

失效案例库需提供的信息（表格形式）

信息	损坏软管不可逆变化失效分析
事故名称	软管结构的失效
事故时间	2015 年
事故地点	斯洛伐克共和国
产 品 制 造 商信息（包 括名称、地 址等）	本研究中的耐压软管用于传输液压流体，流体为液压用油或含酒精液体。
失效设备	液压软管
失效部件	软管 EN 857 2SC
应用环境	低/中压液压系统，内部介质为矿物油和植物油，水，空气，惰性气体； -40℃到+100℃（最大+125℃，间断）
失效形式	开裂
失效机理	疲劳
失 效 材 料 类型	合成橡胶；高耐磨钢
失 效 材 料 信息（包括 成分、力学 性能等）	底层为合成橡胶； 加强层为高耐磨钢； 外层为黑色合成橡胶
事故概览	某样品软管发现内加强层的退化，容易引起软管的破裂从而引起重大操作事故，不仅威胁机器运行，同时会对操作人员和环境造成损害。此类软管在危险条件下工作，失效的可能性越来越大。
失 效 分 析 目的	研究者们对于软管失效分析的实验研究做了大量工作，本文通过计算机模拟的方式进一步分析软管工作中的受力状态，明确失效原因。
分析方法/ 测试项目	肉眼观察；计算机断层扫描（Metrotom1500）
分析结果	<u>失效软管的外观观察</u>  图 1 所示样品液压软管，移除表面的橡胶层，同时加强层出现

损坏。这种损伤是液压机构在操作期间，由于液压软管的循环弯曲所致。损伤在局部区域存在，不发生延伸。

由于表面的橡胶材料逐步分离，造成不规则的边缘。整个破坏过程是由于一个初始裂纹的诱导，这个裂纹在弯曲区域中逐渐扩大。

橡胶外胶层断开后弯曲区域逐渐扩大。通过肉眼检查，可以看出这些损害不是由于较高的操作温度，因为位于软管表面上各个点并没有检测到表面裂纹和微裂纹。卷绕金属加强结构的破坏较微小，它也是循环弯曲的结果。



图 1 液压软管外胶层的损坏



图 2 液压软管外胶层并伴有内部增强层的损坏

另一个样品软管（图 2），破坏较样品 1 更为严重，缺陷区域更大，几乎分布于整个圆周上，外层覆盖橡胶几乎全部被分离，内部加强金属结构很明显暴露出来，在弯曲、磨损等多种因素作用下，破坏区域的边缘是不规则的，该区域的扩展表明是在一个强烈和长期的破坏过程下的结果。失效过程是从软管表面传递到内部金属加强结构，该加强结构是为了保证必要的强度，弹性和耐久性。

图 2 显示了加强结构的大范围破坏，有磨损的金属线，在某些点，破坏过程通过加强层传递到内部软管结构。

### 计算机断层扫描

图 3 是部分样品 2 的分析结果，个别截面图和 3D 显示图可以很清楚的看到内部橡胶层和加强层结构的破坏情况。截面图显示了三种材料，液压软管的最外面覆盖层具有最小的密度（最深的灰色）。得到的云点图被用来生成两种成度的表面重构图，第一种重构定义

