

アルミナイズド鋼の基礎的研究

(第 2 報)

—機械的性質について—

加 藤 良 雄*

信州大学工学部 機械工学教室

(昭和33年10月17日受理)

I 緒 言

アルミナイズド鋼の耐熱性と耐食性の優秀なことはすでによく知られているが、まだ広く工業的に生産されうる段階に至っていない。

これはアルミナイズド鋼の物理化学的性質、機械的性質および製造技術等の基礎的事項に対する研究が完成されていないためである。

耐熱性、耐食性および加工性等の二三の基礎的事項に関しては多くの報告があるが、なお多くの未解決の問題が残されている。機械的性質については未知の点が多く、このこともアルミナイズド鋼が積極的に生産されない原因の一つになっている。従来の報告¹⁾²⁾³⁾を適当に選択して重要事項を挙げれば次のごとくである。

- 1 母材鋼のC量の増加にしたがつて拡散層の成長速度は減少し、溶湯中へ溶入するFeの量も減少するから同一の条件で被覆処理をすれば高炭素鋼ほど拡散層は薄くなる。
- 2 使用浴の種類によつて拡散層の成長度は異なる。たとえばAl浴と Al—Si 合金浴では後者のほうが拡散層の成長を抑制する。
- 3 拡散層は主として $FeAl_3$ 金属間化合物と考えられる。 $FeAl_3$ の過大の生成は母材鋼と被覆層との密着力を弱めるから抑制する必要がある。
- 4 拡散層の厚さは耐熱性、耐食性および密着性等を考慮すれば0.01~0.03mmがよい。

加工性については屈曲試験、エリクセン試験等の報告が多く、合金層の本質にふれたものは比較的少い。しかしてアルミナイズド鋼が構造用としてはどの程度に使えるか否かを検討することも必要と思われる。これらを解決するためにはアルミナイズド鋼の機械的性質を十分に検討しなければならない。かゝる意味において本報告はアルミナイズド鋼の基礎的研究の一端として、その静的および動的引張試験を行い、その結果を報告したものである。

II 試 料

アルミナイズド鋼に用いられる母体材料は軟鋼が多い。これは合金層の生成と成長が

* 信州大学助教授

低炭素鋼ほどいちじるしく、かつ Al と Fe との結合もよいと云う理由からである。本実験においても母材鋼としては 0.25% C の炭素鋼を使用した。その成分組成を Table 1 に示した。これを焼準して標準組織としたものを静的引張と動的引張を比較するために Fig. 1 に示したように同一形状寸法に研磨仕上げをした。

Table 1 Chemical composition

C	Si	Mn	P	S
0.25	0.21	0.64	0.025	0.026

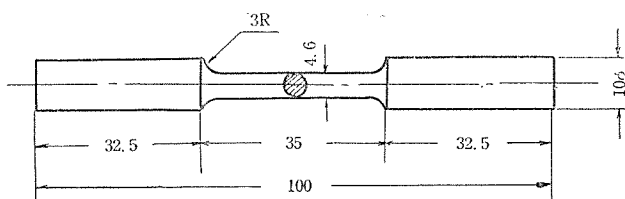


Fig. 1 Test Piece

Al浴に用いたAlの純度は99.7%Alで、Al浴の温度は700°C、浸漬時間は5、30および60sの三種類とした。アルミナイズ前後の試験片直径の変化は Table 2 に示したように浸漬時間に比例して増加している。なおFlux は前報と同様で、LiCl、ZnCl₂ およびNaClの混合塩を使用した。

Table 2 Increase of diameter and thickness of coating layer for tensile specimen

Specimen number	Time of immersion (sec)	Variation of diameter (mm)		Increase of diameter (%)	Thickness of aluminum layer (mm)	Thickness of alloy layer (mm)
		before	after			
1	5	4.600	4.646	+1.00	0.016	0.015
2	30	4.597	4.661	+1.39	0.016	0.028
3	60	4.601	4.684	+1.80	0.016	0.040

Table 1 と以下の Table または Fig. に示した値はすべて各組 5 本宛実験したものの平均値である。母体材料鋼を Al 浴に浸漬した時に Fe と Al とが反応して形成される Fe Al₃ 合金層の外径と内径の差が大きくなるほど、換言すれば合金層が厚くなるほど、母材鋼の径の減少はいちじるしくなる。したがって引張強さ、降伏応力等は合金層の厚さと母材鋼の径の減少割合に相関した値が予想される。また合金層の厚さの大小によって破壊の生起する層が異なればアルミナイズド鋼表面に現われる亀裂の発生とその進行状態も異なるであろうことが推測される。本実験ではこの点についても興味ある結果がえられた。

