

NACHI-BUSINESS

Materials news

Vol. 8D1
August/2005

マテリアル事業

■ 技術講座

知りたい材料・熱処理講座⑤

「使用目的と熱処理を考えた材料の選び方」

Things to Know about Material and Heat Treatment
"How to Select the Appropriate Material that Achieves
the Purpose and Effective Heat Treatment"

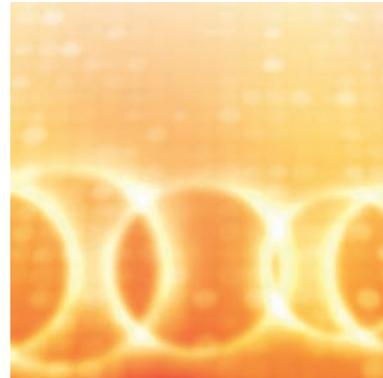
〈キーワード〉 焼入性・引張強さ・耐クリープ性・耐疲れ性・
耐衝撃性・耐摩耗性・耐食性・被加工性

マテリアル製造所／技術部

吉田 直純 Naozumi Yoshida

監修 開発本部／開発三部

天野 宏地 Hirokuni Amano



要 旨

前回の「知りたい材料・熱処理技術講座」では、製品の使用目的に対し、どのような材料特性が求められ、どのような熱処理が有効であるかを解説しました。

今回は、熱処理だけでなく、製品の使用目的に必要な材料特性に対し、どのような材料を選べばよいかについて説明します。

Abstract

Material characteristics and effective heat treatment required for a specific product use are explained in the last session of "Things to Know about Material and Heat Treatment."

Explained in this session is the type of material that you should select for a specific product use in consideration of material characteristics as well as heat treatment effectiveness.

1. 材料選択の基準

一般に、機械部品の図面には、その部品の素材と硬さが明記されています。例えば歯車の場合「SCM440」、「290～330HB」と書き込まれています。機械部品は、機能、使用環境、負荷、その他条件によって、形状・寸法精度、材質、硬さ、熱処理方法などが決められます。本講座では、なぜSCM440なのか、なぜ290～330HBなのかを考えてみます。具体的には、強さ、靱性、耐摩耗性、耐食性、被加工性などの特性に対応した材料選択基準を説明していきますが、まずその前に、これらの特性に大きな影響を及ぼす焼入性について解説します。

2. 焼入性からみた選択法

焼入性とは、材料を焼入れた時に、どのくらいまで深く硬くなったかを示す特性です。

一般に鋼の硬さは、焼入れ時、ある一定以上の冷却速度があれば、その材料固有の硬さが得られますが、冷却速度がそれより遅くなると、得られる硬さも低くなります。

同様に、材料の表面と内部では、冷却速度が異なるため、表面は硬く、内部は軟らかくなることとなります。また、同じ冷却速度であっても、内部まで硬さの得る焼入性のよい材料と、硬さが大幅に低下する焼入性の悪い材料とがあります。

焼入性の表し方にはいくつかの方法がありますが、ここでは、最も広く知られているジョミニー曲線による方法と、臨界直径による表示方法について説明します。

1) 焼入性の表し方

(ジョミニー曲線による方法)

ジョミニー曲線による方法とは図1に示すように、直径25mmの試験片を所定の温度に加熱した後、その一端に噴水を当てて急冷し、その端面側から試験片の側面の硬さを測定する方法です。これによって得られた結果を、図2のようにグラフ化します。この曲線をジョミニー曲線と言います(H曲線とも言う)。

材料の焼入性が、化学成分に大きく影響されるのに対し、JISに規定された鋼種の化学成分には、それぞれ範囲がありますので、成分が上限のものと同下のもののカーブを求めますと、図3のハッチングを施した部分のようにある幅ができます。これをHバンドと呼んでいます。

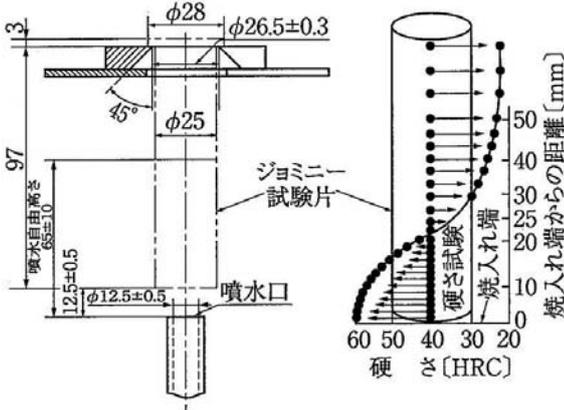


図1. ジョミニー式一端焼入れ方式

(臨界直径による方法)

