

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การสอบปลายภาค ประจำภาคการศึกษาที่ 1

ปีการศึกษา 2553

วันที่ 11 ตุลาคม 2553

เวลา 09.00-12.00 น.

วิชา 237-407 Failure Mechanics and Analysis

ห้อง S104

**คำชี้แจงสำหรับนักศึกษา**

1. ข้อสอบมีจำนวน 8 ข้อย่อย (3 หน้า รวมไปถึงหน้านี้)
2. เอกสารประกอบข้อสอบ มีดังนี้
  - 2.1 Case study: Failure investigation on the cracked crawler pad link (8 หน้า)
  - 2.2 ภาพประกอบ crawler pad link (1 หน้า)
3. ตอบคำถามลงในสมุดคำตอบ เขียนหมายเลขข้อให้ชัดเจน
4. สามารถนำเอกสาร และอุปกรณ์ช่วยสอบทุกชนิด เข้าห้องสอบได้
5. คะแนนสอบครั้งนี้คิดเป็น 30 % ของคะแนนรวมทั้งหมด

**คำชี้แจงสำหรับกรรมการจัดทำข้อสอบ และผู้คุมสอบ**

1. ให้แจกสมุดคำตอบคนละ 2 เล่ม

อ. ณรงค์ฤทธิ์ โทธีรัตน์  
ผู้ออกข้อสอบ

## แบบทดสอบการวิเคราะห์การชำรุดอย่างเป็นระบบ ปีการศึกษา 2553

### I. ข้อกำหนดในการสอบ

1. สามารถนำเอกสารทุกชนิด และอุปกรณ์ช่วยสอบได้ทุกชนิด เข้าห้องสอบได้
2. จากรายงานผลการวิเคราะห์การชำรุด 1 ฉบับ

**Case Study : Failure investigation on the cracked crawler pad link**

ให้นักศึกษา ใช้ความรู้ ด้าน Fracture Mechanics, Systematic Failure Analysis, Heat Treatment, Metallurgy , Materials Engineering, Manufacturing Process และความรู้อื่น ๆ ด้านวิศวกรรม ศาสตร์ อธิบายผลการวิเคราะห์ เพื่อใช้ในการตอบ ข้อสอบ

3. เวลา 3 ชั่วโมง ข้อสอบ มีทั้งหมด 4 กลุ่มเป้าหมาย (**Materials Analysis, Process Analysis, Failure Analysis, Management & Prevention**)

### II. วัตถุประสงค์ในการสอบ

เพื่อให้นักศึกษาสามารถวิเคราะห์ปัญหาเป็นระบบ นำทฤษฎี มาเชื่อมโยงกับการปฏิบัติ และประยุกต์ใช้ในการ อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจริงและมองในเชิงการบริหารจัดการได้

#### คำสำคัญ

**ZG30CrMnMoV : Low Alloy Steel Casting**

**The People republic of China**

#### Chemical Composition

$C \leq 0.3 \%$  ,  $Si = 0.3-0.6 \%$  ,  $Mn = 0.6-1.0 \%$  ,  $P \leq 0.03 \%$  ,  $S \leq 0.03 \%$  ,  $Cr = 1.3-1.7 \%$  ,  
 $Ni = 0.3-0.5 \%$  ,  $Mo = 0.3 -0.5 \%$  ,  $V = 0.05-0.15 \%$  ,

