

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.05.009

多次电镀铬对30CrMnSiNi2A疲劳寿命和氢脆性能的影响

孟保利, 高晓颖*, 郑超, 贺 韡, 胡生双

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 飞机在服役过程中会多次返修, 在30CrMnSiNi2A表面进行多次电镀铬处理, 因此系统研究多次电镀对30CrMnSiNi2A疲劳寿命和氢脆性能对飞机返修中的零件重复利用有重要的意义。本文对电镀前和多次电镀后的30CrMnSiNi2A进行疲劳寿命、氢脆性能和疲劳断口形貌分析, 考察了多次电镀对30CrMnSiNi2A性能的影响。疲劳寿命测试和断口分析表明, 一次电镀后, 30CrMnSiNi2A的疲劳寿命降低60%以上; 多次电镀后的试样与一次电镀后的试样的疲劳寿命维持在相同水平。未经电镀的试样断口呈现单一疲劳源的韧性断裂特征, 多次电镀后的试验断口呈现多疲劳源的脆性断裂特征。疲劳裂纹主要起源于镀层和材料基体的界面, 疲劳寿命降低与镀铬层的特性相关。氢脆实验结果说明多次电镀对30CrMnSiNi2A的氢脆性能无明显影响。

关键词: 电镀铬; 30CrMnSiNi2A; 疲劳寿命; 氢脆; 断口分析

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A

Influence of repeated chromium plating on fatigue life and hydrogen embrittlement performance of 30CrMnSiNi2A

Meng Baoli, Gao Xiaoying*, Zheng Chao, He Wei, Hu Shengshuang

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: The aircraft will be repaired many times during the service process, and the surface of 30CrMnSiNi2A will be electroplated for many times. Therefore, it is of great significance to systematically study the fatigue life and hydrogen embrittlement performance of 30CrMnSiNi2A by multiple electroplating for the reuse of parts in aircraft repair. In this paper, the fatigue life, hydrogen embrittlement performance and fatigue fracture morphology of 30CrMnSiNi2A before electroplating and after multiple electroplating were analyzed, and the influence of multiple electroplating on the properties of 30CrMnSiNi2A was investigated. Fatigue life test and fracture analysis show that the fatigue life of 30CrMnSiNi2A is reduced by more than 60% after one electroplating of chromium; the fatigue life of the sample after multiple electroplating is maintained at the same level as that of the sample after one electroplating. The fracture of the sample without electroplating presents the ductile fracture characteristics of a single fatigue source, and the test fracture after multiple platings presents the brittle fracture characteristics of multiple fatigue sources. Fatigue cracks mainly originate from the interface between the coating and the material matrix, and the reduction in fatigue life is related to the characteristics of the chromium coating. The results of hydrogen embrittlement experiments show that multiple electroplating has no obvious effect on the hydrogen embrittlement performance of 30CrMnSiNi2A.

Keywords: chromium electroplating; 30CrMnSiNi2A; fatigue life; hydrogen embrittlement; fracture

收稿日期: 2023-01-03

修回日期: 2023-02-22

作者简介: 孟保利(1966—), 性别: 男, 本科, 研究员级高级工程师, email: 1627285667@qq.com

*通信作者: 高晓颖(1992—), 性别: 女, 博士, 工程师, email: nycious@163.com

analysis

电镀铬工艺凭借其成本低、维护方便和镀层性能优异在航空工业中得到了广泛的应用,它作为一种常见且重要的表面处理技术,用于滑轨、螺栓、活塞杆等多种零件表面,提高零件的耐腐蚀能力和耐磨性^[1-4]。对于经过长期服役的飞机,当需要进行一翻、二翻等较大范围维修时,零件表面的镀铬层基本都需要重新进行表面处理或局部修理^[5-8]。30CrMnSiNi2A 钢制造的零件通常作为飞机的主要承力构件,这类零件特点是制造周期长和制造成本高,而且电镀铬是这类零件最常用的表面处理工艺^[9-12];由于这种超高强度钢对氢脆具有较高的敏感性,并且电镀铬工艺是能够产生严重析氢的电镀工艺,因此新零件制造的工艺规范规定电镀过程仅允许返工一次,该要求在 HB/Z 5072—1992 上有明确规定。但由于种种原因该标准一直未修订。如果多次返工不被允许,对于需要进行翻修的零件可能造成大量报废。而如今在实际工厂生产中,镀层多次返工仍能达到用户的最终使用标准,因此镀层多次返工成为常态。本文针对这一现状进行深入研究,通过对未经电镀铬和电镀铬 1~5 次后的 30CrMnSiNi2A 疲劳寿命、氢脆性能和疲劳断口形貌进行系统研究,分析电镀次数对 30CrMnSiNi2A 疲劳寿命和氢脆性能的影响规律,为后期实际生产应用提供理论基础。目前对此报道的研究非常少^[13-18]。