ある鋼種でいろいろな太さの丸棒を焼入れてその断面を観察し、中心部のマイクロ組織が50%マルテンサイト、残りの50%がマルテンサイト以外の組織になっている直径のことを、その鋼種の臨界直径と呼び、 D_c と表します。

ここで得られる臨界直径 D_c は、冷却材の種類や攪拌方法によって違ってきます。そのため、鋼材を焼入れた瞬間にその表面温度が冷却剤の温度となるような理想的な冷却を仮定し、その時の D_c を理想臨界直径 D_i と呼んでいます。 D_i は、冷却材の種類や攪拌の仕方には無関係で、その鋼固有の値となり、 D_i が大きければ焼入性がよいことを、小さければ焼入性が悪いことを示します。 D_i は D_c と急冷度 H がわかれば、図4より求めることができます。

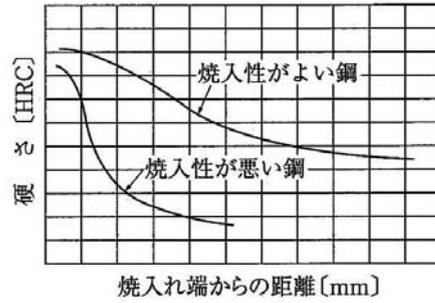


図2. 焼入性曲線(H曲線)

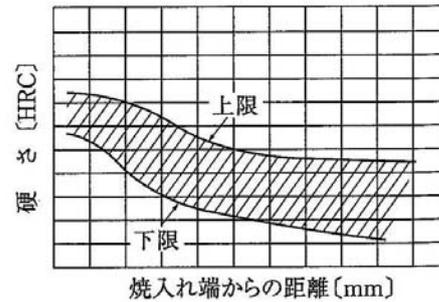


図3. Hバンド

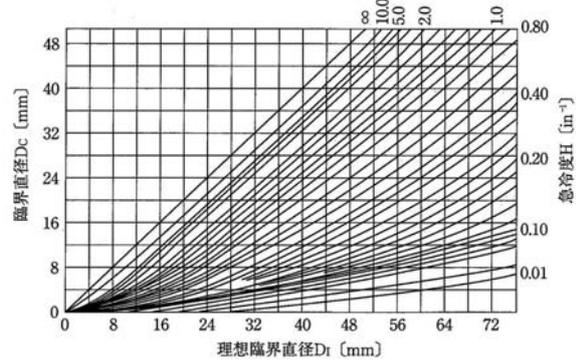


図4. D_i — D_c — H の関係

2) 焼入性を保証した構造用鋼

前述したように、鋼材の場合、化学成分が規格内であれば同一鋼種として取り扱われます。しかし、規格範囲の上限ばかりに成分がそろったものと、下限ばかりにそろったものとは、熱処理条件が同一でも焼きの入れ方が大きく異なってきます。

結果として、同一鋼種であっても、焼入れのバラツキが非常に大きく、所定の機械的性質が得られないこともあります。そのため、焼入性を保証した構造用鋼をJISで規定し、H鋼と呼んで、鋼種記号の末尾に“H”を付記して市販されています。このH鋼は、ジョミニー曲線(またはH曲線)によって焼入性が規定されているものです。これによって焼入れ後に均質な機械的性質の製品を得ることができます。

3. 引張強さからみた選択法

静的荷重を受ける機械部品用に鋼材を選ぶ場合には、一般に引張強さと降伏強さを基準とすることが多く、さらに、伸び、絞りについても考える必要があります。

1) 常温引張強さからみた選択法

鋼材の引張強さは硬さによって決まり、鋼種による差が小さいことは前回の講座で述べたとおりです。また、同じ硬さでも、焼入れが不完全な鋼は、完全焼入れされたものに比べて、降伏強さ、絞り、のびが低くなり、もろい材料となります。

