

中碳贝氏体支承辊钢低应力牵引滚动接触下的 疲劳短裂纹行为*

窦 鹏 李友国 梁开明

(清华大学材料科学与工程系先进材料教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要 研究了中碳贝氏体支承辊钢在低应力、水润滑和牵引滚动条件下的接触疲劳裂纹萌生与扩展特征, 发现了表面起源的垂直短裂纹和棘齿短裂纹. 疲劳 10^4 cyc 时, 垂直短裂纹就在接触表面大量出现, 且在萌生后立即进行高速初始扩展, 其后绝大多数停止长大; 棘齿短裂纹出现较晚. 两种短裂纹长大到一定深度时均停止扩展. 在疲劳失效寿命的 70%—80% 时, 垂直短裂纹恢复扩展, 并随即加速长大. 几乎同时, 两种短裂纹在亚表层以转折的方式重新扩展. 在表面损伤出现之前, 两种短裂纹的萌生和扩展行为始终局限在近表面薄层内.

关键词 滚动接触疲劳, 垂直短裂纹, 棘齿短裂纹, 中碳贝氏体支承辊钢

中图分类号 TG142, TG115.5 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2005)02-0140-05

BEHAVIOR OF SHORT FATIGUE CRACKS IN MEDIUM CARBON BAINITIC BACK-UP ROLL STEEL UNDER MILD TRACTIVE ROLLING CONTACT

DOU Peng, LI Youguo, LIANG Kaiming

Department of Materials Science and Engineering, Laboratory of the Advanced Materials, Tsinghua University, Beijing 100084

Correspondent: DOU Peng, Tel: (010)62779769, E-mail: doupeng99@mails.tsinghua.edu.cn

Supported by "985" fund of Tsinghua University (No.091107049)

Manuscript received 2004-03-22, in revised form 2004-07-09

ABSTRACT The surface-initiated rolling contact fatigue (RCF) behavior of the medium carbon bainitic back-up roll steel has been investigated at low contact pressure and under water lubricated and tractive rolling conditions. Two types of surface originated RCF short cracks, i.e. vertical short cracks and ratcheting short cracks were observed. The former occur on contact surfaces in numbers at as early as 10^4 cyc. Viewed from surfaces, they propagate initially with high growth rates immediately after initiation, and then most of them stop growing. The latter nucleate far later. The two types of short cracks stop propagating on reaching some depth. Vertical short cracks on surfaces resume propagating till 70—80 percent of the total RCF failure lives and then are accelerated to propagate, almost synchronously, the two types of short cracks resume growing with a turned mode in subsurface. The behavior of the initiation and propagation of the two types short cracks is confined to a thin surface layer prior to surface damage.

KEY WORDS rolling contact fatigue, vertical short crack, ratcheting short crack, medium carbon bainitic back-up roll steel

连续可变凸度 (CVC) 技术不仅能够高效率地控制板带的板形和平直度, 而且可以使得生产成本显著下降, 因而得到了广泛应用. 支承辊是 CVC 轧机的重要部件, 在苛刻的工作条件下长期运转后会发生滚动接触疲劳. 而一

旦出现宏观表面疲劳 (深度与整体 Hertz 接触半宽度相当的宏观点蚀和深剥落等), 支承辊消耗就会急剧上升. 工业上一般通过有计划的磨削来防止这种情况的出现. 然而, 目前采用的磨辊工艺尽管能够有效地控制表面疲劳, 但却会导致支承辊材料不必要的快速损耗, 造成较大浪费, 因而需要对其进行优化.

目前, “预防性磨削”策略被认为是最好的滚动接触部件维护磨削方法. 它总是试图通过确定最佳磨削量和最

* 清华大学 985 基金资助项目 091107049

收到初稿日期: 2004-03-22, 收到修改稿日期: 2004-07-09

作者简介: 窦 鹏, 男, 1972 年生, 博士生

佳磨削时间间隔,使得磨削工艺既能有效地控制滚动接触疲劳,又能最大限度地降低打磨工作量和材料消耗,延长有效使用寿命^[1-6]。显然,这和支承辊磨削工艺的优化目标相同。“预防性磨削”策略的重要原则是使得金属磨削率刚好能够在表面薄层中已经存在的和初始萌生的微裂纹快速扩展而形成表面疲劳之前将它们去除^[1,3,5]。这一原则的经济性、有效性和可靠性已经为钢轨维护实践所证实^[1,2,7]。因此,可以按照该重要原则进行支承辊磨削工艺的优化。显然,优化依据为滚动接触疲劳裂纹的萌生和扩展行为,主要包括裂纹萌生点位置和萌生寿命、扩展速率和扩展路径的变化规律等。