1 实验

1.1 材料

试验材料为 30CrMnSiNi2A 高强度钢,主要成分为:总碳 0.3%,锰 1.15%,硅 1.05%,铬 1.06%,镍 1.62%,铁余量;旋转弯曲疲劳试样符合 GB/T4337—2015 要求;氢脆缺口拉伸试样符合 HB5067.1—2005 要求。

1.2 试样的准备

1.2.1 电镀实验

对 30CrMnSiNi2A 疲劳试样进行分组,分别进行 0~5 次电镀铬实验,每次电镀铬层厚度相同,电镀和退镀均进行除氢处理。

电镀工艺流程为:溶剂清洗—阳极除油—镀铬—冷水洗—吹干—除氢。

1.2.2 氢脆实验

氢脆试验按照 ASTM F519—2017a Standard Test Method for Mechanical Hydrogen Embrittlement Evaluation of Plating/Coating Processes and Service Environments 进行,氢脆试验设备为 QBR-50J 持久蠕变试验机。

1.2.3 疲劳实验

旋转弯曲疲劳试验按照 HB5152-96 金属室温旋转弯曲疲劳试验方法进行,设备为 QBWP-6000 旋弯疲劳试验机;断口尺寸检查采用 19JPC-V 万能工具显微镜。

2 结果与讨论

2.1 不同电镀次数的 30CrMnSiNi2A 的疲劳寿命

为了评价不同电镀次数对 30CrMnSiNi2A 疲劳寿命的影响,采用旋转弯曲疲劳测定不同电镀次数下的疲劳寿命,采用三参数非线性模型进行 $S-N$ 曲线拟合。 S 为材料标准试件疲劳强度,MPa; N 为疲劳寿命, cycle。空白试样的疲劳实验结果见表 1。

采用成组法测定了 880 MPa、920 MPa 和 940

表 1 空白试样疲劳性能实验结果

Tab.1 Fatigue performance test results of blank sample

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿 命/cycle
成组法	第一级	940	82397	55859
			51080	
			41411	
	第二级	920	107963	81297
			60475	
			82294	
	第三级	880	91457	162736
			310437	
			151796	
升降法		840	3678635	疲劳极限 780 MPa
		800	>10000000	
		800	4103082	
		800	1631933	
		760	>10000000	
		760	>10000000	
		760	7326698	
		720	>10000000	

MPa 加载下的旋转弯曲疲劳寿命,采用三参数模型进行 $S-N$ 曲线拟合,拟合结果如图 1 所示。在此基础上,通过升降法测定 30CrMnSiNi2A 的疲劳极限为 780 MPa。对电镀 1~5 次的试样,在 940 MPa、880 MPa 和 780 MPa 的应力加载下,测定三级应力下的旋转弯曲疲劳寿命,多次电镀后的试样试验结果如表 2 所示;采用三参数模型进行 $S-N$ 曲线拟合,拟合结果如表 3 所示。