Ⅲ 結 果

静的引張試験にはアムスラー万能試験機を、動的引張試験にはシャルピー衝撃試験機を使用した。これらの試験結果をTable 3とFig. 2に示した。

Table 3 Mechanical properties of uncoated and aluminized specimens

Specimen number	Time of immersion (sec)	Tensile strength (kg/mm ²)	Impact value (kg-m/cm ²)	Yield point (kg/mm ²)		Elongation (%)	
				upper	lower	static	impact
0	0	45.6	18.8	28.5	28.0	38.3	32.0
1	5	44.6	18.1	31.8	29.6	36.8	29.1
2	30	43.5	18.0	29.7	28.7	36.3	28.5
3	60	43.1	17.0	29.4	28.4	35.6	27.9

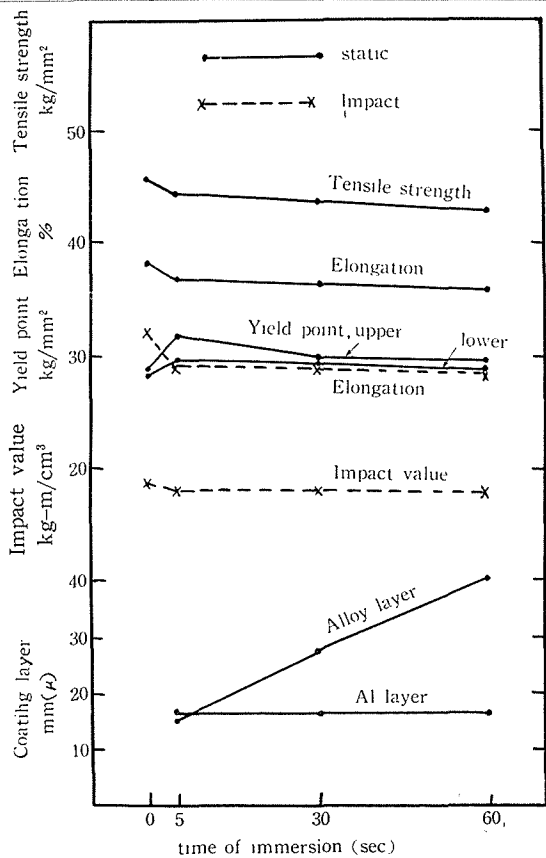


Fig. 2 Variation of the mechanical properties and the thickness of coating layer with the time of immersion, for the static and the impact tensile test pieces.

アルミナイズしたものはいずれも最大応力(引張強さ)は母材鋼のそれより小さく、浸漬時間の長いものほどその減少率は大きくなる。降伏点は母材鋼のそれよりやや大きな値を示し、5^S浸漬試料では上降伏点は11.6%、下降伏点は5.7%上昇し、この増加率は浸漬時間が長いものほど小さくなる。伸も引張強さと同様の傾向を示す。衝撃値はアルミナイズしたものは母材鋼のそれより低下し、その減少率は浸漬時間の増加にしたがって増大する。

(i) 静的引張における破壊の様相

被覆層の破壊あるいは亀裂の発生，ないしは亀裂の進行状況を検討するために破壊に至るまでの応力の各段階における状況をPhoto. 1～3に示した。Photo. 1～3を見ると破壊状況が浸漬時間の大小，すなわち合金層の厚さの大小にいちじるしく影響されることが明らかである。浸漬時間の相違による破壊の特徴を挙げれば次のようになる。

5^s 浸漬：

Photo. 1 に破壊に至るまでの数種の荷重下において表面に現われた亀裂の状況を示した。降伏点を示す荷重ではまだ表面の異常は認められない。降伏点をすぎても最大荷重に達するまではほとんど亀裂の発生はなく，最大荷重に至つて試験片全面に小さなウロコ状の亀裂が発生し，それ以後は破断部周辺の変形量のいちじるしい部分とくに微細なウロコ状を見るが，被覆層は母体材料鋼の変形にしたがい，合金層と母材鋼との完全な剝離はほとんど認められない。

