

# 涂层界面结合性能的动态评价方法<sup>1)</sup>

吴臣武<sup>\*, 2)</sup> 陈光南<sup>\*</sup> 张坤<sup>\*</sup> 吴志林<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

<sup>\*\*</sup>(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要** 涂层技术广泛应用于机械、电子、光学、航空航天、化工、轻纺及食品工业等领域。涂层技术的首要问题通常在于涂层与基体的结合, 工程上所关注的所谓实际界面结合强度, 通常以从基体上剥离涂层所需要的力或功来描述。由于涂层基体体系的结构特性, 如何在界面上有效的施加载荷来剥离涂层一直是试验设计的难点和热点。本文阐述基于层裂效应评价界面结合性能的新型弹丸冲击法, 分析了应力波形成、传播和演化过程, 以动力学有限元法模拟了冲击过程, 探讨了几个基本参数对界面应力的影响, 讨论了新型弹丸冲击诱导的涂层/界面层裂行为。

**关键词** 涂层, 界面, 弹丸冲击, 层裂

## 引言

界面结合强度是刻画涂层-基体体系界面结合性能的主要指标, 工程上所关注的所谓实际界面结合强度, 通常以从基体上剥离涂层所需要的力或功来描述<sup>[1][2][3]</sup>。由于涂层基体体系的跨尺度结构特性, 如何在界面上有效的施加载荷来剥离涂层一直是试验设计的难点和热点。早期比较常见的加载方式基本上都是准静态加载方法, 如划痕法(辅以声发射、切向力、振动针等甄别手段)、压痕法和刮剥法<sup>[3][4]</sup>, 弯曲法、基片拉伸法、侧面压入法<sup>[3][5][6]</sup>, 及使用粘结剂的拉伸、扭转法和鼓泡法等<sup>[3][7][8]</sup>。这些传统的测试方法在很大程度上满足了一些工程实际需要, 但是它们存在固有的不足和局限性: 或者载荷水平低、只能适用于较弱结合的涂层界面, 或者存在变形高度局部化、大变形使得力学描述过于复杂。

针对涂层界面结合强度测试所遇到的困难和问题, 本文作者提出了基于层裂效应的弹丸冲击法, 如图 1 所示<sup>[9]</sup>。

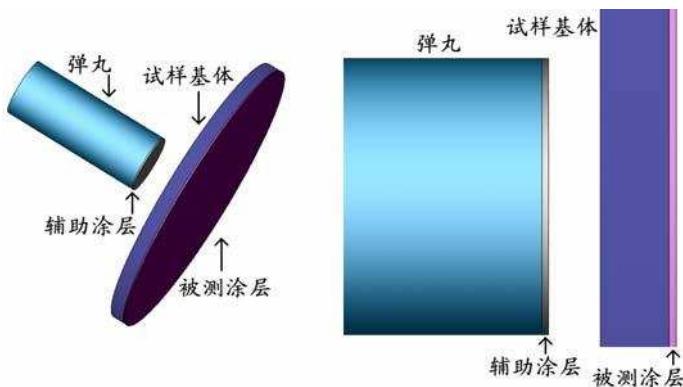


图 1 弹丸冲击试样基体表面示意图

该方法的基本原理是: 以弹道枪(或气体炮等其它加速装置)发射前端面镀覆辅助涂层的圆柱形弹丸, 使弹丸镀覆辅助涂层的一端撞击被测平面试样基体侧表面(如图 1)产生压缩应力脉冲。该压

<sup>1)</sup> 国家自然科学基金重点项目(50531060) 资助

<sup>2)</sup> E-mail: chenwuwu@imech.ac.cn

缩波深入试样内部向涂层侧传播，在界面处将发生反射和透射，透射压缩波在涂层自由表面发生反射形成拉伸波，此拉伸波与入射波在界面处叠加产生拉伸应力而使得涂层沿界面开裂。