#### Mechanical properties

**Yield Strength  $\geq 590$  MPa**

**Tensile Strength 830-980 MPa**

**Elongation  $\geq 10 \%$**

**Reduction of area  $\geq 50 \%$**

**Impact energy  $\geq 40$  J**

**Hardness 248-302 HB**

**ผู้ออกข้อสอบ : ณรงค์ฤทธิ์ ไทรรัตน์**

## ให้นักศึกษาตอบคำถามดังต่อไปนี้

1. ให้นักศึกษาวิจารณ์ผลการทดสอบทางเคมี และการทดสอบทางกลของวัสดุดังกล่าว จากผลการทดสอบ ใน Table 1 และ Table 2 ( 10 คะแนน)
2. Element และ Inclusion ชนิดใด ที่มีอิทธิพลและสร้างผลกระทบต่อการฉีกมากที่สุดคือตัวใดและเพราะเหตุใด (10 คะแนน)
3. สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการชำรุดดังกล่าวคืออะไร มาจากกระบวนการใด กลไกเกิดขึ้นได้อย่างไร (10 คะแนน)
4. หากท่านเป็นวิศวกรผู้ควบคุมการสร้างเครื่องจักรที่ใช้ Track pads ในการประกอบเครื่องจักร และยังมีรอประกอบ อีก 100 pads ซึ่งอยู่ใน Stock ท่าน จะมีแนวทางการจัดการบริหารอย่างไร (15 คะแนน)
5. บริษัทของท่านรับ Order สร้างเครื่องจักรอีก 10 Set ท่านจะมีวิธีการบริหารจัดการประกันคุณภาพการผลิต (Quality Assurance, QA) ไม่ให้มีชิ้นส่วนที่บกพร่อง เข้าสู่กระบวนการ สร้างเครื่องจักรของท่าน อย่างไร (15 คะแนน)
6. หากท่านเป็นวิศวกรที่ควบคุมการผลิต การหล่อชิ้นส่วน Track pads จงเสนอแนวทางที่จะปรับปรุงคุณภาพของการผลิต Track pads ดังกล่าว (15 คะแนน)
7. หลังจากอ่านรายงานการวิเคราะห์การชำรุดของ Track pads ดังกล่าว มีการโต้แย้งจากผู้ผลิตชิ้นส่วนว่า การแตกร้าว เกิดจากผลการใช้งานที่ไม่ถูกวิธี ไม่ได้เกิดจากคุณภาพของการผลิตชิ้นส่วน สมมุติว่าท่านเป็นผู้วิเคราะห์การชำรุด ท่านจะอธิบายข้อเท็จจริงได้อย่างไร (15 คะแนน)
8. จงเขียน Flow Chart ขั้นตอนการวิเคราะห์การชำรุดอย่างเป็นระบบ Track pads (10 คะแนน)



Contents lists available at ScienceDirect

# Engineering Failure Analysis

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/engfailanal](http://www.elsevier.com/locate/engfailanal)

## Failure investigation on the cracked crawler pad link

Zhi-wei Yu, Xiao-lei Xu\*, Xin Mu

Electromechanics and Material Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, P.R. China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 16 December 2009

Received in revised form 21 January 2010

Accepted 21 January 2010

Available online 1 February 2010

#### Keywords:

Link

Intergranular brittle fracture

Inclusions

Failure analysis

### ABSTRACT

An in-service failure of traveling gear crawler pad occurred on dredger. Inspection revealed cracking of two links that connect individual pads together. Intergranular brittle fracture occurred on the links and a significant amount of chain-like and rod-like AlN inclusions were found on the intergranular fracture surfaces. Examination of mechanical properties indicates that the plasticity and impact toughness of link material are considerably lower than the specified values, indicating the brittle nature of link material. The presence of intergranular AlN inclusions resulting from considerably excessive aluminum content in link material is responsible for the brittle nature of link material. The presence of shrinkage cavities facilitated the cracking process.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

An in-service failure of traveling gear crawler pad occurred on dredger. Inspection revealed cracking of two links that connect individual pads together. The crawler pads consist of cast steel links weld joined to sheet wings (Fig. 1). The links are the components that connect traveling crawler pads together into the tracks. They are connected by a steel pin through female and male lugs on the either end of casting. The tracks, in turn, enable the dredger to move around the mine site. The link material is ZG30CrMnMoV. The specified mechanical properties are as follows:

Ultimate strength: 830–980 MPa; Elongation:  $\geq 10\%$ ; Impact energy:  $\geq 40$  J (at the temperature of  $-5^\circ$ ); Core hardness: HB 248–302.