一般来讲,疲劳过程可分为四个阶段,即短裂纹萌生阶段、短裂纹扩展阶段(第一扩展阶段)、长裂纹扩展阶段(第二扩展阶段)和最后失效^[8]。对于高强度钢而言,疲劳寿命的主要部分(约60%—80%)都消耗在短裂纹萌生和短裂纹扩展阶段^[9]。例如,对于 AISI 8620 齿轮钢,约80%的滚动接触疲劳寿命都消耗在长裂纹扩展阶段之前^[10]。也就是说,短裂纹行为对高强度钢的疲劳有重要影响。此外,长裂纹的扩展速率大于短裂纹,并且一旦进入长裂纹扩展阶段,扩展速率会随着周次而增大。这意味着磨削率不成比例地迅速增大而造成材料浪费^[1]。而滚动接触疲劳短裂纹行为的研究可以帮助搞清裂纹扩展深度随着周次的变化规律和长、短裂纹扩展的时间分界点,这对于按照“预防性磨削”策略的重要原则进行最佳磨削量和最佳磨削时间间隔的确定具有关键指导作用。

支承辊钢是含贝氏体/马氏体(B/M)复相组织的具有良好强韧性配合的高强度钢,目前未见关于这种钢的滚动接触疲劳短裂纹行为的研究报道。本文模拟实际工作条件,进行了它在低应力、水润滑和牵引滚动条件下的接触疲劳实验,发现了垂直短裂纹和棘齿短裂纹,并详细研究了它们的扩展行为。

1 实验方法

实验在 JPM-1B 型接触疲劳磨损实验机上进行。上试样为铬钼系中碳贝氏体支承辊钢(40Cr3MoV 钢)。下试样模拟工作辊,材料为 Cr12MoV 钢。支承辊钢由下贝氏体和回火马氏体及少量未溶碳化物组成。Young's 模量为 2.2×10^5 MPa, Poisson 为 0.3, 拉伸屈服强度为 1420 MPa, 洛氏硬度在 47—49 之间。工作辊钢由回火马氏体和少量粒状碳化物以及残余奥氏体组成。Young's 模量为 2.1×10^5 MPa, Poisson 为 0.35, 洛氏硬度在 60—63 之间。为了模拟中碳贝氏体钢支承辊的实际工作条件,实验前拆卸掉上试样的驱动齿轮。因此,下试样为驱动试样,上试样为被驱动试样,二者的接触类型属于牵引滚动接触。

采用 Talysurf 5P-120 表面形貌仪,根据触针仿形法测得下试样表面均方根粗糙度在 $0.6607—0.8377 \mu\text{m}$ 之

间。上试样接触表面的均方根粗糙度为 $0.3833 \mu\text{m}$ 。

根据中碳贝氏体钢支承辊的工作条件,滚动接触疲劳实验的最大接触压力 p_0 在 580—1360 MPa 之间,滑差为零,转速为 400 cyc/min,用水作润滑剂。有计划地中断实验,取上试样在 OLYMPUS-PMG3 金相显微镜和 CSM950 扫描电子显微镜下观察接触表面裂纹形貌,测量并记录裂纹长度,以便研究表面裂纹扩展速率的变化规律,然后继续实验。对于每一载荷的实验,至少进行 15 次观察和记录。由于要研究短裂纹行为,越是在疲劳实验初期,停止实验进行观察和记录的次数越频繁。此外,通过解剖研究滚动接触疲劳裂纹在亚表层的长大过程。以开始出现表面损伤为判据测定疲劳失效寿命曲线,以滚动接触疲劳裂纹在亚表层初始转折扩展为判据^[11,12]测定工业萌生寿命曲线。在测定两条曲线时,最大接触压力 p_0 的范围为 580—1730 MPa。对应于每一接触载荷,均用三个试样来测定相应的疲劳失效寿命和工业萌生寿命。因此,本文测得的两条曲线上的数据点所指示的都是平均值。