在表面，这样就包括了内胶层和金属加强层，图 4 中左边是从外侧金属层的重构图，右图是从内胶层侧的重构图。软管内部发现了一个  $1/3$  圆周长度的缺陷。

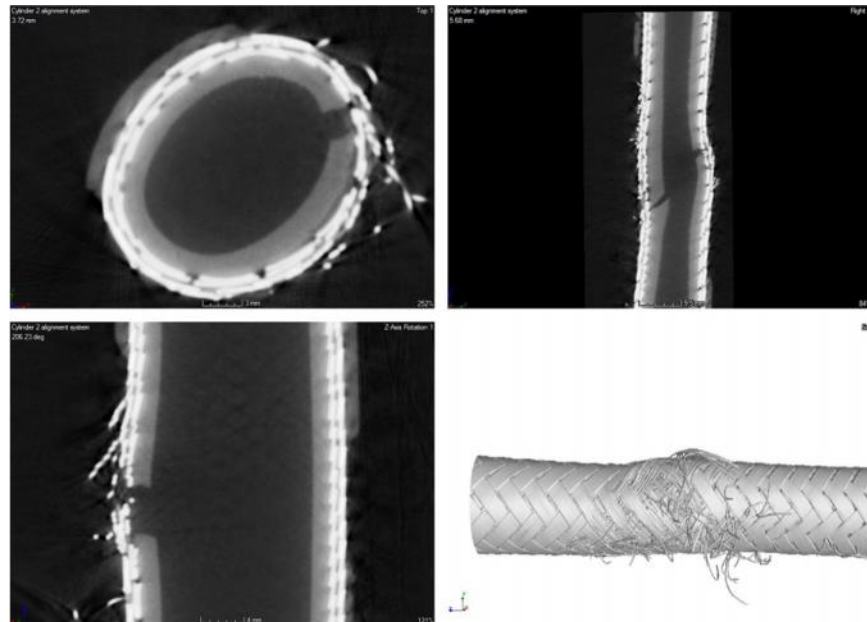


图 3 样品 2 的计算机断层扫描结果图

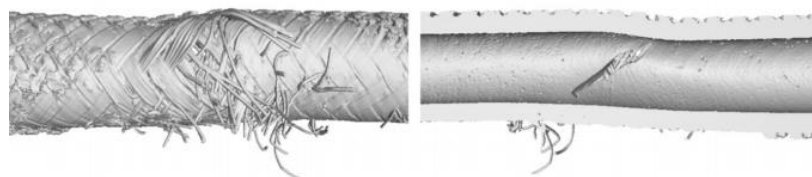


图 4 软管样品的加强层和内胶层重构图

由于软管是椭圆形，要确定缺陷长度比较困难。用插入的圆柱体部分穿过缺陷处，被用来描绘出展开图。图 11 中，橙色代表缺陷（右），紫色代表圆柱体。



图 5 用来展开软管的圆柱体（左）和已展开的形状（右）

为研究加强层破坏过程，分离橡胶材料的结果如图 6 所示。可以看到几处明显的缺陷，包括丝线相互的分离。破坏处的豁口降低

了液压软管的强度，这会导致液压管的破裂和液压油的泄露。

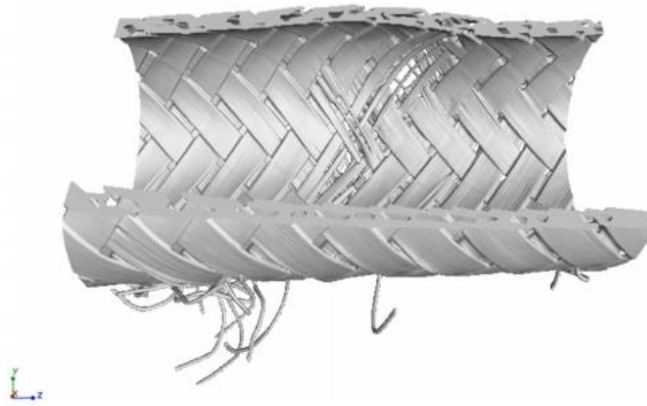


图 6 对样品 2 的金属加强层的分析

另外选择了一个样品来研究横截面几何形状的变化，在样品上选择了两个圆：最大内接圆和最小外接圆，这两个圆分布在两个平面，一个在中断处以下-6mm 高处（截面 1），另一个在中断处以上高度为 12mm 处（截面 3）。平面的布置形式如图 7 所示。