### 2. Experiment methods

The chemical composition of the failed link materials was determined by spectroscopic chemical analysis method. The microstructure was observed by scanning electron microscopy (SEM). The fracture surfaces were observed by visual and SEM. The mechanical properties were conducted.

### 3. Results

#### 3.1. Visual observations

The link is 840 mm long and 331 mm wide and consists of two male and female eyelets/lugs. The two cracked pad-links (Nos. 1 and 2) are shown in Figs. 2 and 3. For link 1, cracking occurred at the neck of the eyelet and the trace of crack is

\* Corresponding author. Tel.: +86 0411 84729613; fax: +86 0411 84726911.  
E-mail address: [xxiaolei@dlmu.edu.cn](mailto:xxiaolei@dlmu.edu.cn) (X.-l. Xu).

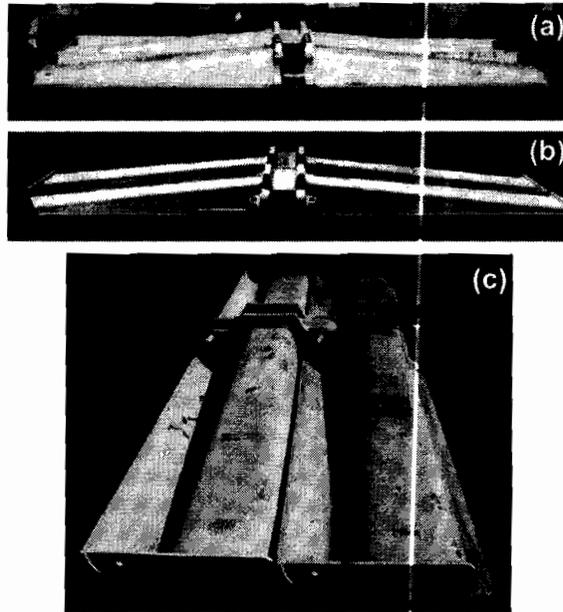


Fig. 1. Crawler pads: (a) front view; (b) rear view; (c) side view.

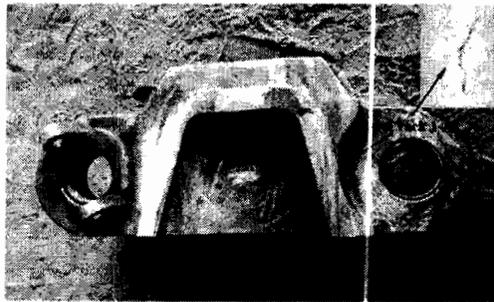


Fig. 2. Cracked link 1 (side face).

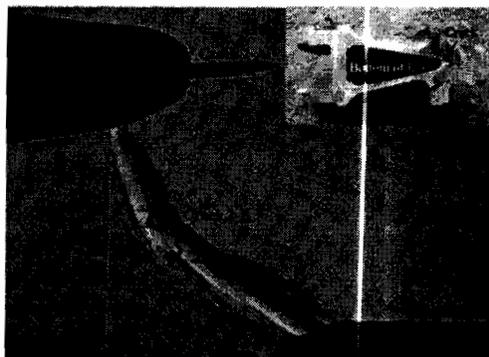


Fig. 3. Cracked link 2 (end face).

basically consistent with the neck fillet (labeled crack 1-A in Fig. 2). For link 2, cracking occurred at edge of triangle hole of the bottom of link (labeled cracks 2-A and 2-B in Fig. 3). The cracks present wavy. Crack 1-A is about 22 mm long and cracks 2-A and 2-B are about 13 mm and 73 mm respectively.