当然，同样基于层裂效应的测试方法，此前还有Vossen等<sup>[10]</sup>提出的激光层裂法和侯振德等<sup>[11]</sup>提出的Hopkinson压杆方法：前者以短脉冲激光冲击平板试样的基体侧，基体表面吸收层的爆炸性气化产生高强度的压缩应力波；后者以Hopkinson压杆装置制造初始压缩应力脉冲。然而，就像文献<sup>[12][13][14]</sup>所阐述的那样，由于激光层裂法使用激光将基体表层材料高速气化，这一过程包含了复杂的热-物理-力学过程，其模型化研究相当困难，应力作用历史难以描述；且过高的加载速率（脉冲上升时间小于5 ns）导致试验对测速系统的响应时间要求非常高，需要10-100GHz的瞬态数字转换器，这导致试验测试系统十分昂贵<sup>[15]</sup>。Hopkinson压杆方法只适用于厚涂层，且载荷水平相对较低，对于强结合涂层界面结合性能无法评估<sup>[11]</sup>（从这个角度来讲，粘结剂法甚至能达到更高的应力水平[3]）；同时该方法需要将基体制成细长杆，在杆端涂敷涂层，试样制作要求过高。

## 1 弹丸冲击法基本原理<sup>[9]</sup>

在本文研究的弹丸冲击法中，压缩应力脉冲宽度取决于弹丸前端面的辅助涂层的厚度与声速，强度取决于弹丸材料和弹丸前端面辅助涂层材料的声阻抗匹配。记弹丸前端面辅助涂层厚度为 $t_c=t_1$ ，试样基体厚度为 $t_s=t_2$ ，试样涂层厚度为 $t_f=t_3$ 。若暂不考虑弹丸边缘部位的影响，可以一维模型<sup>[15]</sup>作简单分析。分析可得，弹丸镀覆辅助涂层的一端撞击接触试样后，应力波在弹丸和试样中的传播和演化过程如图2所示。

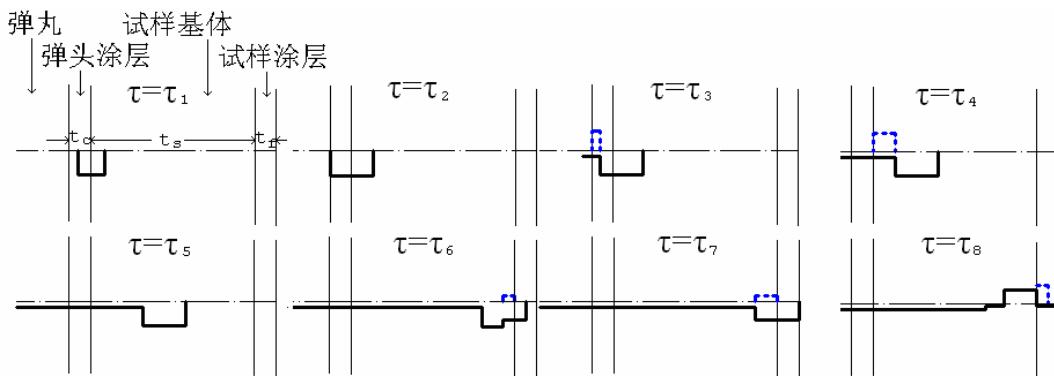


图 2 应力波传播、演化示意图

在 $\tau=\tau_1$ 时刻，弹头辅助涂层接触试样基体，并在弹头辅助涂层和试样基体内同时产生压缩应力波；在 $\tau=\tau_2$ 时刻，压缩应力波传到弹头辅助涂层与弹丸圆柱部的界面上发生反射和透射（ $\tau=\tau_3$ 时刻）<sup>[16][17][18]</sup>；此后，压应力脉冲向被测试样内部传播（ $\tau=\tau_4, \tau=\tau_5$ 时刻）。当弹丸长度足够长时，在弹丸尾端面对应力波的影响将滞后相当长时间，在这段滞后的时间内，应力波将完成对被测试样界面的加载过程，因此可暂不考虑弹丸尾端面的反射波的影响。

该压应力脉冲向被测试样涂层传播时，将在被测涂层-基体界面处发生反射和透射（如图2 $\tau=\tau_6$ 时刻所示）；而透射波传播到被测涂层自由表面时又将发生反射形成拉伸应力波（如图2 $\tau=\tau_7, \tau_8$ 时刻所示）。