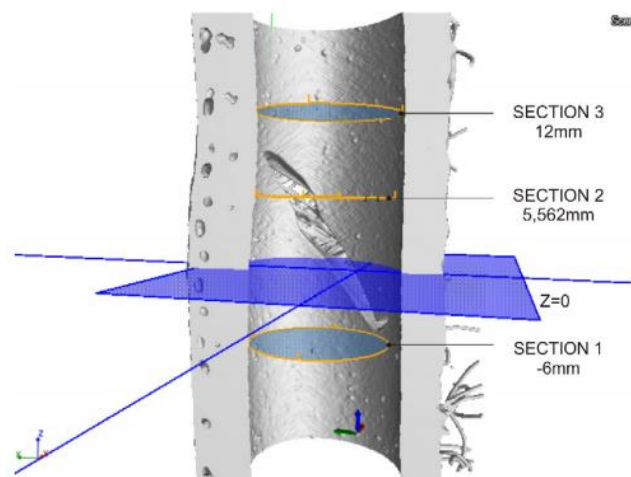


图 7 用来计算软管变形的横截面

得到的结果如图 8 和图 9 所示，软管截面的形状改变很明显，由圆形变为椭圆形（从圆变为椭圆）。主要原因是位于软管内的金属线的偏移。这样会在缺陷区域削弱软管的强度。