### 3.2. Examination of metallurgical quality

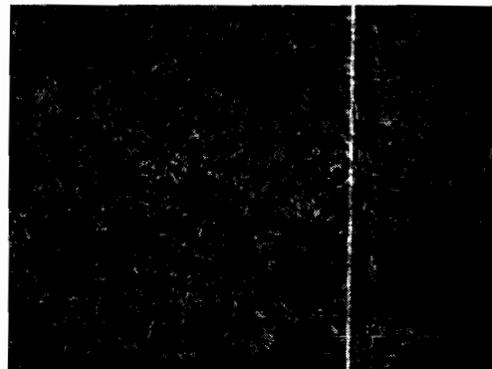
#### 3.2.1. Chemical composition of link material

Four samples were taken from the link segments close to and far from the cracking location to conduct chemical composition examination. Table 1 shows the chemical composition analysis results, along with the specified chemical composition. It can be seen that Cr and Mo contents in link 2 is below the specification and less Ni was probed in the two link material. It is important that the considerably excessive Al content was probed in two link materials.

**Table 1**

The results of the chemical composition analysis of link material (wt.%).

Components	Samples	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
Link 1	No. 1	0.24	0.52	0.80	0.023	0.018	1.62	0.019	0.29	0.10	0.20
	No. 2	0.23	0.52	0.80	0.023	0.023	1.62	0.024	0.29	0.10	0.20
Link 2	No. 1	0.23	0.57	0.87	0.016	0.015	1.18	0.026	0.19	0.06	0.36
	No. 2	0.22	0.56	0.92	0.020	0.025	1.20	0.024	0.19	0.06	0.35
Specified		≤0.30	0.30–0.60	0.60–1.00	≤0.03	≤0.03	1.30–1.70	0.30–0.50	0.30–0.50	0.05–0.15	–



**Fig. 4.** Microstructure of link material.



**Fig. 5.** Cross sectional morphology of crack 1-A.

### 3.2.2. Microstructural examination

Microstructure in various regions was observed by OPM. The observation results revealed the microstructure of the core is composed of tempered martensite (Fig. 4), which is normal texture of quenched and tempered link material. The sectional sample normal to crack 1-A was observed (Fig. 5). It can be seen that the external section of crack 1-A is wider and a thick oxidation film is filled in crack. Oxidized surface of the crack confirms hot tearing phenomenon [1]. The inner section of crack 1-A is shallow. The thicker decarburized layer consisting of ferrite was observed at both flanks of the external section. However, no decarburized layer was found at both flanks of the inner section, which exhibits normal microstructure in accordance with the matrix microstructure. It is suggested that crack 1-A had produced before quenching and propagated further from the external to the inner during quenching process.

### 3.2.3. Mechanical properties

Tensile, Charpy V notch impact toughness and Brinell hardness tests were conducted. The results of mechanical properties are presented in Table 2. The hardness values of link material match technical specifications, whilst, the yield strength and tensile strength values are lower than the specification except for the yield strength values of link 1. Specially, elongation and section shrinkage and impact toughness are considerably lower than the specified values and no visible necking occurred on the six tensile samples, indicating considerable brittleness of the link.

From the fracture morphology of the tensile and impact samples, the fracture surfaces are rough and crystalline and intergranular fracture features were exhibited (Fig. 6). No obvious fiber region and shear lip were found.

### 3.3. Observation of fracture surfaces

Fracture surfaces were prepared by opening cracks 1-A, 2-A and 2-E of the links. All the fracture surfaces have similar macro-features detailed as follows (Fig. 7):

- (1) The fracture surfaces are very rough and sustained discolouration showing oxidation tan.
- (2) The fracture surfaces exhibit intergranular fracture features and the grain size is very coarse, similar to the fracture appearance of tensile and impact samples.
- (3) No radiating crack propagation marks were found on the fracture surfaces, which appear usually on the quenching-cracking fracture [2], so cracking resulting from the quenching may be excluded.