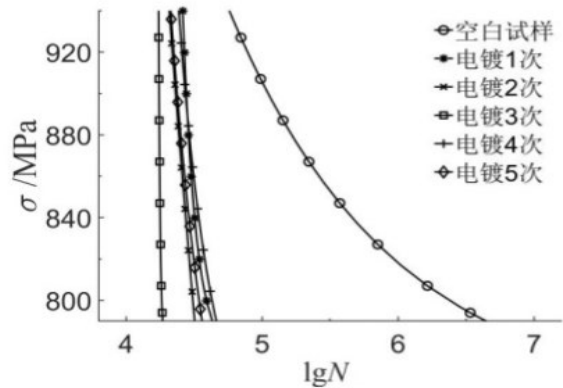


图 1 试样旋转弯曲疲劳试验拟合 $S-N$ 曲线
Fig.1 Fitting $S-N$ curves of rotating bending fatigue test of specimen

表 2 电镀 1~5 次后试样疲劳性能实验结果
Tab.2 Experimental results of fatigue properties of samples

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿 命/cycle
电镀 1 次	第一级	940	22812	26084
			30487	
			25519	
	第二级	880	38442	28764
			28458	
			21753	
	第三级	780	70682	52119
			50125	
			39960	
电镀 2 次	第一级	940	21458	20269
			18515	
			20959	
	第二级	880	21142	25406
			27137	
			28584	
	第三级	780	31902	32502
			37321	

续表

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿 命/cycle
电镀 3 次	第一级	940	28838	17360
			17326	
			18077	
	第二级	880	16704	17570
			18053	
			19239	
	第三级	780	15616	23482
			23784	
			23428	
电镀 4 次	第一级	940	23236	24382
			23521	
			25290	
	第二级	880	24366	29141
			30554	
			26928	
	第三级	780	30078	50097
			52492	
			47567	
电镀 5 次	第一级	940	50354	21277
			22675	
			20827	
	第二级	880	20398	25198
			25046	
			25973	
	第三级	780	24595	38169
			34452	
			40851	

表 3 旋转弯曲疲劳试验 $S-N$ 曲线拟合公式结果
Tab.3 Fitting results of $S-N$ curve for rotating bending fatigue test

试样类型	$S-N$ 曲线拟合方程	回归系数 r^2
空白试样	$\lg N = 10.35 - 2.44 \times \lg(\sigma_{\max} - 756)$	0.992
电镀 1 次	$\lg N = 16.45 - 4.06 \times \lg \sigma_{\max}$	0.950
电镀 2 次	$\lg N = 12.47 - 2.74 \times \lg \sigma_{\max}$	0.991
电镀 3 次	$\lg N = 10.56 - 2.14 \times \lg \sigma_{\max}$	0.953
电镀 4 次	$\lg N = 15.46 - 3.73 \times \lg \sigma_{\max}$	0.993
电镀 5 次	$\lg N = 13.79 - 3.19 \times \lg \sigma_{\max}$	0.995

对比表 1 和表 2 的数据,由表 1 可知,空白试样的疲劳极限为 780 MPa,而电镀 1~5 次后的试样在 780 MPa 加载下均发生了断裂,中值疲劳寿命远小

于 10^7 cycle。同时,电镀 1~5 次后的试样在 880 MPa 和 940 MPa 加载下的疲劳寿命相较于空白试样的疲劳寿命也分别降低了 80% 和 60% 以上。以上数据说明,30CrMnSiNi2A 的疲劳寿命在一次电镀后会大幅降低;但是多次电镀后与一次电镀后,试样的疲劳寿命为同一水平。