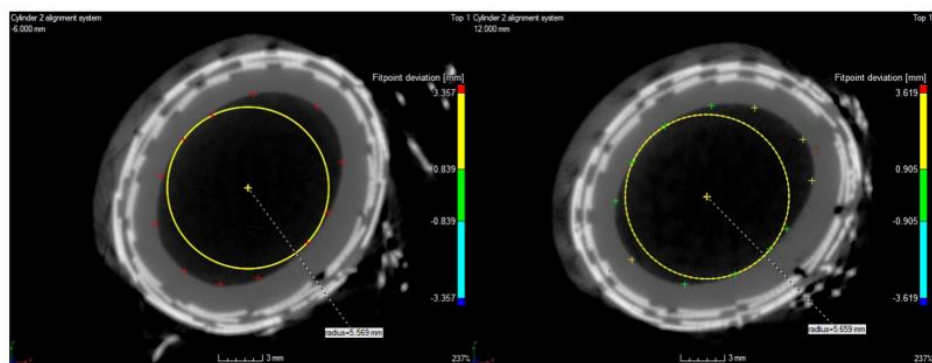


图 8 -6mm 和 12mm 处的内接圆的布置图

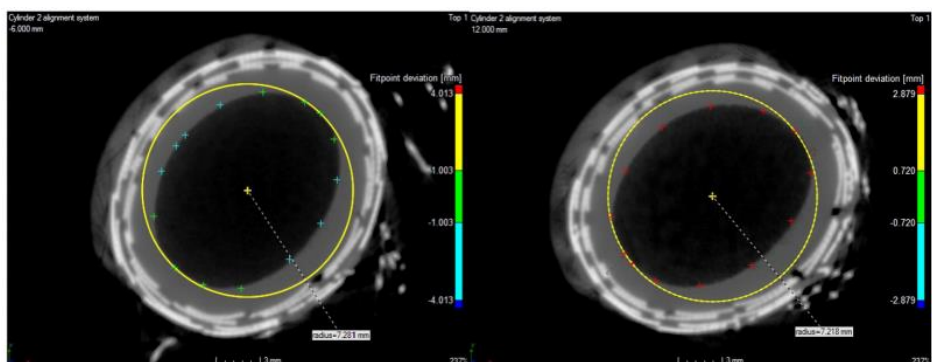


图 9 -6mm 和 12mm 处的外接圆的布置图

图 10 显示了位于最大缺陷处的内外接圆，位于参考坐标系高度为 5.562mm 处。从得到的结果看，很明显在缺陷上方和缺陷下方圆的直径改变比较温和。

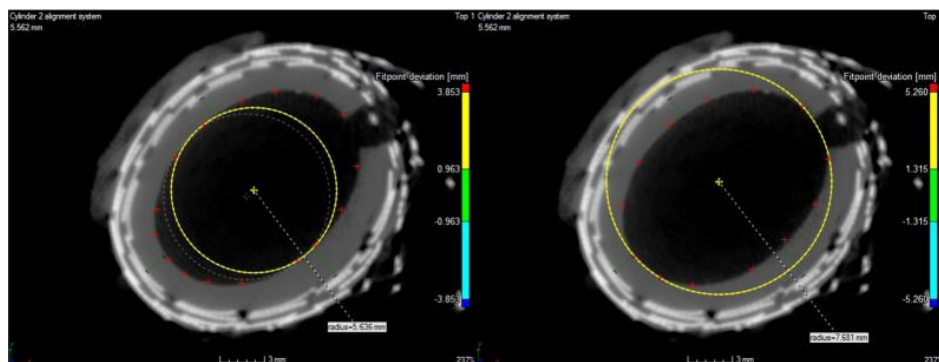


图 10 位于破损高度处的内接圆（左）和外接圆（右）

缺陷的称度由宽度和长度来定义。最大缺陷宽度为 2.311mm，包围了一个 124°扇形（该角度在一个圆柱坐标系中由缺陷开始到结尾），图 11 分析的结果来看破坏是很严重的，有引起内部液压油泄露的危险。

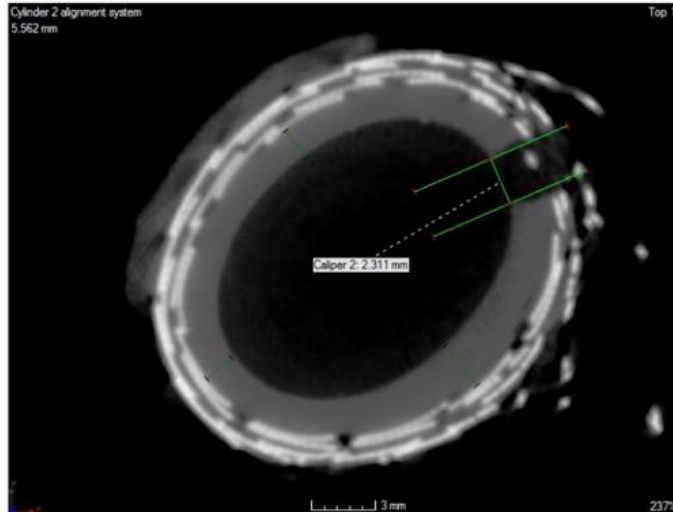


图 11 最大断裂

软管内胶层的厚度通过千分尺来测量，在最大缺陷宽度的平面，得到的值在 1.542mm 到 2.421mm（图 12）。实验结果证明软管内胶层在工作后的厚度减小了，现在的缺陷是一系列因素的合理的和不可避免的结果：液压软管内胶层的削弱（内胶层的变薄）和金属加强层的破坏（丝线结构的破坏，伴随着一些丝线的分离）。