It is difficult to reveal the fracture features of the failed links due to a thick oxidation covering on the fracture surface. A penetrating fractography investigation were performed on fracture surfaces of the tensile samples by SEM. Similar micro-features were revealed on the six fracture surfaces and representative fracture morphologies are shown in Fig. 8. The fracture surface reveals intergranular features with the coarse grain size (Fig. 8a) and the shrinkage cavities within which dendritic lobes [3] are clearly seen (Fig. 8b–d). Inclusions are present within dendritic lobes (Fig. 8d), which were revealed to be MnS by EDAX analysis (Fig. 9a). Slag inclusions were found on the fracture surface (Fig. 8e), which are demonstrated to be  $Al_2O_3$  by EDAX analysis (9b). "Suture-like" morphology was present on the dendritic lobes, which is composed of chain-like and rod-like inclusions (Fig. 8f). And straight traces with some orientations are exhibited on the intergranular fracture surfaces (Fig. 8g). By high-powered magnification observation, chain-like and rod-like inclusions are also present on the bottom of straight traces (Fig. 8h). The chain-like and rod-like inclusions are demonstrated to be the AlN phases by EDAX analysis (Fig. 9c). It is suggested that the intergranular brittle fracture of the link materials is related to the presence of chain-like and rod-like AlN inclusions [4–6].

The intergranular fractures with coarse grains and shrinkage cavities with dendritic lobes were also revealed on the cracked links (Fig. 10a and b). The fracture surfaces of the failed links were covered with a layer of oxidation, but the straight traces with lots of AlN inclusions similar to ones on the fracture surfaces of tensile samples were also found (Fig. 10c). It is suggested that the cracking failure of the links are also related to the presence of inclusion AlN phases.

**Table 2**  
The results of mechanical testing.

Components	Reading	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Impact energy (J)	Hardness (HB)
Link 1	1	599	720	3.2	3.0	14	280
	2	633	640	1.7	1.4	12	281
	3	700	717	1.9	2.6	17	283
Link 2	1	505	508	1.5	0.6	18	264
	2	490	530	1.0	0.6	8	248
	3	481	487	1.6	1.2	14	249
Specified		≥590	830–980	≥10	≥50	≥40	248–302

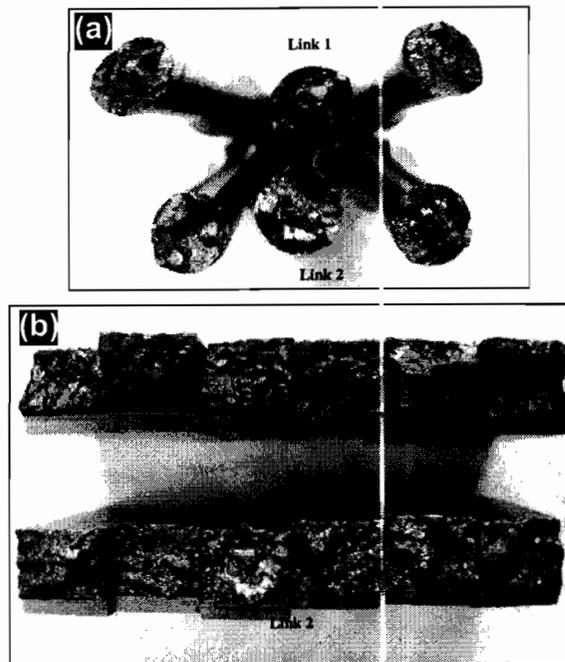


Fig. 6. Macro-fractures of tensile and impact testing samples: (a) tensile testing samples; (b) impact testing samples.