2.2 不同电镀次数的 30CrMnSiNi2A 的疲劳断口形貌

为了分析不同电镀次数后试样疲劳寿命变化的原因,对不同电镀次数的 30CrMnSiNi2A 断口形貌进行了研究,如图 2 所示。

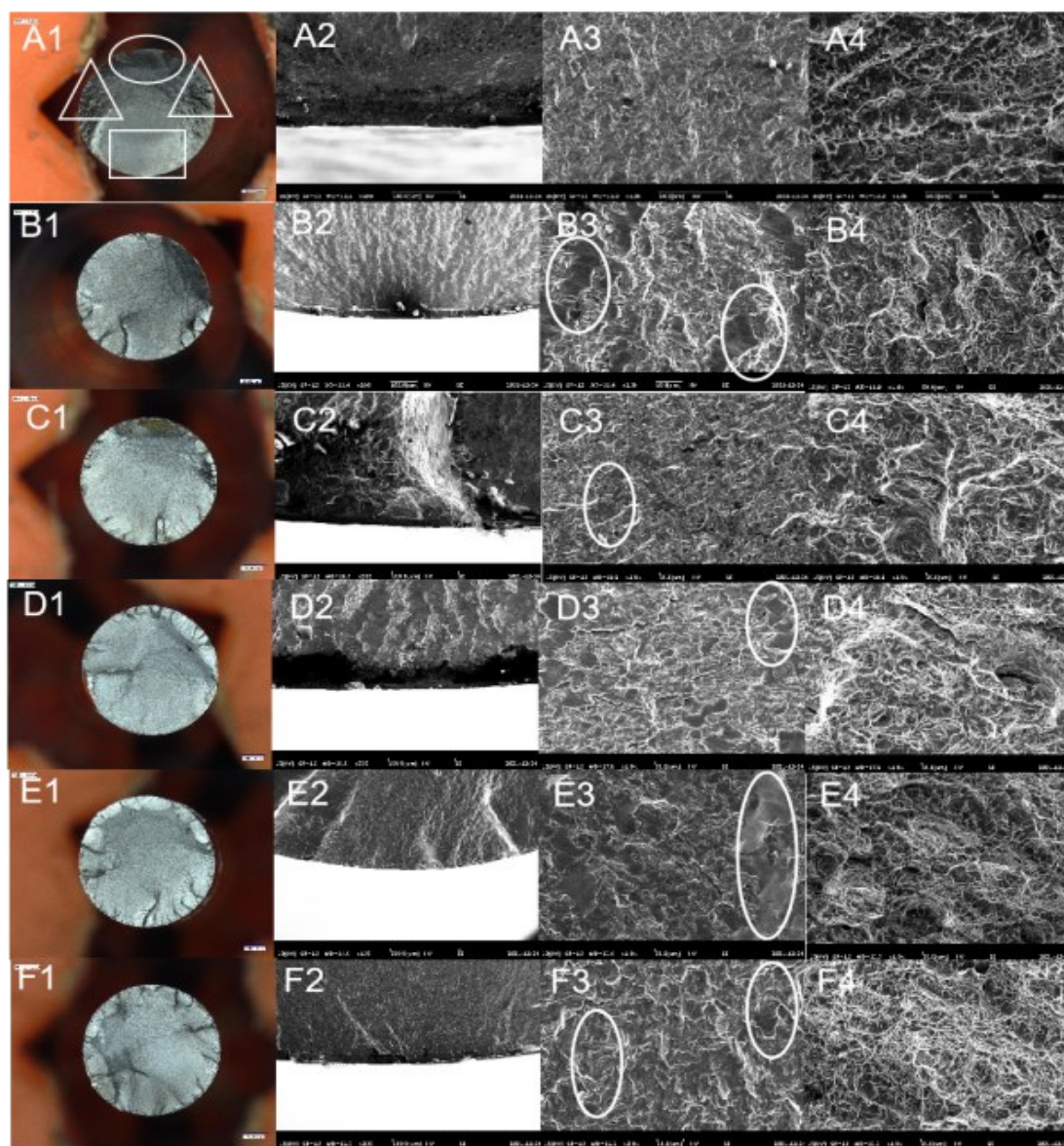


图2 不同电镀次数的30CrMnSiNi2A断口形貌(A—空白;B—电镀1次;C—电镀2次;D—电镀3次;E—电镀4次;F—电镀5次)

Fig.2 Fracture morphology of 30CrMnSiNi2A after electroplating for different times

在图2中从左向右看,A1~A4为未经电镀空白试样的疲劳断口形貌,B1~B4为电镀1次后试样的疲劳断口形貌,C1~C4为电镀2次后试样的疲劳断口形貌,D1~D4为电镀3次后试样的疲劳断口形貌,

E1~E4为电镀4次后试样的疲劳断口形貌,F1~F4为电镀5次后试样的疲劳断口形貌。在图2中从上向下看,A2~F2是针对裂纹源进行放大后的图像,A3~F3是针对扩展区进行放大后的图像,A4~F4是