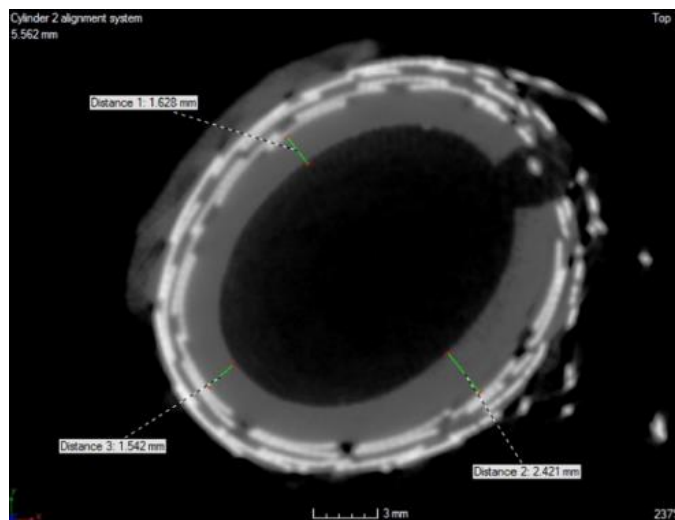


图 12 手工测量的壁厚

计算机断层扫描既可以通过千分尺手工测量壁厚，也可以自动分析壁厚。内部层厚度可以沿着整个样品测量（例如不仅仅在选定的区域），通过程序处理测量数据，需要自动分析壁厚。分析内胶层的厚度的必要和首要条件是分析内外层因为内外层具有相同的密度值。这个情况不允许单独分析内胶层（图 13），因此有必要排除



掉外胶层。外胶层的分离由手工进行。在分离外胶层并且重构图形后还是有一些橡胶碎片在金属丝上。这些残留物在不介入到内部的情况下无法去除。但是可以在内胶层的评估阶段部分消除。内胶层厚度改变情况的分析结果，位于缺陷最宽平面处，如图 14 所示，由于排除了加强结构，很明显内胶层厚度沿着软管发生了变化。

