

学 位 論 文 題 名

Refinement of Austenite Grain Structure by Additions of Ferrite Stabilizer Elements in 0.2 mass percent Carbon Steel

(フェライト安定化元素添加による0.2パーセント炭素鋼の
オーステナイト結晶粒組織の微細化)

学位論文内容の要旨

The present study focuses on the control of austenite (γ) grain structure in carbon steels during the continuous casting and reheating process of the steel slab. The formation of coarse as-cast γ grain structure after the continuous casting leads to surface cracking during the bending and straightening process of thick-slab and during the direct rolling of thin slab. The coarse as-cast structure is also responsible for the formation of coarse α ferrite/pearlite grain structure in ready-to-use carbon steel. Hence, the refinement of the as-cast structure is quite an important issue in the steel production. Addition of alloying elements is one of the methods for controlling γ grain structure. Comprehensive understanding on effects of alloying elements on the microstructure in each process of the carbon steel production is essential for producing high quality carbon steels. The additions of ferrite stabilizing elements lower the temperature for γ transformation/solidification (T_{γ}). The decrease in T_{γ} is expected to yield the refinement of the as-cast γ grain structure, because the pinning effect of α phase on the as-cast γ grain growth should occur at relatively low temperature. However, the effect of additions of the ferrite stabilizing elements, more specifically Al, P and Si on the γ grain structure during the casting and reheating process have not been clarified yet. The purpose of the present study is to clarify the effects of Al, P and Si additions on the as-cast γ grain structure and inverse transformed γ grain structure in 0.2 mass percent carbon steel. This thesis consists of eight chapters and the organization is explained below.

The first chapter was devoted to describe the brief outline of this thesis. The detail of the background of this study was provided in the chapter 2. In the chapter 3, the effects of Al addition on the as-cast structure have been clarified in detail. The as-cast structure obtained from permanent mold casting consisted of Coarse Columnar Grain (CCG), Fine Columnar Grain (FCG) and Coarse Equiaxed Grain (CEG) regions. The Al addition led to refinement of the as-cast structure because it increased the FCG region and decreased both the CCG and CEG region. AlN was rarely detected and Al segregation was not significant. Enhanced P segregation by the Al addition is considered as the cause for the refinement of the as-cast structure. Our thermodynamic calculation showed that high P concentration significantly lowers the T_{γ} .

In the chapter 4, the effects of single addition of P and simultaneous additions of Al and P on the as-

cast structure were investigated in order to clarify the effects of P segregation on the as-cast structure and to obtain evidence of the enhancement of P segregation by the Al addition, respectively. The P addition/segregation in fact led to the refinement of the as-cast structure. The enhancement of P segregation by the Al addition was successfully confirmed with experimental evidence. Importantly, the refinement of the as-cast structure can be obtained with low P concentration when Al is added.

In the chapter 5, the effects of single addition of Si and simultaneous additions of Al, Si and P on the as-cast structure were also studied in detail. The Si addition resulted in the refinement of the as-cast structure. Hence, the addition of any ferrite stabilize element other than Al, P and Si is generally expected to produce the refinement. The Si segregation is proposed as the cause for the refinement since high Si concentration lowers T_{γ} , as demonstrated by our thermodynamic calculation. Meanwhile, in the samples with simultaneous additions of Al, P and Si, the refinement of the as-cast structure originated from the Si and P segregations. Si addition/segregation however did not affect the P segregation significantly. It is also important to note that lowered P concentration is feasible to obtain the refinement when Al and Si are added.

In order to initiate the studies on effects of additions of the ferrite stabilizer elements on inverse transformed gamma grain structure and influences among these elements during the reheating process, the effects of single additions of Al and P on the gamma grain structure were also investigated in the chapters 6 and 7, respectively. The Al addition inhibited coarsening of the gamma grain structure because of pinning effect of AlN and solute drag effect of Al segregation on the grain boundary. Meanwhile, the P addition inhibited the coarsening of the gamma grain structure likely due to solute drag effect of P segregation on the grain boundary and decrement of the grain boundary surface energy.

Finally, the important findings in the present study were summarized in the chapter 8. P addition is effective for the refinement of the as-cast gamma grain structure in carbon steel. However, the presence of P is generally harmful to the carbon steel. The present study demonstrated that the refinement of the as-cast structure can be obtained by small amount of P addition when Al or/and Si is added. Furthermore, in spite of the fact that the Al addition is not as effective as the P addition for the refinement of the as-cast gamma grain structure, the Al addition is more effective than the P addition for the refinement of the inverse transformed gamma grain structure due to the pinning effect of AlN.