30^s 浸漬：

Photo. 2 に示す。降伏点では亀裂は認められない。最大荷重に至つて亀裂の前段階の過程とも云うべき皺ないしは比較的大きな亀裂が数本発生するが，その亀裂は大体発生位置の周辺に止り，5^s の場合のように全面にはわたらない。以後それらの亀裂は変形のいちじるしい破断部にひろがり，その部分は母材鋼の変形に付随しないで被覆層の剝離を見る。

60^s 浸漬：

Photo. 3 に示す。降伏点では亀裂は認められない。最大荷重に至つて皺の発生を見るが，以後破断部に大きな，少数の亀裂が発生する。しかしこの亀裂は30^s の場合ほど周辺にひろがらないできわめて局部的にとどまり破断部周辺の比較的長い部分にわたつて剝離する。

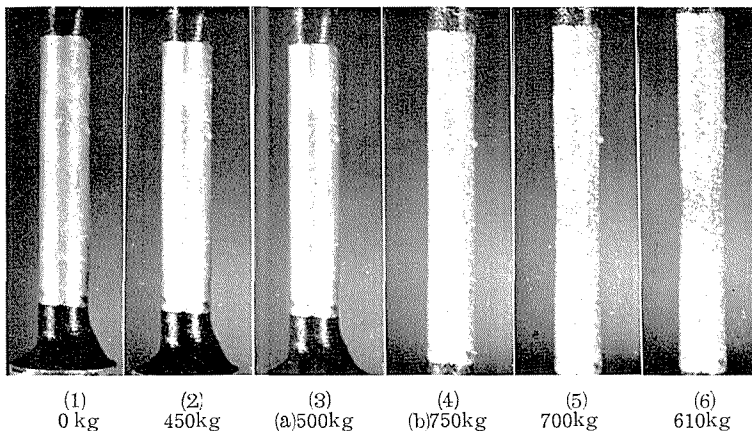


Photo. 1 Cracks—phenomena due to static tensile stress. The time of immersion was 5 sec. The diameter of specimen was 4.645mm. (a) corresponds with yield point. (b) corresponds with maximum stress.

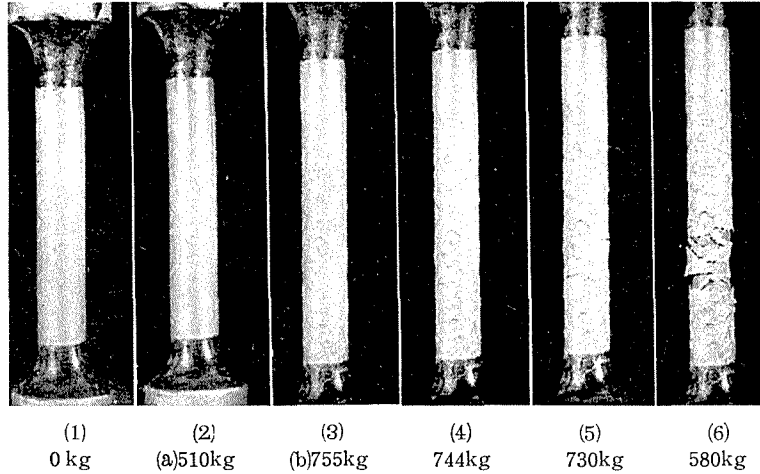


Photo. 2 Cracks—Phenomena due to static tensile stress. The time of immersion was 30 sec. The diameter of specimen was 4.665mm. (a) and (b) are shown in Photo. 1.

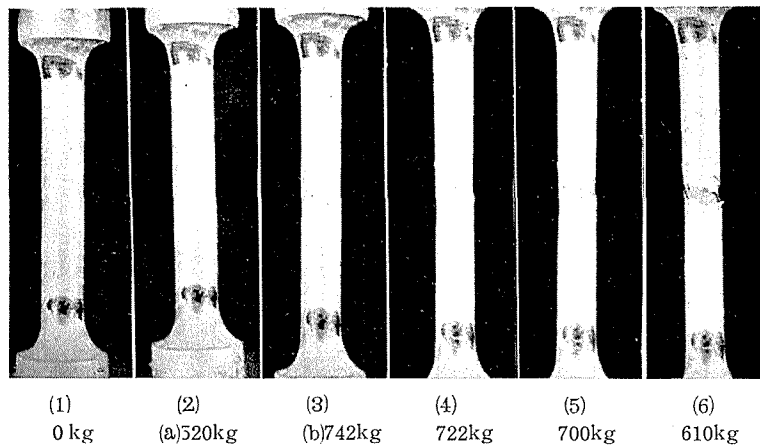


Photo. 3 Cracks—Phenomena due to static tensile stress. The time of immersion was 60 sec. The diameter of specimen was 4.680 mm. (a) and (b) are shown in Photo. 1.