一般に同じ硬さであれば、炭素鋼より、合金鋼の方が、絞り、のびが大きい傾向にあり(図5)、その部品形状、大きさに応じて適当な焼入性を持った合金鋼を選択することが推奨されます。

2) 高温引張強さからみた選択法

熱間鍛造プレス型、ダイカスト型などの金型は、高温の上に激しい衝撃を受けるといった過酷な条件下で使用されます。そのため、熱間型用鋼にはそれに十分耐えることのできる特性が要求されます。特性としては、高温引張強さや靱性のほかに、耐ヒートチェック性に優れていることが要求されます。

耐ヒートチェック性が良いということは、温度の急変によって急激に発生する熱応力(熱衝撃)に対して抵抗力が大きいことを意味します。熱衝撃によって破壊しない最大温度差(ΔT_{max})には、次のような関係があります。

$$\Delta T_{max} \propto (k \cdot \sigma) / (E \cdot \alpha)$$

k:熱伝導率 σ :引張または圧縮応力
 α :熱膨張係数 E:弾性係数

上式より、高温引張強さが大きい鋼種ほど、耐ヒートチェック性が優れていることがわかります。熱間型用鋼の高温強さは、クロム系、クロム-モリブデン系、ニッケル-クロム-モリブデン系の順に強くなり、したがって耐ヒートチェック性も優位となります。

3) 高温硬さからみた選択法

切削に使用される工具は、使用中に高温になるため、その材料には、常温の硬さや強さに加え、高温における硬さ、強度が求められます。

高温硬さは、タンゲステン、モリブデン、コバルト、バナジウム、クロム、マンガンなどの合金元素を添加することで向上します。したがって、タンゲステン、モリブデン、バナジウムを多く含有している高速度工具鋼は、高温硬さの非常に高い鋼種となります。(図6)

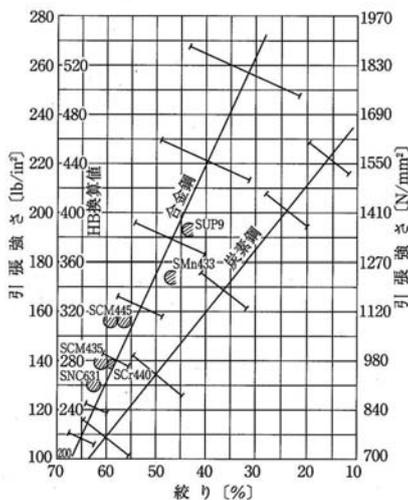


図5. 調質鋼の引張強さと絞りの関係

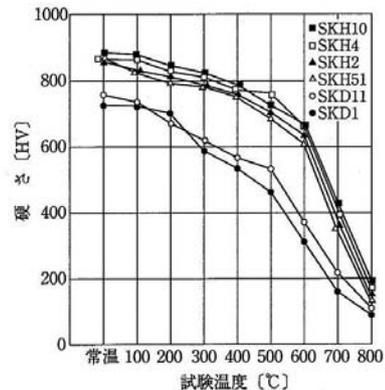


図6. 冷間工具および高速度工具鋼の高温硬さ

4. 耐クリープ性からみた選択法

高温での強さが必要な構造部品にとっては、クリープ強さは重要な特性となります。

一般に、シリコン、モリブデン、クロム、ニッケル、タングステン、バナジウムなどの合金元素を添加すれば、鋼の耐^{※2}クリープ性を向上させることができます。

1) 400℃以下でのクリープ強さ

400℃以下の温度でのクリープ強さが求められる場合、低炭素鋼を選ぶか、または低炭素鋼にシリコン、モリブデン、クロムを添加した合金鋼を選択します。

低炭素鋼やCr-Mo鋼は、フェライトまたは、ソルバイト組織からなり、オーステナイト組織の鋼よりクリープ強さが優れています。Si-Cr鋼はフェライト組織で使用されます。その熱処理は、約1100℃から焼入れして700℃ほどで焼もどしするものです。これにより、クロム炭化物などの偏析のないソルバイトを得るとともに、使用中に炭化物が析出して、クリープ強さが減少したり、耐食性が低下することを防いでいます。

5. 耐疲れ性からみた選択法

通常、鋼の疲れ強さは、引張強さとほぼ比例します。しかし、前回の講座で述べましたように、厳密には引張強さの増加にともなって、引張強さに対する疲れ強さの増加割合は低下し、引張強さが1000N/mm²を越えまると、その割合の低下は著しくなります。

