

論文内容の要旨

氏名 遠藤 栄治
 学位の種類 博士(工学)
 学位記番号 シ第17号
 学位授与の日付 平成23年3月22日
 学位授与の要件 学位規程第4条第1項該当
 学位論文題目 精密鑄造法による合金工具鋼鑄鋼の強度特性と耐摩耗性に関する研究

論文審査委員 (主査) 教授 旗 手 稔
 (副主査) 教授 京 極 秀 樹
 (副主査) 教授 児 島 忠 倫

合金工具鋼 (JIS G 4404) は、マルテンサイト基地と炭化物で構成される組織を有し、高強度、高硬度さらには耐摩耗性に優れることから、冷間金型や切削工具に欠かせない材料として広く使用されている。ところが、この合金工具鋼の C (炭素) は過共析組成であり、さらに炭化物を生成させる目的で Cr (クロム)、Mo (モリブデン)、W (タングステン)、V (バナジウム) および Ti (チタン) などの合金元素を含有するため、高精度の加工が難しく、成形できる形状および用途には制限が生じている。

最近では、合金工具鋼が要望される部品の形状はますます複雑になってきており、高硬度を有するこの材料の加工性は大きな問題となっている。その対応策として、鑄造技術の活用を提案したい。たとえば、精密鑄造法を成形加工する方法に適用すると、高い寸法精度で美しい鑄肌を持つネット・シェイブ鑄造材料となるから、切削加工を施すことなく製造ができ、新しい設計要求への用途開発ができることになると考えた。

SKD11 (約 1.5% C, 約 14% Cr) 相当の化学組成を有する鑄造品の機械的性質を想定してみると、硬さは焼入れと焼戻しの熱処理を施すと SKD11 鋼材の場合と変化なく、良好な材質が確保できる。しかしながら、引張強さや曲げ強さなどの強度特性は劣化することになる。この原因は、鑄造材では鋼材の成形方法と異なり、圧延による加工を伴わないため、凝固時に晶出する Cr 系 M_7C_3 型共晶状炭化物 (以下、簡単に「共晶状炭化物」という) が分断されることはなく、初晶オーステナイト (γ) の間げきを共晶状炭化物が埋める形で連続して晶出することが考えられる。

鑄造材料は凝固現象を必然的に伴うため、凝固過程で晶出する炭化物を金属組織学的に制御する手法を検討することにした。まず、合金工具鋼 SKD11 に成分元素として含まれる V 含有量の調整である。さらに、Cr より炭化物の生成傾向が強い合金元素で、かつ MC 型炭化物を生成する元素として Ti および Nb (ニオブ) を選定し、これらの合金元素の最適添加量に関する検討を行った。そして、Cr 系共晶状炭化物を直接低減させるために SKD11 の化学組成を修正することに着手した。このようにして研究を行った成果として、合金工具鋼鑄鋼の強度特性が共晶状炭化物の連続性や分布状態に支配されることを明らかにした。特に、Ti を添加することは、共晶状炭化物の連続性が絶たれると同時に、細かい Ti 系 MC 型炭化物が分散して晶出することによって、強度の向上が図られていた。そこで、ど

論文審査結果の要旨

のようにして強度が向上したのかを追究するための考察を加えた。さらに、合金工具鋼鑄鋼は高強度と高硬度に併せて、優秀な耐摩耗性を有することに特長があることから、以上述べた実験にはすべて摩耗特性も併せて検討した。溶製した化学組成を種々変化させた合金工具鋼鑄鋼は、晶出する炭化物の量、形状および分布などが異なった場合における鑄造組織と強度特性および摩耗特性との関係を検討することを本論文の主たる目的とした。

以下に、本論文の内容を整理し、その結果を要約する。

第1章は、緒論であり、本研究の主要目的、ならびに各章での研究目的および内容の概要を述べたものである。

第2章は、素形材の製造方法の一つである精密鑄造法を機械製作法の観点から客観的に調査し、その使用用途や特徴を詳細に検討しておき、鉄系高強度耐摩耗材料である合金工具鋼や高Cr 鑄鉄などにおける用途と炭化物の種類や役割について述べた。