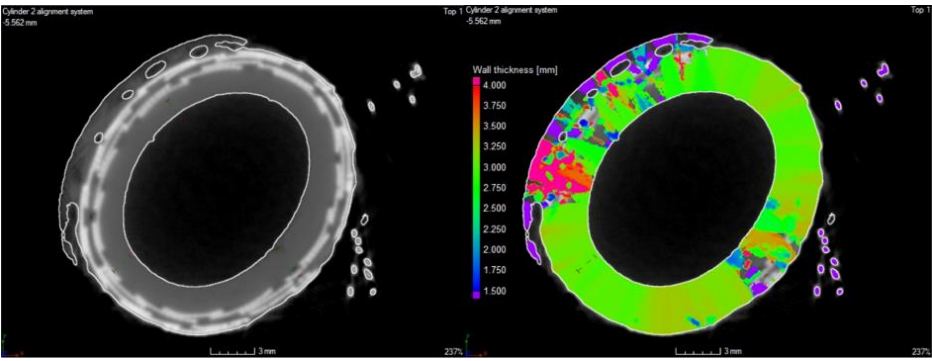


图 13 橡胶表面界定——划界区域包含内层和外层（左）；内胶层厚度的评价（右）

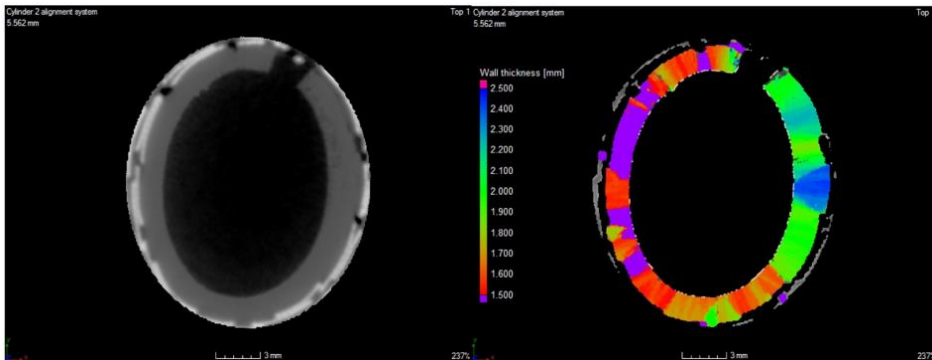


图 14 分离外胶层的横截面（左）和壁厚的变化（右）

内胶层壁面厚度的变化和金属丝线的影响，如图 14 所示。

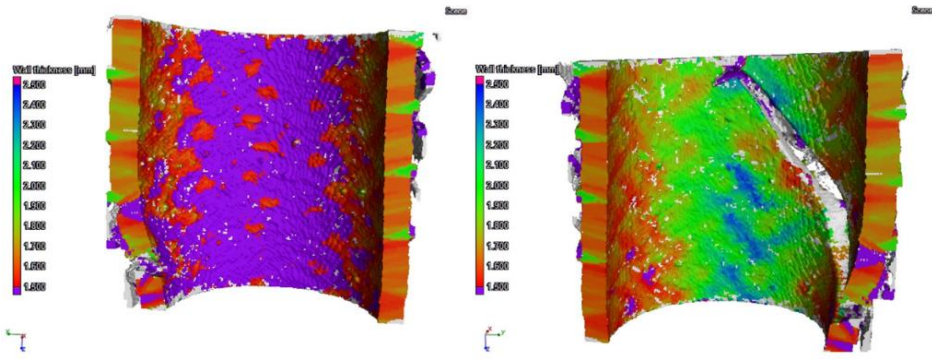


图 14 壁面厚度

分析结论	由得到的结果来看，计算机断层扫描是分析液压的合适工具，
------	-----------------------------

	<p>该技术不仅能评估软管的破坏程度，也能利用这项技术来预测和预防液压软管的失效。首先分析了软管各层的毁坏程度，特别是内胶层和钢丝层（加强层）。时间行为，内胶层缺陷的形状和尺寸是可见的。位于加强层的金属丝的彼此移位，可以显示在加强层上。</p> <p>第二部分测量内胶层的厚度，分析进行在定义的横截面上。由测试结果可以看出壁厚不是恒定的。测量结果在区间（1.0-2.5）mm 范围内变动。生产者和使用者还能得到关于内胶层厚度沿着软管方向变动的信息和丝线不均匀的信息。液压软管的生产工艺可以根据测试结果进行优化，来提高失效率和提高经济效益。该研究可以排除掉金属零件的影响得到相关的结果。分析结果提供了一个简单的可以确定液压软管内部缺陷的办法，包括管内的金属丝线。分析结果具有实用价值，并且可以运用软件工具进行进一步的详细分析。</p>
研究 人员 及其单位	<p>Gabriel Fedorko, Vieroslav Molnar, Miroslav Dovica, Teodor Toth, Jana Fabianova</p> <p>Technical University of Kosice, Slovak Republic</p>
事 故 的 文 献 出 处	<p>Fedorko G, Molnar V, Grincova A, et al. Failure analysis of irreversible changes in the construction of rubber-textile conveyor belt damaged by sharp-edge material impact[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 39(4):135–148.</p>
事 故 分 析 中 引 用 的 文 献（格式 按 研 究 室 “ 失 效 案 例 的 格 式 ”）	<p>[1] S.-B. Kwak, N.-S. Choi, Micro-damage formation of a rubber hose assembly for automotive hydraulic brakes under a durability test[J]. Eng. Fail. Anal. 16 (2009):1262–1269.</p> <p>[2] A. Márquez, P.G. Fazzini, J.L. Otegui, Failure analysis of flexible metal hose at compressor discharge[J]. Eng. Fail. Anal. 16 (2009):1912–1921.</p> <p>[3] S.O. Pierce, J.L. Evans, Failure analysis of a metal bellows flexible hose subjected to multiple pressure cycles[J]. Eng. Fail. Anal. 22 (2012):11–20.</p> <p>[4] S.N. Miller, Systematic techniques of hose failure mode analysis[J].</p>



