋼にプラズマ浸炭、徐冷を施して浸炭層に過共析セメンタイトを生成させ、さらにそれに高周波焼入れを施して、静的曲げ強度に及ぼす残留セメンタイトと結晶粒微細化の影響を検討した。この結果、浸炭あるいはその後の冷却過程で過共析セメンタイトが生成した場合、高周波加熱してもこれがオーステナイト粒界に残存し、浸炭層の焼入脆化は助長されることが判明した。また、高周波加熱を低温短時間加熱にするとオーステナイト粒は微細化されるが、

同時に残留セメンタイトも増加するので、見かけ上、結晶粒微細化とともに曲げ強度は低下する。これらの結果から、浸炭後に高周波焼入れを適用する場合、過共析セメンタイトの生成を抑制することが高強度化の前提として必要であることを示した。

第5章の知見に基づき、第6章では過共析セメンタイトの生成を抑制するためガス浸炭焼入れを施し、高周波焼入れ後の静的曲げ強度に及ぼす結晶粒微細化の影響を検討した。また、浸炭層と再加熱焼入れ層のオーステナイト粒界をオージェ電子分光分析により調査し、焼入脆化の軽減について検討した。このオージェ電子分光分析の結果、焼入脆化の原因はオーステナイト粒界に偏析したPと炭化物形態のCであることが判明した。また、これらのPとCの偏析量には一方が増加すると他方も増加する正の相関が認められ、極低炭素鋼で指摘されている負の相関とは正反対である。ガス浸炭後の高周波焼入れは、このようなP,Cの偏析を同時に軽減し、さらに細粒化の効果も重畳して浸炭層の焼入脆化を抑制する。また、焼入脆化の軽減には、Cの偏析が軽減することから、ガス浸炭での雰囲気(炭素ポテンシャル)制御で浸炭層の固溶炭素量を低下させることも有効である。

以上の第2章から第6章の知見をもとに、第7章では、まず浸炭異常層低減鋼を開発した。本開発鋼はSi量を0.1%まで低減し、さらにMoを0.4%添加したクロムモリブデン鋼であり浸炭異常層が効果的に低減される。これにより、浸炭後あるいは浸炭、ショットピーニング後の疲労強度が改善される。また、本開発鋼は切削性等の工業生産性に対しても問題がないことも確認された。つぎに、本開発鋼に浸炭、高周波焼入れ法を適用しさらなる高強度化をはかった。すなわち、まずガス浸炭での雰囲気制御で浸炭層の炭素濃度を低めに設定して、つぎに高周波による再加熱焼入れを施した。これにより、硬化層の焼入脆化が抑制され、歯車の歯元の曲げ強度が大幅に向上することが確認された。このような性能を有する本開発鋼は乗用車の変速機用歯車や差動装置用歯車に適用されている。