第3章は、炭化物生成元素Vを添加した合金工具鋼鑄鋼を溶製して晶出する炭化物の形態が変遷する過程を観察し、機械的性質と摩耗特性に及ぼす炭化物の影響を明らかにした。

第4章は、前章の結果をふまえ、共晶炭化物をMC型炭化物へ移行させることによって共晶炭化物の分断を図り、その結果として強度を改善するための指標をさらに確たる事実にするのを検証する。そのために、Crより炭化物生成傾向の強い元素Vだけでなく、TiおよびNbを各々単独で添加した合金工具鋼鑄鋼を溶製し、機械的性質と摩耗特性に及ぼす炭化物の影響を明らかにした。

第5章は、高強度化には共晶炭化物の面積率を低減させることによってその分断を図ることが有効となる事実を検証すると同時に、小さく球状に近いMC型炭化物は高強度化にどのように寄与しているのかを検討することを目的とした。共晶炭化物量の低減とその分断に効果的な最適C含有量およびCr含有量を決定しておき、さらにTiを添加することによって、分断された共晶炭化物とMC型炭化物が分散する2つの役割の炭化物を制御させた鑄鋼を溶製することを試みた。その結果、高強度および高硬度で、耐摩耗性に優れた新たな合金工具鋼鑄鋼の開発に繋げることができた。

第6章は、総括であり、本論文で明らかになった内容を整理し、得られた研究の結果および結論を述べた。

合金工具鋼 (JIS G 4404) は、一般の炭素鋼と比較すると、高炭素 (C) を有する過共析鋼の領域に位置し、多くの合金元素を含む高合金鋼として分類される。この鋼材は熱処理によって、高強度・高硬度のマルテンサイト基地と、耐摩耗性を向上させる目的で Cr (クロム) を始め、Mo (モリブデン)、W (タングステン)、V (バナジウム) および Ti (チタン) などの合金元素が添加され、それらの合金元素に付随した炭化物によって構成される。このため、高強度かつ耐摩耗性に富むから、冷間金型や切削工具には不可欠な鋼材として広く使用されているが、この材料自身の優秀な材質特性が弊害となって、高精度の加工が困難となることや、成形できる形状および用途が制限されるなどの問題が起こっている。

この問題を解決するために、ネット・シェイプで成形できる素形材として、最も効率よく成形加工できる手法として精密鑄造法を提案した。この鑄造法を適用すると、一度だけの加工によって、高い寸法精度で、さらに良好な鑄肌を有する製品が機械加工なしで製造することができるメリットが現れ、新しい用途に対応できる材料の開発に繋がると考えられる。合金工具鋼のSKD11 (約 1.5C% C, 約 12% Cr) 相当の化学組成を有する鑄造品の機械的性質については、硬さは熱処理によって圧延工程を経て製造される鋼材と同等の材質が確保できる。しかしながら、引張強さや曲げ強さなどの強度特性は劣化する。この原因を調査すると、鑄造材では鋼材の成形方法と異なり、圧延による加工を伴わないため、凝固する過程で自由に晶出して成長するCr系 M_7C_3 型共晶炭化物は分断されることなく、初晶オーステナイト (γ) の間げきを共晶炭化物が埋めるので、その連続性が強調される特性を有することがわかった。

鑄造材料は、必ず凝固現象を伴うため、凝固過程で晶出する炭化物を金属組織学的に制御する手法の検討から着手している。まず、合金工具鋼SKD11に成分元素として含まれるV量を増加させて、共晶炭化物がVC型炭化物に置き換わっていく過程において、強度特性および耐摩耗性の変化を評価している。次に、Crより炭化物の生成傾向が強い合金元素で、かつMC型炭化物を生成する元素としてTiおよびNb (ニオブ) を選定し、これらの合金元素の最適添加量に関する検討を行っている。そして、Cr系共晶炭化物を直接低減させるために、CrおよびC量を種々変化させ、強度特性および耐摩耗性に及ぼすCrおよびCの効果を検討し、それぞれ