学位論文審査の要旨

主査	教授	松浦清隆
副査	教授	鵜飼重治
副査	教授	中村孝
副査	准教授	大野宗一
副査	准教授	三浦誠司

学位論文題名

Refinement of Austenite Grain Structure by Additions of Ferrite Stabilizer Elements in 0.2 mass percent Carbon Steel

(フェライト安定化元素添加による0.2パーセント炭素鋼の
オーステナイト結晶粒組織の微細化)

炭素鋼の連続鋳造において、鋳片表面から内部に向けて粗大な柱状オーステナイト(γ)粒組織が形成し、これが鋳片表面割れを引き起こすとともに、フェライト・パーライト組織の粗大化の原因となるため、熱間加工時の塑性変形能や表面疵による製品歩留まりに悪影響を及ぼすことが作業上の問題となっている。この問題の解決のためには連鋳鋳片 γ 粒組織の微細化が極めて重要である。

合金元素の添加による鋳片 γ 粒の組織制御は古くから試みられており、単独の合金元素の影響に関してはいくつか知見が報告されている。特に、 δ -フェライト安定化元素であるリンの添加によって γ 粒組織が著しく微細化することが近年明らかにされている。しかしながら、リン添加は γ 粒組織を微細化する一方で鋼の脆化の原因となるという負の側面もあるので、現状では γ 粒微細化のための適切な添加元素が見つけられていない。

このような現状に対し、本研究では、リンの負の影響を軽減しつつその微細化効果を有効に利用する新しい方法の開発に挑んでいる。上述のように、単独の添加元素の影響については多くの知見が報告されているものの、元素の複合添加を利用した組織制御法はいまだ確立されていない。それゆえ、本研究ではリン単独添加の影響を増幅させるような第三元素複合添加の効果に着眼し、 δ 相安定化元素であるアルミニウムとケイ素に着目した。熱力学計算によれば、これらの元素は δ 及び γ 凝固中のリン分配係数を減少させるため、これらの元素添加によってリン偏析が助長されることが期待される。本研究は、リンによる γ 粒微細化効果の増幅の可能性及びそのメカニズムを明らかにすることを目的として、 γ 粒組織の粗大化が著しい0.2質量パーセント炭素鋼を対象に、アルミニウム、リン及びケイ素添加が及ぼす鋳片 γ 粒組織への影響並びに凝固後の昇温過程で生じる逆変態 γ 粒組織への影響を調査したものである。

第一章では本研究の概要を簡潔に述べている。

第二章は、鋼の連続鋳造における問題、過去の γ 粒微細化の知見に言及し、本研究の背景と目的

を述べている。

第三章では、アルミニウム添加が及ぼす鋳片 γ 粒組織への影響を議論している。金型鑄造実験において、アルミニウム無添加鋼には鋳片表面から熱流方向に成長する粗大な柱状 γ 粒 (Coarse Columnar γ Grain, CCG) 組織が形成し、中心部には粗大な等軸 γ 粒 (Coarse Equiaxed γ Grain, CEG) 組織が形成した。これに対しアルミニウム添加鋼では、CCG と CEG の間に微細柱状 γ 粒 (Fine Columnar γ Grain, FCG) 領域が形成した。アルミニウム添加量を増加させることで FCG 領域が増加し、CCG 領域が減少することが示され、アルミニウム添加による微細化効果が明らかになった。組織観察及び濃度分析から、FCG において著しいリン偏析が生じていることが見つけられ、デンドライト樹幹のリン偏析によって液相もしくは γ 相が低温まで安定化し、このために γ 粒成長の開始温度もしくは γ 単相化温度 T_γ が低下したことによって、 γ 粒微細化が生じたことが示された。

第四章では、リン単独添加の影響及びアルミニウムとリンの複合添加の影響を議論している。リンの単独添加によって鋳片 γ 粒組織が微細化することが示された。そして、アルミニウムとリンの複合添加は、それぞれの元素の単独添加よりも、微細化効果を増加させることが明確に示された。これは本研究の初期の狙い通りにアルミニウムがリン偏析を助長させることによって生じたことが、組織観察及び濃度分析から明らかになった。したがって、アルミニウム添加によって、低リン濃度においても著しい微細化効果を発現させることが示された。

第五章では、ケイ素の単独添加、およびアルミニウム、ケイ素、リンの複合添加の影響を議論している。ケイ素単独添加でも γ 粒の微細化効果が生じることが明らかとなった。また、アルミニウム、リン、ケイ素の複合添加によってその効果は顕著になることも示された。ただし、ケイ素添加は、リン偏析を助長させることよりも、ケイ素そのものの偏析が T_γ を減少させることで微細化をもたらすことが明らかになった。

第六章では、逆変態 γ 粒組織に対するアルミニウム添加の影響を議論している。アルミニウム添加によって形成した AIN が、逆変態 γ 粒の成長過程において、ピン止め粒子として働くことで逆変態組織の微細化を生じさせることが明らかとなった。したがって、アルミニウム添加は、凝固後の組織及び逆変態組織のいずれに対しても微細化効果を発揮することが示された。

第七章では、逆変態 γ 粒組織に対するリン添加の影響を議論している。リン添加によって逆変態組織に若干の微細化が生じたものの、その効果はアルミニウムに比べて小さい。したがって、凝固組織から逆変態組織までの微細化を考えた際、本研究が提案するアルミニウム及びリンの複合添加の優位性が示された。

第八章は、本論文の総括である。

これを要するに、本論文は、炭素鋼の鋳片 γ 粒組織及び逆変態 γ 粒組織に及ぼすフェライト安定化元素の影響に関して新しい知見を報告したものであり、その寄与は連鑄鋳片表面品質の改善にとどまらず、リサイクル過程で蓄積するリンなどのトランプエレメントを有効利用した新しい組織制御法の展開において貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。