(ii) 衝撃引張における破壊の様相

衝撃荷重を加えて引張つた結果を Photo. 4 に示したが、静的の場合とほとんど同様な傾向がえられた。ただ衝撃引張では静的引張にくらべて脆性的な剝離状態がきわめて顕著で Photo. 4c に示したように完全に管状の剝離を見る。

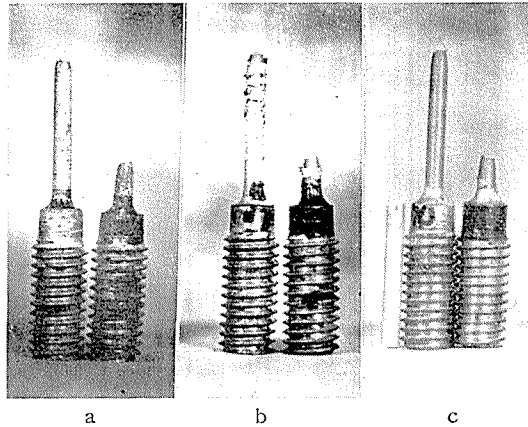


Photo. 4 Cracks in impact tensile test pieces for different types under various condition.

a : The time of immersion was 5 sec.

b : The time of immersion was 30 sec.

c : The time of immersion was 60 sec.

(iii) 組織と硬度

微小硬度計によつてAl層、合金層および母材鋼の硬度を測定した結果それぞれ46,800 および162の値をえた。Fe層（母材鋼をかりにFe層とする）の測定中に見られる傾向は合金層に近い部分ほど高い硬度を示すが、これは合金層に近接するほど高炭素鋼の組織を呈することからうなづけることである。Photo. 5~10に組織を示したが本実験におけるアルミナイズ処理では合金層は舌状に発達している。合金層とFe層との境界は直線より舌状であるほうが密着性はよいと思われる。

(iv) 焼鈍

材料は一般に高温になるほどその機械的強度は低下するからアルミナイズド鋼が耐熱性と機械的強度を同時に要求される場合、加熱されることによつて機械的性質がどのように変化するかと云うことは重要な事項である。この事項のために焼鈍が機械的性質と組織におよぼす影響を検討した。この実験に使用した材料は以上の実験に使用したものと同一であるが、アルミナイズ処理においてAl浴への浸漬時間を20Sのみとしたことと試験片の大きさが以上のものと相違する。試験片はFig. 3に示したものをアルミナイズ処理後真空中（ 10^{-3} mmHg）でTable 4に示す温度と時間に加熱保持し、炉中冷却したものについて試験した結果をTable 4とPhoto. 5~10に示した。

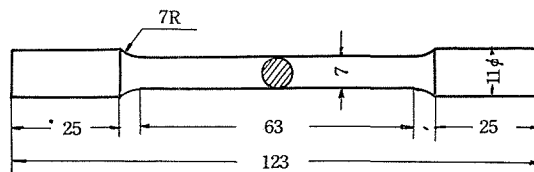
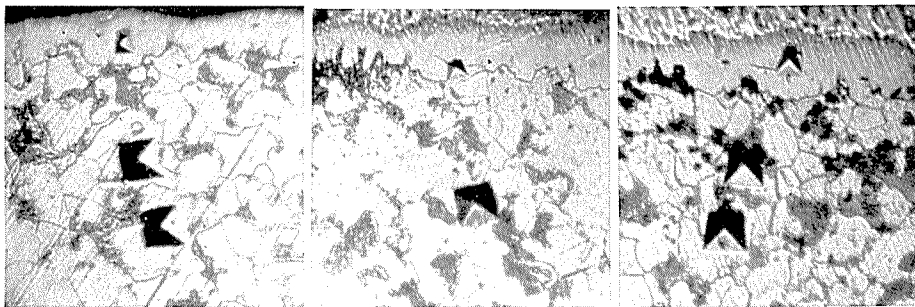
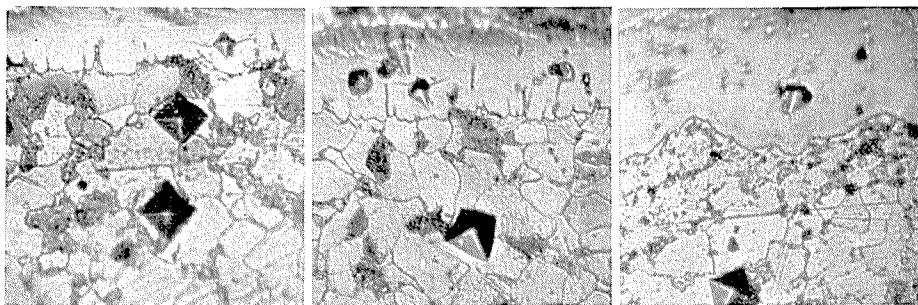