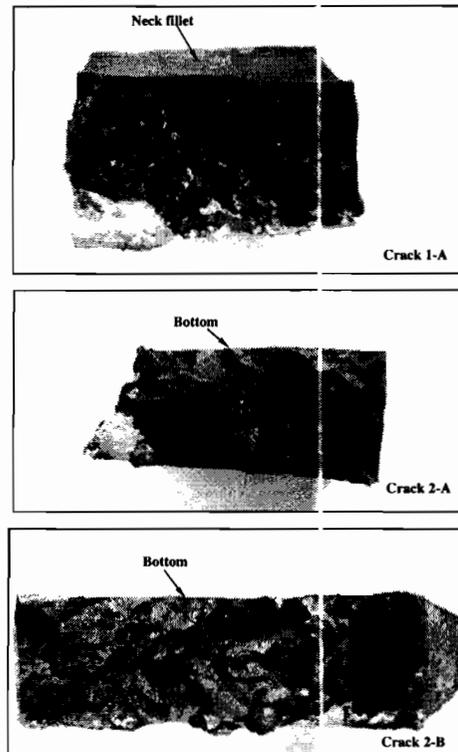
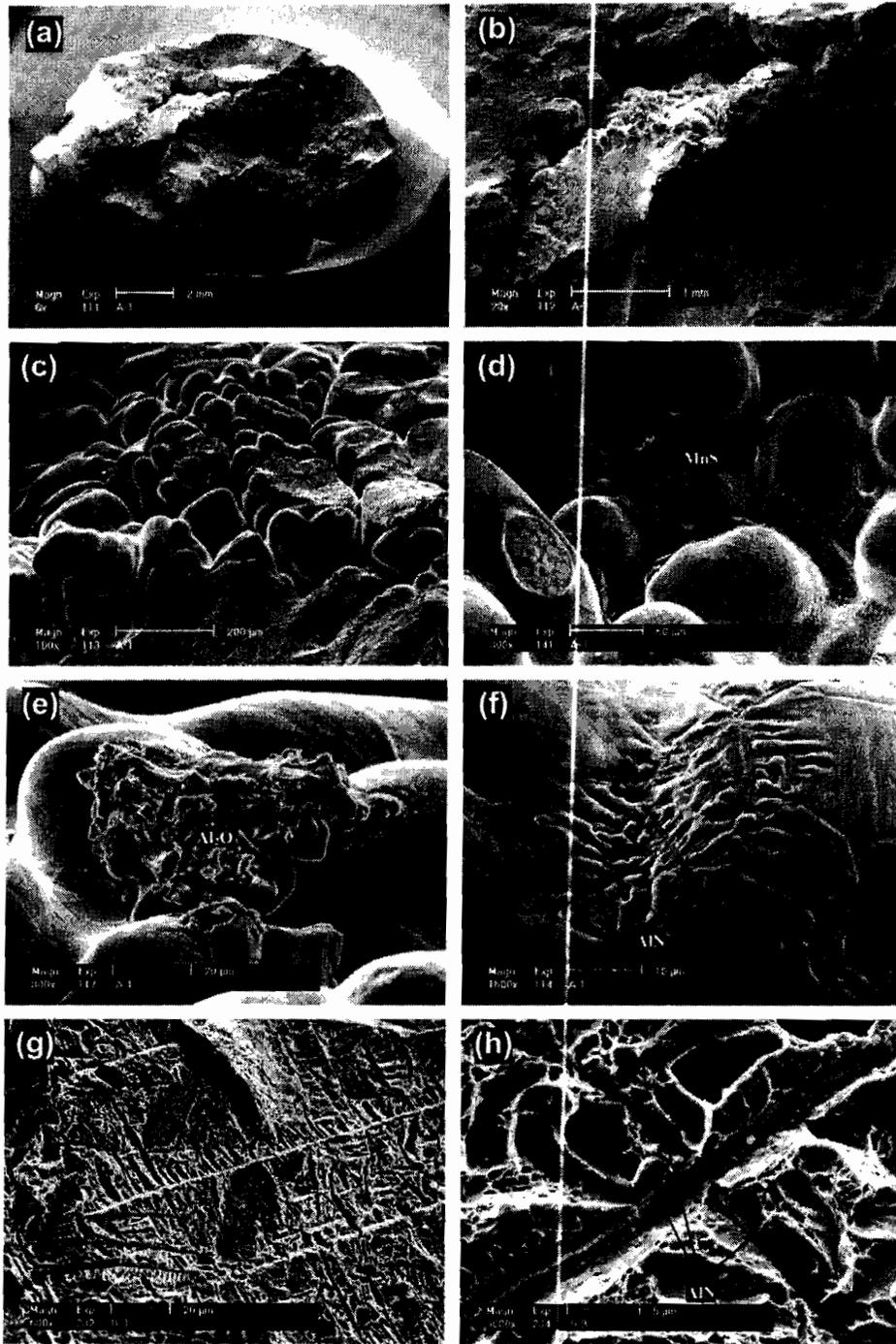