满足应力波垂直入射条件下，被测界面处反射波为单纯的膨胀波，透射波也为膨胀波。透射波在被测涂层自由表面形成反射波。被测涂层界面应力为入射波、透射波和反射波在界面处的叠加。若已知被测涂层材料性能和厚度，通过选择辅助涂层和弹丸的材料性能、设计弹丸辅助涂层厚度，可控制初始压缩应力脉冲的宽度、使拉应力首先出现在界面附近区域内，从而能将被测涂层-基体沿界面剥离。

## 2 界面应力的一维近似解<sup>[19]</sup>

基于一维弹性假设, 记材料的声阻抗为  $\rho_i c_i$ , 角标  $i=0, 1, 2$  和  $3$ , 分别对应弹体材料、弹头涂层材料、靶板试样基体材料和被测涂层材料, 如图 3 所示。

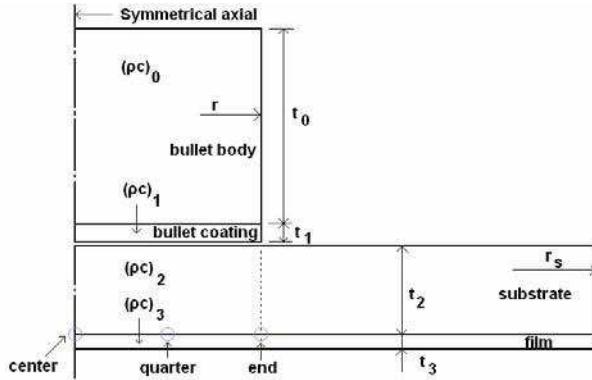


图 3 弹丸及试样几何、材料属性标记

若弹头以初速度  $v_0$  撞击靶板基体表面, 则可知弹头涂层内的接触应力为

$$\sigma_c|_{\tau=0} = -\rho_1 c_1 (v_0 - v)|_{\tau=0} \quad (1)$$

其中

$$v|_{\tau=0} = v_0 + \frac{\sigma_c|_{\tau=0}}{\rho_1 c_1} \quad (2)$$

是弹头涂层和靶板试样基体接触界面上的物质点的速度。同样, 在试样基体内产生的应力为

$$\sigma_{0s} = -\rho_2 c_2 v|_{\tau=0} = -\rho_2 c_2 (v_0 + \frac{\sigma_c|_{\tau=0}}{\rho_1 c_1}) \quad (3)$$

显然, 弹头涂层内的应力和试样基体的应力此时都是压缩应力, 且具有相同的幅值, 即

$$\sigma_c|_{\tau=0} = \sigma_s|_{\tau=0} = \sigma|_{\tau=0} \quad (4)$$

联立式(1)~(4), 可得

$$\sigma|_{\tau=0} = -v_0 \frac{\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (5)$$

$$v|_{\tau=0} = v_0 \frac{\rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (6)$$

因此, 此后弹头涂层内物质点的速度为

$$v_{cp} = v|_{\tau=0} - v_0 = -v_0 \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (7)$$

弹头涂层内的应力脉冲传播到弹头涂层-弹体界面时，将发生反射和透射。反射波为

$$\sigma_R = \sigma|_{\tau=0} \frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \quad (8)$$

$$v_R = v|_{\tau=0} \frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \quad (9)$$

此反射波与初始应力波相互作用后，弹头涂层内物质点的速度以及弹头涂层内应力分布为

$$v_c|_{\tau=2t_1/c_1} = v_R + v|_{\tau=0} = \frac{1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} [\frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \rho_2 c_2 + \rho_1 c_1] v_0 \quad (10)$$

$$\sigma_c|_{\tau=0} = \sigma_R + \sigma|_{\tau=0} = -\frac{2\rho_0 c_0}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \frac{\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} v_0 \quad (11)$$

考察式 (10)，当  $\frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \rho_2 c_2 + \rho_1 c_1 \leq 0$  时，可见  $v_c|_{\tau=2t_1/c_1} \leq 0$ ，这意味着弹头涂层与试样基体