Fig. 3 test piece

Table 4 Mechanical properties of annealed specimens

Annealing temperature (°C)	Annealing time (hour)	Thickness of alloy layer (mm)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Yield point (kg/mm ²)
0	0	0	43.5	29.8	30.0
0	0	0.024	43.9	28.6	30.0
200	1	0.025	43.3	29.8	28.1
300	1	0.025	43.3	29.8	28.3
500	1	0.027	43.0	30.1	30.0
500	5	0.033	42.6	28.8	28.6
700	5	0.045	41.5	28.1	28.6

(a) ×400
aluminized(b) ×400
200°C 1h annealed(c) ×400
300°C 1h annealed**Photo.5** Effect of annealing temperature and annealing time on the thickness of alloy layer.(d) ×400
500°C 1h annealed(e) ×400
500°C 5h annealed(f) ×400
700°C 5h annealed**Photo.5** Effect of annealing temperature and annealing time on the thickness of alloy layer.

アルミナイズ処理だけのものとアルミナイズ処理後焼鈍したものを比較すれば、1^hの焼鈍では200, 300 および500°C各温度ともにFeAl₃の厚さも機械的性質もほとんど変化しないが、500°Cと700°Cで5^h焼鈍したものはFeAl₃層が相当に成長して厚くなり、機械的性質がやゝ低下する。

700°Cで5^h焼鈍したものはFeAl₃層の厚さが母材試験片の半径の1.3%になり、その時の引張強さは4.7%低下する。なおPhoto. 5 a—5 eをみるとFeAl₃層は舌状組織を呈しているがPhoto. 5 fのように焼鈍時間が長くて合金層が厚く発達したものは舌状が消失してFe層との境界はゆるやかな曲線を呈してくる。

IV 結果の考察

亀裂の発生あるいは破壊が予想される応力状態ではまづ次のことが問題になろう。

- 1 母材鋼と合金層との密着力
- 2 合金層をFeAl₃とすれば金属間化合物自体の脆性

すなわち母材鋼と合金層の境界で剝離するか、そうでないとすれば合金層自体より始まる亀裂が考えられる。これらの場合、最外層のAl層（Al層と呼んでいるが正確には冷却過程において二次的に析出する微細な共析晶を含むものと考えられる）は浸漬時間の長短、換言すれば合金層の厚さにはほとんど無関係で、いずれの場合でも浴温が同一で他の処理条件が同じであればほぼ一定の厚さのものであつて、この層の延性は大きい引張強さは小さいから被覆層の破壊に対しては問題にするほどの影響はない。一般にアルミナイズド鋼を引張破断した場合Al層と合金層の境界には異常を認め難い。ただし表面に最大応力が分布するような試験においてはおのづから別問題になる。しかし加工性に本質的な影響をおよぼすと考えられる合金層の厚さと密着力の關係はTable 5⁶⁾に示したように合金層の厚さが大きくなると密着抗力が減少するから加工性は低下する。

Table 5⁶⁾ Effect of thickness of alloy layer on contact strength

Alloy layer (mm)	Strength (kg/mm ²)	Component of bath
0.121	5.37	Al
0.097	5.64	Al-Zn
0.090	5.74	Al-Zn
0.080	6.05	Al-Zn

Photo. 1～4に示した破壊状況よりアルミナイズド鋼の破壊について次のような解釈を試みた。被覆層と母材鋼の密着力をFとし、5, 30および60^Sの浸漬に対して各々F₅, F₃₀およびF₆₀とすればF₅>F₃₀>F₆₀である。5^Sの場合は母材鋼を变形させるにはまだ小さ過ぎる荷重でも薄い被覆層に作用する応力はすでに合金層自体の亀裂発生の応力ある