機械構造用炭素鋼の疲れ強さを図7に示す。ここで、無限の繰返しに耐える応力の振幅を疲れ限度(疲労限)といいます。

前述のように、疲れ強さは組織によって大きな影響を受け、同じ引張強さでも、焼ならし材と焼入れ焼もどし材を比較すると、後者の疲れ強さが高くなります。

また、不完全焼入れになった場合は、疲れ限度が低下するため、焼入れ性のよい鋼を使用し、焼入れ焼もどしを行えば、疲れ強さの高い製品をつくることができます。

また、完全なマルテンサイトに焼入れし、焼もどした場合、焼もどし温度が高く、しかも焼もどし脆性が現れない場合には、同じ引張強さでも疲れ強さが高くなります。

したがって、焼もどし硬化に寄与するクロム、モリブデン、シリコンなどを添加した鋼は、疲れ強さの高い鋼と言えます。

切欠きがある場合は、応力が集中して、いわゆる切欠き効果を示しますが、この切欠き効果は硬さが高いもの、

2) 400℃以上でのクリープ強さ

400℃以上で使用する場合は、前記のようなフェライト系鋼は著しくクリープ強さが減少し、オーステナイト系鋼の方が強くなります。たとえば、SUS304に代表される18%Cr-8%Niオーステナイト系ステンレス鋼や、あるいはこれにシリコン、モリブデン、タングステンなどの元素を添加し、機械的性質を改善した鋼種が選択されます。ニッケルは、鋼のオーステナイトを安定化し、高温強さを高める作用があることから、用いられています。

オーステナイト系耐熱鋼は、600℃以上の高温に長時間さらされると、炭化物や窒化物が析出してクリープしやすくなります。そのため、オーステナイト系鋼の熱処理は、使用する温度より、少なくとも50℃ほど高い700~800℃で十分に焼戻しあるいは時効させて、クリープ強さや疲れ強さが向上するようにします。

あるいは引張強さが大きく、靱性の小さいものほど大きくなります。そのため、非金属介在物などの材料欠陥は、その鋼の疲れ強さに非常に大きな悪影響を及ぼすことになります。

切欠き靱性が良好で、耐疲れ性、耐摩耗性に優れた鋼が必要なときには、マルエージング鋼が最適です。真空溶解、あるいは、真空脱ガスなどを行なった非金属介在物の少ないこの種の鋼は、疲れ強さの高い材料といえます。

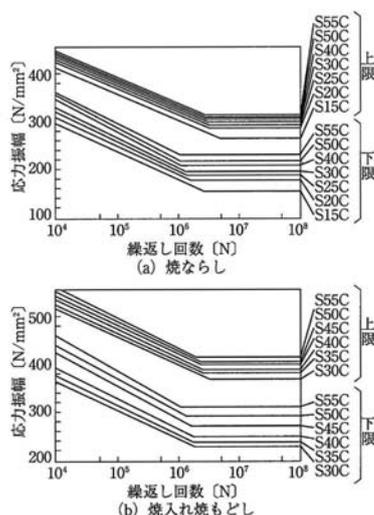


図7. 機械構造用炭素鋼の回転曲げS-N線図

6. 耐衝撃性からみた選択法

1) 硬さと衝撃値

例え硬さが同じであっても、炭素量が0.3%の鋼と0.5%の鋼では衝撃値は2倍近く違ってきます。耐衝撃性に必要な絞り、のびについても同様なことがいえます。

硬さや引張強さから靱性をみた場合、一般には、硬さが高いほど、引張強さが大きいほど、耐衝撃性は低下します。しかし、同一硬さ、引張強さでも、炭素鋼に比べれば、Cr-Mo鋼やNi-Cr-Mo鋼などのモリブデンを含む鋼は、耐衝撃性が優れています。

2) 偏析と衝撃値

偏析は、耐衝撃性をかなり低下させます。とくに、偏析は鍛錬の方向に大きく影響して、組織の均一性を著しく害しています。

工具鋼は耐摩耗性や高温強さを増すために炭化物をつくり、焼入れた状態で、SKD61などの熱間工具鋼では6~7%、SKD11やSKH51などの冷間工具鋼や高速度工具鋼では16~20%も炭化物を残留させます。この残留炭化物の分布状態が、耐衝撃性を大きく左右し、偏析が強いときは寿命を著しく低下させます。