2 实验结果与讨论

2.1 工业萌生寿命和疲劳失效寿命曲线

中碳贝氏体支承辊钢的工业萌生寿命曲线与疲劳失效寿命曲线如图 1 所示。可见,当最大接触压力 p_0 在 580—1360 MPa 之间时,工业萌生寿命达到疲劳失效寿命的 70%—80%。也就是说,滚动接触疲劳失效寿命的主要部分都消耗在短裂纹萌生阶段和短裂纹扩展阶段。这种滚动接触疲劳寿命的大部分都消耗在长裂纹扩展阶段之前的现象已经被 Blake 等^[10]报道过。

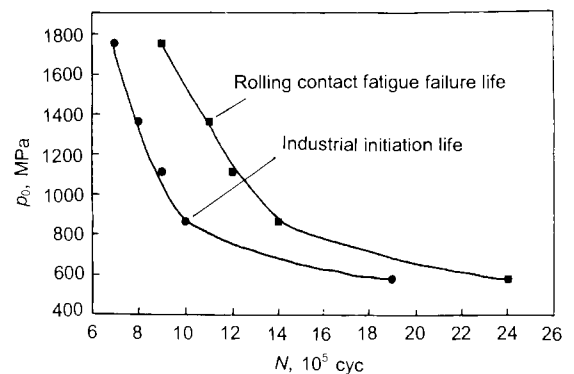


图 1 工业萌生寿命曲线与疲劳失效寿命曲线

Fig.1 Non-linear correlation between industrial initiation life, RCF failure life and the maximum contact pressure for the 40Cr3MoV steel

2.2 接触疲劳短裂纹行为

2.2.1 垂直短裂纹行为 当疲劳实验进行到 10^4 cyc 时,在接触表面上出现了大量的横向裂纹,如图 2 所示。其中大多数横向裂纹与试样轴线平行或者近似平行。剖面观察发现,这些裂纹与接触表面垂直或者接近垂直,如图

3 所示, 因此被称为垂直裂纹. 表面观察发现, 经初始扩展后, 绝大多数垂直短裂纹的长度在 30—120 μm 之间. 显然, 它们的初始扩展速率非常高. 接下来, 表面上的垂直短裂纹的扩展速率急剧下降以至于停止长大, 并在此后大量周次内一直处于“休止”状态. 直到疲劳失效寿命的 70%—80% 时才恢复扩展. 重新开始扩展后不久, 它们发生弯折或者分叉, 然后进入加速扩展阶段, 如图 4 所

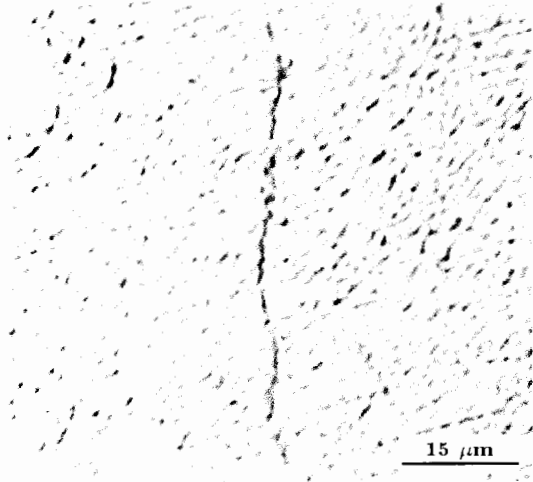


图 2 表面萌生垂直短裂纹

Fig.2 Vertical short cracks initiated at surface ($p_0 = 1360 \text{ MPa}$, $N=1 \times 10^4 \text{ cyc}$)

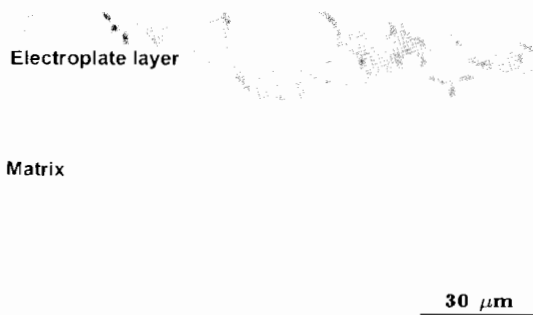


图 3 剖面垂直短裂纹

Fig.3 Vertical short crack viewed on cross section ($p_0 = 1360 \text{ MPa}$, $N=4 \times 10^5 \text{ cyc}$)