针对瞬断区进行放大后的图像。

由图 A1 可知,未经电镀的空白试样断口宏观呈现明显的单源韧性断裂特征,裂纹源区(A1 圆圈内)、扩展区(A1 三角圈内)和瞬断区(A1 方圈内)分布典型且明显。裂纹源区(图 A2)可见条带起源于镀层或镀层与基体的交界处,呈现明显的单源放射分布;扩展区(图 A3)无明显细小平面出现;瞬断区(图 A4)有大量韧窝出现,同时韧窝形貌大小丰富多样。通过 A1~A4 可知,空白试样的断裂主要为韧性断裂。经过 1~5 次电镀后的断口宏观呈现多源断裂特征,如图 B1~F1 所示,图 B1~F1 未呈现如图 A1 中单源断裂特征,没有典型的裂纹区、扩展区和瞬断区分布。经过 1~5 次电镀的断口裂纹源区未呈现单源放射分布,同时裂纹源区有明显多源分布的放射状条带,如图 B2~F2 所示。未经电镀的空白试样断口扩展区(图 A3)无明显细小平面出现;经过 1~5 次电镀后的试样断口扩展区有大量大块平面出现(B3~F3 圈内)。未经电镀的空白试样断口瞬断区(图 A4)有大量韧窝,说明空白试样为韧性断裂;经过 1~5 次电镀后的试样瞬断区(图 B4~F4 所示)韧窝数量大量减少,形貌单一,总体呈现脆性断裂特征。以上现象说明经过 1~5 次电镀后的试样断口总体呈现脆性断裂特征。

未经电镀空白试样的疲劳断口基本上呈现单源(只有一个较大的疲劳源),而经过一次和多次电镀试样的断口基本上呈多源(不止一个较大的疲劳源)。这是因为未经电镀空白试样的断裂主要源于表面缺陷(加工刀痕、材料缺陷等)引起的应力集中所致;而经过电镀的试样,其裂纹源主要从镀层和基体间的界面开始萌生。镀层是从基体表面开始生长,在基体表面产生应力,在交变载荷下极易形成裂纹源^[19-20]。

2.3 不同电镀次数的 30CrMnSiNi2A 的氢脆分析

对 10 根空白试样进行抗拉强度测定,试验数据见表 4 所示,抗拉强度均值为 2621.4 MPa,变异系数为 0.65%。

将电镀 1~5 次的试样在 1966.05 MPa(75% 抗拉强度均值)下进行持久拉伸,5 组试样在 200 h 内未发生断裂,试验数据见表 5,符合标准 ASTM F519—2017a 氢脆性能要求,试样氢脆性能合格。实验结果说明重复电镀对 30CrMnSiNi2A 的氢脆性能影响不大,在可接受范围内。

表 4 空白试样抗拉强度数据

Tab.4 Tensile strength data of blank sample

序列	直径/mm	抗拉强度/MPa
1	4.498	2621
2	4.505	2590
3	4.505	2641
4	4.496	2615
5	4.502	2601
6	4.508	2646
7	4.497	2626
8	4.500	2618
9	4.507	2622
10	4.508	2634
均值/MPa	2621.4	
标准差/MPa	17.08	
变异系数/%	0.65	

表 5 多次电镀后试样氢脆试验数据

Tab.5 Hydrogen embrittlement test data of samples after repeated electroplating

电镀次数	缺口处直径/mm	试验载荷/N	持续时间/h
1	4.524	31603	>200
	4.508	31380	
	4.529	31673	
	4.507	31366	
2	4.500	31269	>200
	4.526	31631	
	4.523	31589	
	4.527	31645	
3	4.528	31659	>200
	4.526	31631	
	4.529	31673	
	4.528	31659	
4	4.520	31547	>200
	4.525	31618	
	4.525	31618	
	4.519	31534	
5	4.526	31631	>200
	4.516	31491	
	4.520	31547	
	4.525	31617	