Fig. 7. Macro-fractures of cracked links.



**Fig. 8.** SEM observations on fracture surfaces of tensile samples: (a) general view showing intergranular fracture and coarse grains, (b) showing shrinkage cavities, (c) showing dendrite lobes, (d) showing inclusions within dendrite lobes, (e) showing slag inclusions, (f) showing "suture-like" morphology, (g) showing straight traces, and (h) showing inclusions at the bottom of straight traces.

#### 4. Analysis of failure causes

From the observation and analysis in Section 3, it is inferred that the mechanical properties, especially, the impact toughness and plasticity are considerably lower than the specified values, indicating the brittle nature of the link material. A lot of

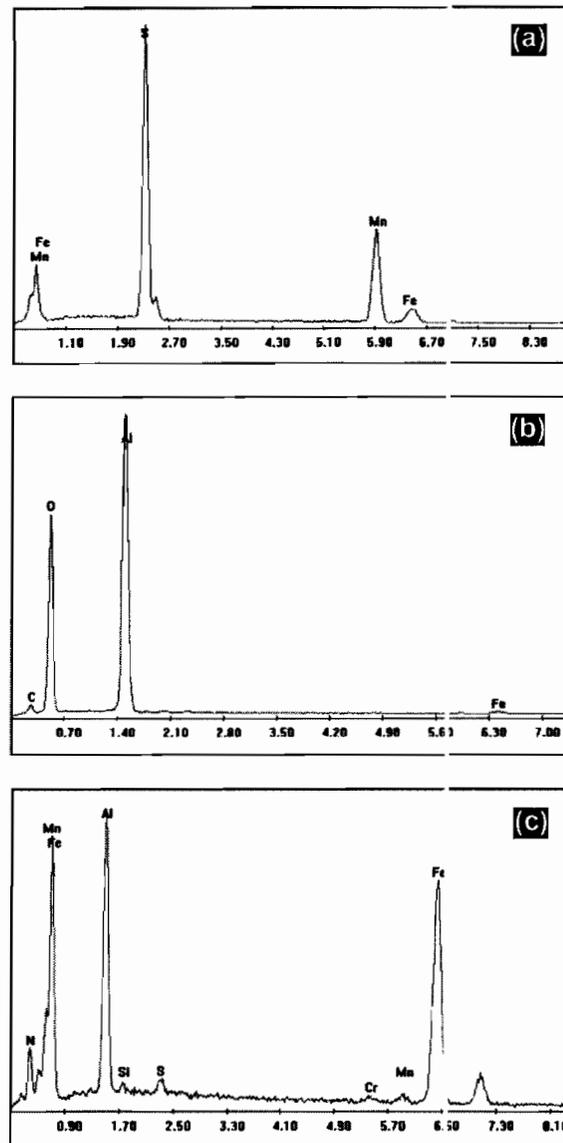
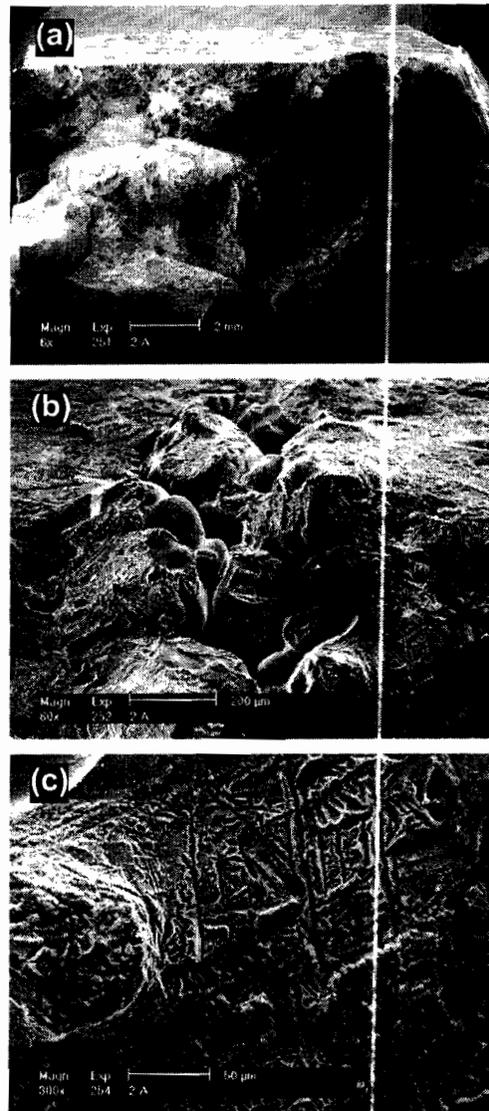