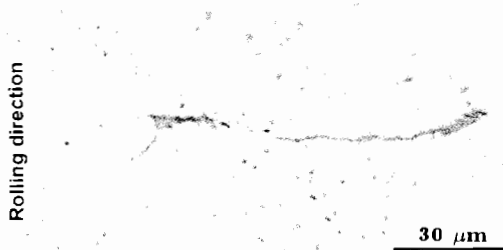


图 4 表面垂直裂纹的加速扩展

Fig.4 Vertical crack at accelerated propagating stage ($p_0 = 1100 \text{ MPa}$, $N=9.0 \times 10^5 \text{ cyc}$)

示. 图 5 显示了表面上的垂直裂纹扩展速率的变化规律. 可见, 它与 Clarke 等^[13] 和 Blake 等^[10] 通过 AISI 8620 齿轮钢的高应力、大滑差和油润滑的滚动接触疲劳实验发现的表面萌生倾斜裂纹 ($15^\circ - 25^\circ$) 扩展速率的变化规律相似.

剖面观察发现, 当长大到一定深度时, 垂直短裂纹停止扩展. 直到疲劳失效寿命的 70%—80% 时, 它们才在亚表层转向水平或者直接折回接触表面的方式重新开始扩展. 并且, 扩展方向与试样滚动方向相反. 在此之前, 尽管解剖和观察了大量试样, 也没有发现垂直裂纹在亚表层转折扩展的现象.

2.2.2 棘齿短裂纹行为 在接近疲劳失效寿命中期时, 接触表面上出现棘齿短裂纹 (其萌生是由微凸体接触应力影响表面薄层内发生的棘齿效应引起的), 如图 6 所示. 可见, 由于“剪切唇”的存在使得接触表面上的棘齿短裂纹线条粗糙, 难以对其长大过程进行跟踪统计.

剖面观察发现: 棘齿短裂纹起源于接触表面. 萌生以后, 它们以非常尖锐的角度进行初始扩展, 角度很小以至

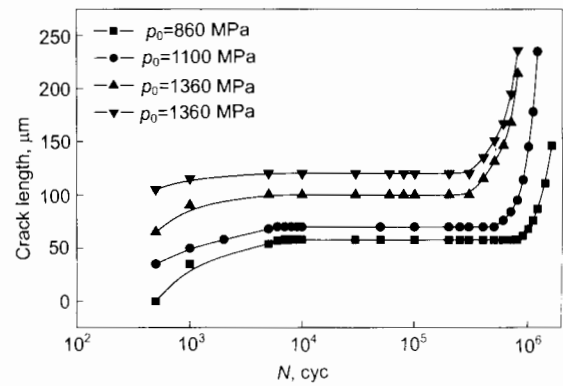


图 5 表面垂直裂纹的扩展行为

Fig.5 Typical growth behavior of vertical cracks on contact surfaces

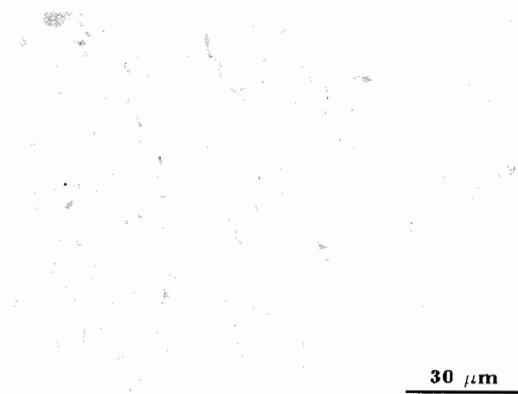


图 6 表面棘齿裂纹

Fig.6 Top view of ratcheting cracks on roller surfaces ($p_0 = 580 \text{ MPa}$, $N = 10 \times 10^5 \text{ cyc}$)

于几乎与接触表面平行,且初始扩展的方向与试样滚动方向相反,如图 7 所示.当初始扩展至一定深度时,它们停止长大,并且在以后大量的周次内一直处于“休止”状态. Bormetti 等^[11]报道过表面萌生棘齿裂纹沿着塑性流动方向初始扩展后停止长大的现象.直到疲劳失效寿命的 70%—80% 时,它们以在亚表层转向水平的方式重新开始扩展,如图 8 所示.图 8 显示了表面萌生棘齿裂纹扩展的两个阶段:倾斜部分的短裂纹扩展阶段和水平部分的长裂纹扩展阶段^[12].此前,虽经大量的解剖观察,也没有发现棘齿短裂纹在亚表层发生转折扩展的现象.图 9 显示了棘齿裂纹在亚表层沿水平方向长大的长裂纹扩展.