3 结论

(1) 电镀铬对 30CrMnSiNi2A 的疲劳寿命影响较大,电镀后的 30CrMnSiNi2A 相较于未电镀的

30CrMnSiNi2A, 疲劳寿命降低 60% 以上; 对于经过电镀后的 30CrMnSiNi2A, 多次电镀对疲劳寿命影响不大。

(2) 未经电镀的试样断口呈现单一疲劳源的韧性断裂特征, 1~5 次电镀后的试验断口呈现多疲劳源的脆性断裂特征。疲劳裂纹主要起源于镀层和材料基体的界面, 疲劳寿命降低与镀铬层的特性相关。

(3) 随着电镀次数的增加, 30CrMnSiNi2A 的氢脆性能均符合要求(>200 h), 无明显变化。

参考文献

- [1] 李慕勤, 李俊刚, 吕迎, 等. 材料表面工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 118-120.
- [2] 杨泰藩. 30CrMnSiNi2A 钢件镀硬铬的氢脆分析[J]. 表面技术, 1991, 20(4): 23-27.
- [3] 程海根, 胡聪. 腐蚀环境中 Q420qD 钢十字接头的疲劳性能试验与数值研究[J]. 材料保护, 2021, 12(1): 5-12.
- [4] Choi Y, Kim M, Kwon S C. Characterization of chrome layer formed by pulse plating[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 169: 81-84.
- [5] 宋进兵, 邓春明, 周克崧, 等. 表面强化 300M 低合金钢疲劳性能评价及断裂分析[J]. 新技术新工艺, 2006(2): 89-91.
- [6] 张国祥, 李怀学, 张坤, 等. 初始镀铬层微裂纹形貌的基本电化学腐蚀法研究[J]. 中国表面工程, 2006, 19(4): 8-11.
- [7] 张伟, 任章凤. 铬膜制备及其膜内残余应力研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(8): 130-133.
- [8] 高春月, 郭武明, 王海新, 等. 8Cr4Mo4V 钢表面减摩耐蚀涂层研究[J]. 材料保护, 2021, 54(9): 20-24.
- [9] 胡小华, 张斌, 马林, 等. 镀铬层厚度对 30CrMnSiA 钢疲劳性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2009, 31(6): 41-43.
- [10] 耿长建, 邢丕臣, 牛春兴, 等. 镀铬对 8Cr4Mo4V 钢疲劳行为的影响[J]. 航空发动机, 2017, 43(6): 64-68.
- [11] 王毓麟, 王淑霞, 贾伟, 等. 镀铬对 0Cr12Ni4Mo 钢疲劳强度的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(2): 49-52.
- [12] 叶斌, 卢继光, 邵渭贤, 等. 表面强化销轴农用滚子链的磨损试验研究[J]. 链传动专题, 2012, 36(1): 54-56.
- [13] Voorwald H J C, Silval M P, Costa M Y P, et al. Improvement in the fatigue strength of chromium electroplated AISI 4340 steel by shot peening[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 32(2): 97-104.
- [14] 包俊成, 赵捷, 王志奇, 等. 表面强化对 30CrMnSiA 钢疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2010, 34(6): 71-73.
- [15] 李占明, 朱有利, 黄元林, 等. 喷丸强化后 30CrMnSiNi2A 钢表面完整性对其抗疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 85-89.
- [16] Aydn Z, Ald G, Imenolu H. An investigation on the mechanical properties of the hard chromium layer deposited by brush plating process on AISI H13 steel[J]. Archives of Materials Ence & Engineering, 2014, 65(2): 87-92.
- [17] 赵华瑞, 丁彦霞. 真空渗碳处理 38CrMoAl 渗氮钢的微观组织及氢脆敏感性分析[J]. 材料保护, 2021, 12(8): 56-60.
- [18] 邵绪分, 胡成江, 骆豫蜀, 等. 电镀铬对 300M 钢疲劳性能影响研究[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(4): 213-216.
- [19] Choi Y, Kim M, Kwon S C. Characterization of chrome layer formed by pulse plating[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 169: 81-84.
- [20] Stepurenko V T, Baranovskii V I, Manaenko V P. Effect of electrolytic chromium plating quality on fatigue strength of steel[J]. Soviet Materials Science, 1974, 8(4): 398-401.