Fig. 9. EDAX spectrum taken from the inclusion regions of Fig. 8: (a) inclusion region of Fig. 8d, (b) inclusion region of Fig. 8e, and (c) inclusion region of Fig. 8h.

metallurgical inclusions AlN were found on intergranular fracture surfaces, which is related to considerably excessive Al content in the link material resulting from excessively adding Al in steelmaking. The presence of AlN phases in the grain boundary intensely weakened boundary strength and decreased the impact toughness and plasticity of the material to lead to brittle intergranular fracture of the link. Further, the presence of shrinkage cavities facilitated the cracking process [5].

## 5. Conclusions

The plasticity and impact toughness of link material are considerably lower than the specified values. Intergranular fracture occurred on the failed links and the tensile and impact samples. Brittle nature of failed link material was revealed. A lots of chain-like and rod-like AlN inclusions were found on the intergranular fracture surfaces, which weaken strength of grain-boundary to lead to brittle fracture of the links. The considerably excessive aluminum content in link material resulting from steelmaking is responsible for the brittle nature of link material. The presence of shrinkage cavities facilitated the cracking process.



**Fig. 10.** SEM observations on the fracture surfaces of failed link (link 2, crack 2-A): (a) general view showing intergranular fracture and coarse grains, (b) showing dendritic lobes, and (c) showing straight traces.

## References

- [1] Mousavi Zadeh Noughabi SM, Dehghani K, Pouranvari M. Failure analysis of automatic coupler SA-3 in railway carriages. *Eng Fail Anal* 2007;14:903–12.
- [2] Ravi Kumar B, Bhattacharya DK, Das Swapan K, Ghosh Sandip. Premature failure of a spring due to quench cracks. *Eng Fail Anal* 2000;7:377–84.
- [3] Jha Abhay K, Diwakar V. Metallurgical analysis of failed gear. *Eng Fail Anal* 2002;9:359–65.
- [4] Zhong Qun-Peng, Zhao Zi-Hua. *Fractography*. Beijing: Higher Education Press; 2006 [in Chinese].
- [5] Li Cao, Zhou Guangying. Intergranular fracture of low alloy cast steel. *Mater Charact* 1997;38:19–23.
- [6] Croft NH, Entwisle AR, Davies GJ. Origins of dendritic AlN precipitates in aluminum killed steel castings. *Met Technol* 1983;10:285–90.