将分离，从而使得试样基体表面输入卸载波( $\sigma = 0$ ,  $v_{cp} = 0$ )。因此，在试样基体里形成的压缩应力

脉冲为  $\sigma = -v_0 \frac{\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}$ ，脉冲宽度为  $2t_1/c_1$ 。

当  $\frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \rho_2 c_2 + \rho_1 c_1 > 0$  时，则有  $v_c|_{\tau=2t_1/c_1} > 0$ 。如果后续的碰撞在不考虑，则试样基体内的应

力脉冲前段为  $\sigma = -v_0 \frac{\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}$ ，并且带有一个尾巴，幅值为

$$\frac{4\rho_0 c_0 \rho_2 c_2}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)} (-v_0 \frac{\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}) \quad (12)$$

试样基体内的应力脉冲作用到基体和被测涂层界面上时，同样将发生反射和透射。反射波和透射波分别为

$$\sigma_{r1} = \frac{\rho_3 c_3 - \rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_3 c_3} \times \sigma \quad (13)$$

$$\sigma_t = \frac{2\rho_3 c_3}{\rho_2 c_2 + \rho_3 c_3} \times \sigma \quad (14)$$

透射波在传播到被测涂层自由表面时将发生反射，形成反射波

$$\sigma_{r2} = -\sigma_t \quad (15)$$

当条件  $t_3 \geq c_3 \times 2t_1 / c_1$  满足时，则

当  $\frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \rho_2 c_2 + \rho_1 c_1 \leq 0$  时，发射应力波为

$$\sigma_{r2} = v_0 \rho_1 c_1 \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \frac{2 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2 + \rho_3 c_3} \quad (16)$$

当  $\frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \rho_2 c_2 + \rho_1 c_1 > 0$ ，反射应力波为  $\sigma_{r2}$  并跟随一个尾巴，尾巴幅值可由式(12)和(14)获

得。且反射波  $\sigma_{r2}$  的峰值段为

$$v_0 \rho_1 c_1 \frac{2 \rho_2 c_2 \rho_3 c_3}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)(\rho_2 c_2 + \rho_3 c_3)} \left(1 - \frac{4 \rho_0 c_0 \rho_2 c_2}{(\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1)(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)}\right) \quad (17)$$

(16) 和 (17) 的结果表明， $\sigma_{r2}$  将随着  $\rho_1 c_1$  的增大而增大。并且，当  $\frac{\rho_0 c_0 - \rho_1 c_1}{\rho_0 c_0 + \rho_1 c_1} \rho_2 c_2 + \rho_1 c_1 > 0$

时， $\sigma_{r2}$  的峰值段将随着弹体声阻抗的降低而增大。极限情况就是，当弹体声阻抗为 0 时，获得  $\sigma_{r2}$  的最大值。

### 3 数值计算案例<sup>[9]</sup>

考察一个模型材料体系作为算例，弹丸长度  $l = 5\text{mm}$ ，弹丸半径  $r = 2.5\text{mm}$ ，试样基体厚度  $t_s = 1\text{mm}$ ，试样半径  $r_s = 10\text{ mm}$ ，弹头涂层厚度  $t_c = 0.1\text{mm}$ ，试样涂层厚度  $t_f = 0.1\text{mm}$ ；选弹丸、弹头涂层和试样基体、试样涂层的材料常数如表 1 所列，暂不考虑材料塑性。

表 1 弹丸圆柱、弹头涂层（及试样基体）和被测涂层材料

	密度( $\text{kg/m}^3$ )	弹性模量(GPa)	泊松比
弹丸圆柱	1050	3.38	0.35
弹头涂层（及试样基体）	7850	209	0.30
被测涂层	7190	242	0.15

以动态显式有限元法分析可得到当弹丸初速为  $250\text{m/s}$  时，在以弹丸轴线为中心、半径为  $2.5\text{mm}$  的圆面范围内平均的试样基体表面和界面法向应力历史如图 4 所示。