図8は、SKD61の絞りおよび、のびにおよぼす偏析の影響を示したものです。ESR材は、大気溶解材に比べて、絞り、伸びともに、鍛錬による方向性ととともに著しく改善されていることがわかります。

最も多く炭化物を含む高速度工具鋼は、炭化物偏析による害が著しく、そのために粉末冶金法によって焼結してつくられた粉末高速度工具鋼が商品化さ

れています。この粉末高速度工具鋼は炭化物分布が均一で、偏析がないため、溶解材に比べて耐衝撃性が優れています。

3) 不純物と衝撃値

リンや窒素などの不純物を含んだ鋼は、300℃付近の焼もどし温度で、いわゆる低温焼もどし脆性が顕著にでます。そのため、一般には、この温度範囲を避けて550℃以上の温度で焼もどしをして使用しますが、それでも不純物のために、衝撃値が図9のように全般に低くなります。

このことから、鋼材を選択するときは、できるだけ不純物の少ないものが望まれます。

真空アーク溶解材やESR材は、大気溶解材に比べて不純物が少ない材料です。

4) 結晶粒度と衝撃値

オーステナイト結晶粒は、鋼材の性質を左右する因子の一つで、オーステナイト結晶粒が微細なほど衝撃値が高くなります。

例えば、図10のように、ASTM結晶粒度7のものは4に比べて、同じ硬さでも衝撃値が2.5倍も高いことを示しています。結晶粒度は耐衝撃性に大きく影響しますので、結晶粒度の微細なものを使用すべきです。

オーステナイト結晶粒は高温になるほど成長していきますが、ある温度以上になると急激に粗大化します。ニオブ、バナジウム、ジルコニウム、チタンなどは、微量添加しただけでオーステナイト結晶粒の粗大化温度を著しく高め、結晶粒の粗大化を防ぎます。