の特性における最適な炭化物の量や分布形態を考察している。このように、材料中に存在する炭化物に焦点を絞って、鑄造した合金工具鋼の強度改善と耐摩耗性の付与について、系統的に行われた研究は見あたらない。そこで、このような研究を行うことは十分に新規性があることの確証が得られたので、綿密な研究計画を立てて遂行されている。その中で、工業的な大きな成果は、合金工具鋼鑄鋼の強度特性が共晶状炭化物の連続性や分布状態に支配されることを明らかにしたことである。特に、C 量および Cr 量を低下させて化学組成を調整すると、共晶状炭化物の量が減少して連続性が分断されるために、強度は大きく向上する。しかしながら、耐摩耗性は逆に硬い炭化物の量が減ると改善できない。共晶状炭化物と Ti の添加で生成する MC 型炭化物をバランスよく分散させて晶出させると、強度の向上と飛躍的な耐摩耗性の改善が図られている。合金工具鋼鑄鋼は高強度と高硬度に併せて、優秀な耐摩耗性を有するといったさらなる特長を見いだしたことから、新材料の開発に関する観点においてもこの研究の学術的な意義があると評価される。

第1章は、本研究の主要な目的、ならびに各章での研究目的および内容の概要を述べ、緒論としてまとめている。

第2章は、機械製作法の観点から素形材の製造方法の一つである精密鑄造法の特徴を客観的に調査し、さらに鉄鋼材料における炭化物の種類や役割が述べられており、その中で合金工具鋼を鑄鋼として製造することによる工業的な意義と期待を言及し、鉄鋼材料における炭化物を活用した機能性の付与に関する学術的な調査を行っている。

第3章は、炭化物生成元素として V を添加した合金工具鋼鑄鋼を溶製して晶出する炭化物の形態が共晶状炭化物から VC 型炭化物へ変遷する過程を観察し、機械的性質と摩耗特性に及ぼす炭化物の影響を明らかにしている。

第4章は、前章の結果を踏まえ、共晶状炭化物の分断を図ると同時に、さらに Ti、Nb および V に付随した MC 型炭化物を共存させることによって、強度を改善するための指標をさらに確たる事実にすることを検証している。種々の炭化物が存在するときの破壊過程までを模式的に表現し、強度特性を明確に言及されたことは高く評価される。さらに、耐摩耗性には MC 型炭化物の存在が非常に効果的であることを解明し、炭化物自身の硬さと小さく球状に近い炭化物が無作為に分布させることが有効である結論を導いている。

第5章は、さらに高強度化させるには、共晶状炭化物の量を低減させるといった前章までの研究結果に基づき、共晶状炭化物量の低減とその分断に効果的な最適 C 量お

よび Cr 量を決定した。さらに Ti を添加して、分断された共晶状炭化物と MC 型炭化物が分散する2つの役割のことなる炭化物を制御した鑄鋼を溶製し、高強度かつ高硬度を有し、耐摩耗性も兼ね備える鑄鋼が開発されたといえる。

第6章は、本論文で明らかになった内容を整理し、得られた研究の結果および結論を各章ごとに述べた総括である。

本研究で得られた結論や知見は新規性があり、鑄造工学の分野、および鉄鋼材料開発の分野における最新の研究として高く評価できる。特に、機械加工に頼っていた素材を精密鑄造法の適用によって、今までの発想にとられない複雑な形状の機械部品が設計できるようにもなり得るから、合金工具鋼の新しい用途開発に関する先駆的な技術が構築されたところにこの研究の価値がある。さらに、鉄鋼材料の凝固過程における晶出する炭化物を制御した研究は非常に興味深い関心事であり、学術的な意義が大きいと評価できる。以上のように、本論文は学術的にも工業的にも非常に重要な内容が包含されており、博士（工学）の学位を授与する価値のあるものと判断した。