	<p>SAE (Society Automot Eng. Trans.), 100 1991:687–703.</p> <p>[5] C.D. Taylor, J.L. Thompson, H.J. Handewith, E.D. Thimons, Hose Safety During High-pressure Water-jet Cutting(MISSING 9 pp.) 1987.</p> <p>[6] M.K. Budinski, Failure analysis of a rubber hose in anhydrous ammonia service[J]. Case Stud. Eng. Fail. Anal. 1 (2013):156–164.</p> <p>[7] N. Stenmark, S. Technimet, Conducting failure analysis on a fuel hose[J]. Rubber World 243 (2011):32–36.</p> <p>[8] [CIRP Ann. Manuf. Technol. 49 (2000) 113–118]. A. Bernard, M. V éron[J]. CIRP Ann. Manuf. Technol. 60 (2011):843.</p> <p>[9] T. Tasic, B. Acko, Integration of a laser interferometer and a CMM into a measurement system for measuring internal dimensions[J]. Measurement 44 (2011):426–433.</p> <p>[10] H. Zhao, J.-P. Kruth, N. Van Gestel, B. Boeckmans, P. Bleys, Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe[J].Measurement 45 (2012): 1057–1066.</p> <p>[11] L. De Chiffre, S. Carmignato, J.-P. Kruth, R. Schmitt, A. Weckenmann, Industrial applications of computed tomography[J]. CIRP Ann. Manuf. Technol. 63 (2014):655–677.</p> <p>[12] D.K. Francis, J. Deang, R.S. Florea, D.R. Gaston, N. Lee, S. Nouranian, et al.[J]. Characterization and failure analysis of a polymeric clamp hanger component, Eng FailAnal. 26 (2012):230–239.</p> <p>[13] B. Nie, X. He, X. Li, W. Chen, S. Hu, Meso-structures evolution rules of coal fracture with the computerized tomography scanning method[J]. Eng. Fail. Anal. 41(2014):81–88.</p> <p>[14] P.J. Withers, M. Preuss, Fatigue and damage in structural materials studied by X-ray tomography[J]. Annu. Rev. Mater. Res. 42 (2012): 81–103.</p> <p>[15]J.R éthor éN.Limodin,J.-Y.Buffi ère,S. Roux, F. Hild, Three-dimensional analysis of fatigue crack propagation using X-ray</p>
--	---

	<p>tomography. digital volume correlation and extended finite element simulations[J]. Procedia IUTAM, 4 2012: 151–158.</p> <p>[16] R. Hudák, P. Kat'Uch, J. Živčák, Application of biomedical metrotomography[J]. INES 2011 - 15th Int. Conf. Intell. Eng. Syst. Proc. 2011: 411–415.</p> <p>[17] G. Fedorko, V. Molnár, J. Živčák, M. Dovica, N. Husáková, Failure analysis of textile rubber conveyor belt damaged by dynamic wear[J]. Eng. Fail. Anal. 28 (2013).</p> <p>[18] G. Pećanac, J. Malzbender, F. Pauly, M.L. Fontaine, P. Niehoff, S. Baumann, et al., Mechanical characterization of ceramics by means of a 3D defect analysis[J]. Ceram.Int. 41 (2015) 2411–2417.</p> <p>[19] J.P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre, A. Weckenmann. Computed tomography for dimensional metrology[J]. CIRP Ann. Manuf. Technol. 60 (2011):821–842..</p> <p>[20] F. Léonard, S.B. Brown, P.J. Withers, P.M. Mummary, M.B. McCarthy, A new method of performance verification for x-ray computed tomography measurements[J]. Meas. Sci. Technol. 25 (2014): 065401.</p> <p>[21] W. Dewulf, K. Kiekens, Y. Tan, F. Welkenhuyzen, J.-P. Kruth, Uncertainty determination and quantification for dimensional measurements with industrial computed tomography[J]. CIRP Ann. Manuf. Technol. 62 (2013):535–538.</p> <p>[22] J.A. Yagüe-Fabra, S. Ontiveros, R. Jiménez, S. Chitchian, G. Tosello, S. Carmignato, A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications[J]. CIRP Ann. Manuf. Technol. 62 (2013):531–534.</p> <p>[23] S. Carmignato, Accuracy of industrial computed tomography measurements: experimental results from an international comparison[J]. CIRP Ann. Manuf. Technol. 61 (2012):491–494.</p>
--	--

	<p>[24] J. Hiller, L.M. Reindl, A computer simulation platform for the estimation of measurement uncertainties in dimensional X-ray computed tomography[J]. Measurement 45 (2012):2166–2182.</p>
--	--