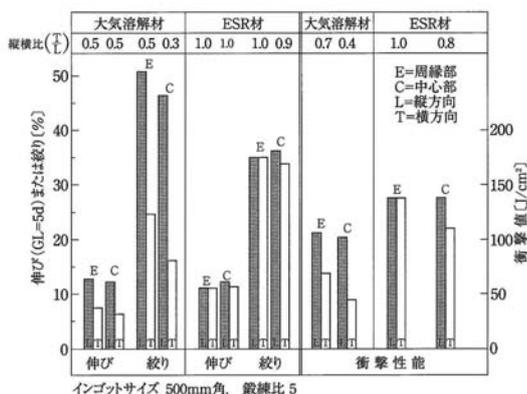


図8. SKD61の常温における機械的性質

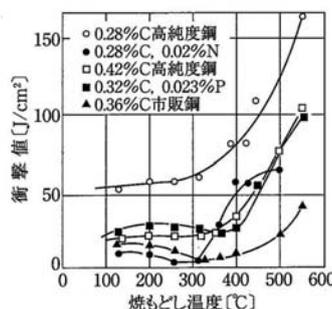


図9. マルテンサイトの焼もどしともなう衝撃値の変化

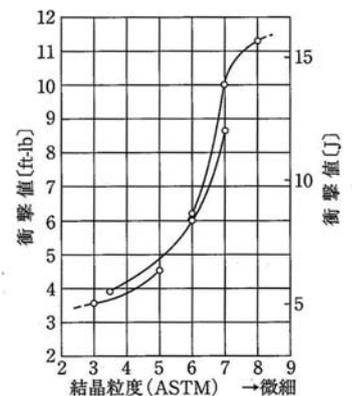


図10. オーステナイト結晶粒の靱性におよぼす影響

7. 耐摩耗性からみた選択法

摩耗には、ひっかき摩耗、凝着摩耗、転がり摩耗など、いろいろな種類がありますが、一般に硬いほど耐摩耗性がよいとされています。

したがって、耐摩耗性を高めるには、硬さを高くする方法がとられます。

1) 硬さと耐摩耗性

硬いものほど耐摩耗性が大きくなるということから、炭素量が多く、焼入性のよい鋼を焼入して、硬さの高いマルテンサイト組織にすることが有利です。

ひっかき摩耗の時には、同じ硬さであれば、ヤング率の高い材料ほど摩耗が少ないという報告もあります。

凝着摩耗の場合には、ブリネル硬さの約1/3の値の荷重で焼付き状態になりますので、設計荷重に合う硬さが得られる鋼種を選ぶことが望まれます。

2) 炭化物と耐摩耗性

焼入れ硬さは、炭素量が0.6%以上になるとだいたい一定になりますが、硬い炭化物が残留している方が耐摩耗性が良いので、炭素量の多い鋼ほど摩耗量は少なくなります。また、炭化物にもいろいろ種類があり、炭素鋼中ではセメンタイトよりも、クロム、モリブデン、タンゲステン、バナジウムなどからできる特殊炭化物の方が硬く(表1)、この特殊炭化物でも、クロム、モリブデン、タンゲステン、バナジウムの順に硬くなります。とくにバナジウムは微量を添加するだけで耐摩耗性を著しく高めます。したがって、セメンタイトを含んだ炭素

工具鋼より、特殊炭化物を含んだ合金工具鋼の方が耐摩耗性が高く、さらに多量の特殊炭化物を含んだ高速度工具鋼の方が耐摩耗性が優れています。また、高速度工具鋼もバナジウムを多く含んだものほど、耐摩耗性が大きくなります。

炭化物の硬さは温度の影響を受けるものもあり、高温での耐摩耗性が必要なときには、図11が示すようにCr₇C₃を含んだSKD11よりも、M₆Cを含むSKH51を選択した方がよいことになります。

表1.炭化物の硬さ

| 炭化物 | 硬さ [HV] | 炭化物 | 硬さ [HV] |
|--------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|
| M ₃ C | 1150~1760 | Fe ₃ C | 1150~1340 |
| M ₂₃ C ₆ | 1000~2800 | (Cr,Fe) ₂₃ C ₆ | 1000~1520 |
| M ₇ C ₃ | 1800~2800 | (Cr,Fe) ₇ C ₃ | 1820 |
| M ₂ C | 1800~3000 | Mo ₂ C | 1800~2200 |
| | | W ₂ C | 3000 |
| M ₆ C | 1600~2300 | Fe ₄ Mo ₂ C | 1670 |
| | | MoC | 2250 |
| MC | 2250~3200 | WC | 2400~2740 |
| | | VC | 2500~2800 |
| | | TiC | 3200 |

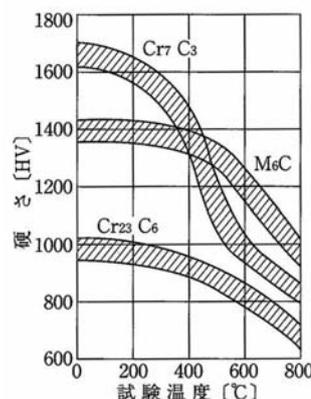


図11. 炭化物の高温硬さ

8. 耐候性・耐食性からみた選択法

鋼材は、雨水にはもちろん、大気中でもさびやすく、長年使用すると強さも低下します。さびの発生を遅らせる、つまり耐候性を上げるには、クロム、銅などの添加が有効です。反対に、硫黄や炭素は有害です。

1) ステンレス鋼の種類と特徴

ステンレス鋼はマルテンサイト系、フェライト系およびオーステナイト系の3種類に大きく分類されます。マルテンサイト系のステンレス鋼は、焼入れ硬化性があるため、炭素鋼では耐食性が不十分で、機械的強度を必要とする部分に使用されます。

フェライト系ステンレス鋼は焼入れ硬化性がないため、焼なまし状態のまま使用されます。耐食性、加工性、溶接性などはマルテンサイト系とオーステナイト系の中間にあって用途も広く、いろいろなところに使用されています。

オーステナイト系ステンレス鋼は、高温、常温ともオーステナイト単相のステンレス鋼で、焼入れ硬化性はありません。しかし、耐食性、加工性、溶接性などは最も優れており、極めて広範囲に使用されています。