在垂直短裂纹和棘齿短裂纹恢复扩展后不久,表面损伤(主要由微剥落和微点蚀组成)就形成了,分别如图 10 和 11 所示.而表面损伤一旦出现,就成为宏观表面疲劳的优先萌生点^[14].研究发现,在表面损伤出现之前,两

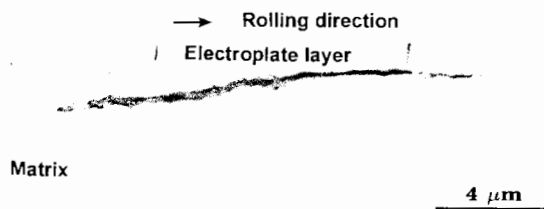


图 7 初始棘齿短裂纹

Fig.7 Initiation at surface and propagation along depth direction of ratcheting crack viewed on longitudinal section ($p_0=860$ MPa, $N=4\times 10^5$ cyc)

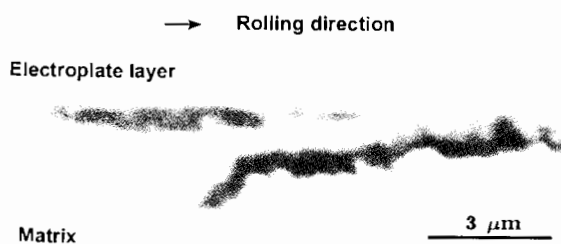


图 8 棘齿裂纹的初始转折

Fig.8 Initially turning and then horizontal growth at subsurface of ratcheting crack viewed on longitudinal section ($p_0=860$ MPa, $N=12\times 10^5$ cyc)

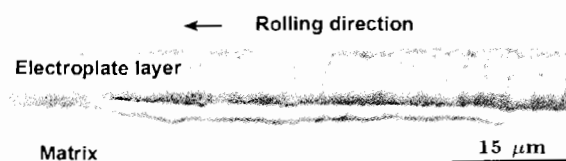


图 9 棘齿裂纹的水平平行扩展

Fig.9 Horizontally propagating of ratcheting long crack at subsurface ($p_0=860$ MPa, $N=13\times 10^5$ cyc)

种短裂纹的萌生和扩展行为均局限在表面薄层内.具体地说,垂直短裂纹和棘齿短裂纹的最大深度分别不超过 $15\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$.即使经过大量的解剖观察,也没有发现它们向更深的亚表层扩展而形成的宏观裂纹,更没有观察到宏观表面疲劳.这种现象与由 Tallian 等^[15]提出后又经 Miller 等^[16]验证存在的“休止区”(位于微凸体接触应力影响表面薄层和宏观 Hertz 接触应力场中亚表层最大剪应力 τ_{max} 达到较高强度的深度之间的低剪应力区)有关.

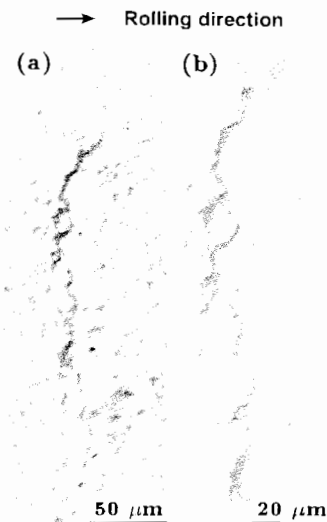


图 10 表面失效形貌 ((b) 为 (a) 的放大图像),失效形貌显示裂纹在亚表层的扩展踪迹,即初始的垂直接触表面内扩展和随后的倾斜扩展

Fig.10 Surface failure morphologies (wherein (b) is the magnified image of the central part of (a)), the upper view showing the subsurface trace of crack with the initial vertically downward portion and the subsequent angled portion visible ($p_0=1360$ MPa, $N=1.3\times 10^6$ cyc)