いは破壊応力に達して試験片の全面に小さな亀裂が生じるが、まだこの時の応力は F_5 より小さい。合金層と母材鋼境界での剝離がなく破断後も被覆層が母材鋼と同様の変形を共にしている実験事実はこの解釈を裏付ける。これに反して $60S$ の合金層は $5S$ のそれより厚く $F_5 > F_{60}$ であるから合金層を破壊するまでには至らなくてもすでに F_{60} より大きくなり、合金層に亀裂が入る前に境界面で剝離する。したがって表面にはほとんど亀裂が認められない。ゆえに合金層は母材鋼と変形を共にしないで脆性破壊の様相を呈し、被覆層は管状に脱落する。 $30S$ のものは丁度中間の状態を呈している。以上の解釈は静的試験についてだけでなく Photo. 4 に示したように衝撃的に引張応力が働いた場合についても妥当なものと考えられる。

V 総 括

0.25% C の炭素鋼を $700^{\circ}C$ の溶融 Al 中に 5, 30 および $60S$ 浸漬して製造したアルミナイズド鋼の降伏点は母材鋼のそれより高いから、降伏点以下の応力が作用する耐熱部分には母材鋼より有効に使用することが出来る。以上総括して示せば次のようになる。

- (1) 引張強さと伸率は母材鋼のそれより低下するが降伏点はわずかに上昇する。しかし引張強さ、降伏点および伸率は浸漬時間の増加にしたがつて減少割合も大きくなる。すなわち 5, 30 および $60S$ の浸漬に対して引張強さは 2.2, 2.6 および 5.5 % 減少し伸率は 3.9, 5.2 および 7.1% 減少するが降伏点は 11.6, 4.2 および 3.2% の上昇を示す。
- (2) 衝撃値は母材鋼のそれより低下する。その減少割合は 5, 30 および $60S$ に対して 3.7, 4.3 および 9.6% である。衝撃引張における伸率は母材鋼のそれより 9.1, 10.9 および 12.8% 減少する。
- (3) 焼鈍温度が低く、焼鈍時間が短い間は合金層の厚さと機械的性質に対する影響は小さいが焼鈍時間と温度が大きくなればその影響は無視出来ない。 $700^{\circ}C$ で $5h$ 焼鈍したものは合金層が母材鋼の半径の 1.3% に成長しその時の引張強さは 4.7% 低下する。
- (4) $5S$ 浸漬試料の合金層の厚さは母材鋼の半径の 0.7% に相当し、被覆層の亀裂は合金層自体にあるいは Al 層自体に生起し、合金層が厚くなるにしたがつて亀裂の数は減るが亀裂そのものは大きくなる。合金層の厚さが母材半径の 1.7% になれば被覆層は母材鋼との境界で剝離する。

この実験は東京工大森永卓一教授の御指導のもとに行つたもので附記して深謝の意を表します。

文 献

- 1) 森永, 加藤, 中島: 軽金属, No. 9 (1953)
- 2) W. Hodge & E. M. Smith: Materials & Methods, 34 (1951)
- 3) D. P. Moses, G. G. Popham: Metallurgia, 70 (1952) 268
- 4) 森永, 加藤: 日本金属学会誌, 19 (1955) 578
- 5) Röhrig: Z. Metallkde, 26 (1934) 87
- 6) 森永, 小林, 松本: 軽金属, 4 (1951)

Summary

A Fundamental Study of Aluminized Steel (2nd Report).

—On the mechanical properties—

Yoshio KATO

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

The foundation materials (0.25% carbon steel) were used in the “normalized-structure” condition. They were carefully machined to size (4.6mm ϕ), and then dipped into molten aluminium bath held at 700° C.

The time of immersion was respectively 5, 30 and 60 sec. in order to know the difference in the thickness of alloying layer. The thicknesses obtained were respectively 0.015, 0.028 and 0.040mm.

The static and impact tensile tests were made on the uncoated and the aluminized specimens. The results of the tests are summarized as follows:

1) Tensile strength and elongation of aluminized specimens were lower than those of uncoated specimens. But yield strength of coated specimens was better than that of uncoated specimens.

2) When the specimens were dipped for 5 sec., the cracks came out in the alloying layer itself, while the fractures of the foundation steel dipped for 60 sec. appeared along the boundary between the alloying layer and the foundation steel.

3) The specimens which were dipped for 5 seconds showed numerous small scales in all the surface of coating. When the time of immersion was 60 seconds, the specimens were broken along the boundary without the appearance of scales in the coating surface.