9. 被加工性からみた選択法

被加工性は、加工費の低減や部品の歩留まりなどに影響しますので、非常に重要な特性です。

1) 被切削性

鋼の場合の被削性は、適度な硬さと靱性をもったときによくなります。低合金鋼の被切削性は、硫黄、カルシウム、鉛などを添加した快削鋼は別として、炭素量とマイクロ組織によって異なります。炭素量が0.3%程度までの低炭素合金鋼では、焼ならしをして中から粗い層状パーライトにすると被切削性はよくなります。0.3%以上の中炭素合金鋼では、焼ならしでは硬すぎるため焼なましをしますが、完全焼なましでは、切削に好ましくない縞状フェライト組織が発達しやすくなるので、恒温焼なましを施すところがよいとされています。

被切削性がとくに問題となるときには、快削鋼が使用されます。快削鋼は、構造用鋼、ステンレス鋼、工具鋼と広範囲にわたって製造されています。

工具鋼は、構造用鋼に比べて熱間加工性も悪く、焼割れなども生じやすいので、快削成分の添加量は、構造用鋼に比べ少ないのが一般的です。

用語解説

※1 ヒートチェック

熱間金型の表面に発生する微細なクラックのこと。熱間金型の表面は、高温のワークと加工熱により昇温する一方、成形後に潤滑および冷却剤が吹きかけられるため温度が低下する。この結果、金型表面には熱膨張と収縮にともなう繰り返し引張圧縮応力が作用し、微細なクラックを発生させる。

※2 クリープ

高温において、一定応力の下で、時間とともに塑性変形が進行する現象。その温度で測定される降伏強度より低くても発生する。

※3 偏析

材料の凝固現象に起因する成分分布のバラツキ。溶鋼が凝固するとき、早く固まったところと、後から固まったところでは、マクロ的にもミクロ的にも成分が異なっている。

※4 ESR材

ESRとはElectro Slag Remelting(エレクトロスラグ再溶解法)の略で、スラグ中で棒状鋼塊の先端にアークを発生させ再溶解する方法。通常材より、非金属介在物が少なく、偏析も軽微な材料となる。

※5 ASTM結晶粒度

ASTM(アメリカ材料試験協会)が制定した測定法による結晶粒度。他にJISが規定した測定法による結晶粒度もある。

※6 セメントタイト

鉄と炭素から形成され、Fe₃Cの組成をもつ炭化物。この形状と分布が、鋼の機械的性質に大きな影響を与える。

2) 被研削性

被研削性も被切削性と同様に、化学成分、硬さ、材料組織などによって影響されます。とくに炭化物の種類、量、大きさによって著しく変化します。一般には炭素量が多いほど被研削性は悪化します。

硬いバナジウム系炭化物を多量に含有する高速度工具鋼は研削加工が困難になりますが、同じ高バナジウム材でも、炭化物の微細な粉末高速度工具鋼は、大気溶解材に比べて、非常に研削性がよくなります。

3) 熱間鍛造性

鋼材を鍛造成形する場合には、鍛造性のよい材料を選択することが必要です。熱間鍛造性のよい材料とは、高温において変形抵抗が小さく、さらに鍛造時に割れなどの欠陥の発生しにくい材料のことです。

4) プレス加工性

大量生産の行なわれるプレス加工では、材料費の割合が大きいため、プレス加工がしやすく、安価で、製品としての性能が満足される材料を選択することになります。

炭素鋼の場合、低炭素のものほど打抜き加工がしやすく、曲げ、絞りなどの加工も容易です。このため、構造用鋼板からプレス成形によって製作された部品を浸炭焼入れし、製品とするものが多いわけです。

関連記事

1) 浅田泰弘：知りたい材料・熱処理①「材料を強くする熱処理」
NACHI-BUSINESS news Vol.4 D1、August/2004

2) 河口誠司：知りたい材料・熱処理講座②
「硬さと粘り強さをあてる焼入れ焼もどし」
NACHI-BUSINESS news Vol.5 D1、November/2004

3) 河口誠司：知りたい材料・熱処理講座③
「熱処理にまつわる問題点・トラブルとその防止策」
NACHI-BUSINESS news Vol.6 D1、February/2005

4) 吉田 直純・天野 宏地：知りたい材料・熱処理講座④
「使用目的を考えた熱処理の選びかた」
NACHI-BUSINESS news Vol.7 D2、May/2005

<注記>

本稿は、不二越熱処理研究会著「新・知りたい熱処理」(ジャパンマシニスト社)を引用しています。