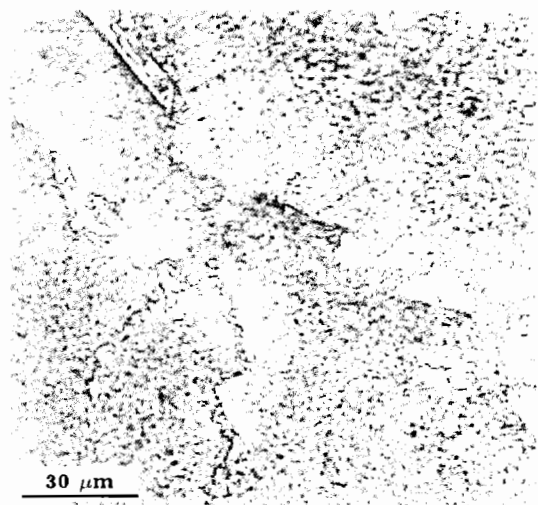


图 11 棘齿效应诱发表面损伤,箭头指示滚动方向

Fig.11 Surface damage due to ratcheting, arrow denoting the rolling direction ($p_0=1360$ MPa, $N=12\times 10^5$ cyc)

根据中碳贝氏体支承辊钢的滚动接触疲劳短裂纹行为,明确了各种载荷下的长、短裂纹扩展的时间分界点—

工业萌生寿命,这可以指导确定最佳磨削时间间隔;在表面损伤出现之前,滚动接触疲劳短裂纹的萌生和扩展行为一直局限于表面薄层内,按照“预防性磨削”策略的重要原则,表面薄层的厚度可以作为最佳磨削量的基础参考值.与之相似的是, Ishida 等^[7]发现了新干线钢轨钢表面起源棘齿裂纹的萌生局限于表面薄层内的现象,据此,他们指出:通过“预防性磨削”去除该表面薄层可以有效地控制宏观表面疲劳.新干线钢轨维护磨削的现场实验证实了这一点^[7].

3 结论

在低应力、水润滑和牵引滚动条件下,中碳贝氏体支承辊钢表面萌生了两种滚动接触疲劳短裂纹:垂直短裂纹和棘齿短裂纹.它们的短裂纹行为如下:

(1) 早在 10^4 cyc 时,垂直短裂纹在接触表面大量出现.在萌生之后它们立即进行高速率初始扩展,其后绝大多数停止长大.棘齿短裂纹出现较晚.

(2) 当两种短裂纹长大到一定深度时停止扩展,并在随后大量周次内一直处于“休止”状态.

(3) 在疲劳失效寿命的 70%—80% 时,接触表面上的垂直短裂纹重新开始扩展.之后,它们发生弯折或分叉而开始加速扩展.两种短裂纹几乎同时在亚表层内以转折的方式恢复扩展,或者转向水平,或者直接折回接触表面.

(4) 在表面损伤出现之前,两种短裂纹的萌生和扩展行为始终局限在表面薄层内.

参考文献

- [1] Magel E, Roncy M, Kalousek J, Sroba P. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2003; 26(10): 921
- [2] Ishida M, Abe N, Moto T Q. *Rep RTRI*, 1998; 39: 136
- [3] Shedd T. *Modern Railroads*, 1989; 44(9): 45
- [4] Kalousek J, Magel E. *Railway Track and Structures*, 1997; 93(7): 21
- [5] Grassie S, Nilsson P, Bjurstrom K, Frick A, Hansson L G. *Wear*, 2002; 253: 42
- [6] Sroba P, Magel E, Prahf F. *Railway Track and Structures*, 2003; 99(12): 30
- [7] Ishida M, Akama M, Kashiwaya K, Kapoor A. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2003; 26(10): 909
- [8] Sadananda K, Vasudevan A K. *Int J Fatigue*, 1997; 19: 99
- [9] De Lange R G. *Trans AIME*, 1964; 230: 644
- [10] Blake J W, Cheng H S. *J Tribology, Trans ASME*, 1991; 113: 712
- [11] Ohkomori Y, Sakae C, Murakami Y. In: David L K ed., *42th Mechanical Working & Steel Processing Conf*. Warrendale: Iron and Steel Society of AIME, 2000: 723
- [12] Ringsberg J W, Bergkvist A. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2003; 26(10): 969
- [13] Clarke T M, Miller G R, Keer L M, Cheng H S. *ASLE Trans*, 1984; 28(1): 111
- [14] Bormetti E, Donzella G, Mazzu A. *Tribology Trans*, 2002; 45(3): 274
- [15] Tallian T E, Chiu Y P, Amerongen E V. *J Tribology, Trans ASME*, 1978; 100: 156
- [16] Miller G R, Keer L M, Cheng H S. *Proceedings of The Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1985; 397(1813): 197