基体表面的应力变化趋势线显示，界面处在压缩应力脉冲之后，出现了预期的拉伸应力。在界面应力出现峰值的时间点  $t \approx 0.268 \mu\text{s}$ ，将界面应力映射到沿界面的路径上，可得界面应力的分布如图 5 所示。从图 5 可见，在弹丸横截面所覆盖的大部分范围内，被测涂层-基体的界面应力是比较均匀的拉应力，这种拉应力水平足够高时可使涂层沿界面剥离。

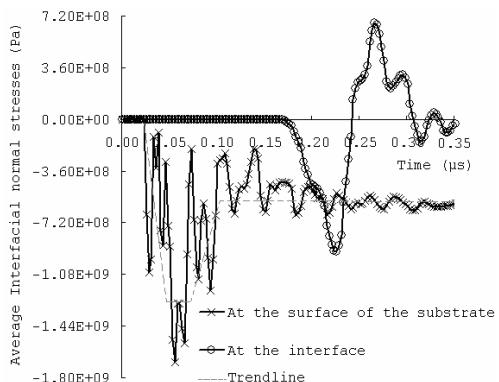
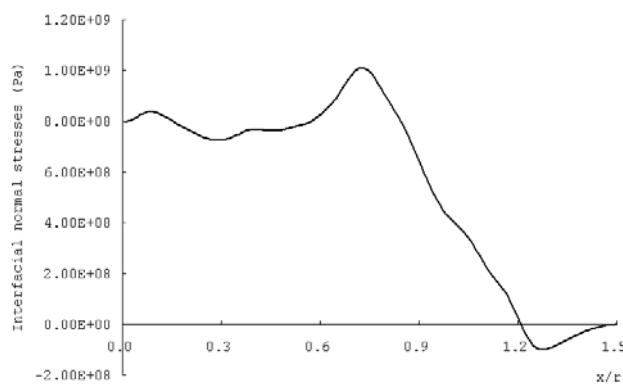


图 4 基体表面及被测涂层-基体界面法向平均应力历史

图 5 在  $t \approx 0.268 \mu s$  时刻界面应力分布

#### 4 结论

基于层裂原理，以前端面带辅助涂层的弹头冲击试样基体侧，可以制造短脉冲压缩应力波，该压缩应力波通过透射、反射后，将在被测界面附近形成拉伸应力；基于一维弹性假设的应力波形成、传播和演化过程解析分析表明，应力波峰值取决于辅助涂层与弹体材料声阻抗的匹配；有限元模拟分析结果表明，界面应力幅值足够大、可望制造界面剥离，在弹头截面覆盖范围内应力分布比较均匀。

#### 参 考 文 献

- 1 K.L. Mittal. Adhesion measurement: recent progress, unsolved problems, and prospects. *Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films, and Bulk Coatings*, American Society for Testing and Materials ASTM STP 640 (1978): 5–17.
- 2 K.L. Mittal. Selected bibliography on adhesion measurement of films and coatings. *Journal of Adhesion Science and Technology* 1(3) (1987): 247–259.
- 3 Chalker P R., Bull S J., Rickerby D S., Review of methods for the evaluation of coating-substrate adhesion. *Materials Science and Engineering A* 140 (1991): 583~592.
- 4 Robert Lacombe, Adhesion Measurement Methods: Theory and Practice, New York: Taylor & Francis, 2006.
- 5 G. Marot, Ph. Démaréaux, J. Lesage, M. Hadad, St. Siegmann and M.H. Staia, The interfacial indentation test to determine adhesion and residual stresses in NiCr VPS coatings, *Surface and Coatings Technology* 22 (2) (2008): 4411-4416.
- 6 H. Li, K.A. Khor and P. Cheang, Adhesive and bending failure of thermal sprayed hydroxyapatite coatings: Effect of nanostructures at interface and crack propagation phenomenon during bending, *Engineering Fracture Mechanics* 74 (12) (2007): 1894-1903.

- 7 L.H. Xiao, Xu Ping. Su, J.H. Wang, Y.C. Zhou, A novel blister test to evaluate the interface strength between nickel coating and low carbon steel substrate, *Materials Science and Engineering A* 50 1 (1-2) (2009): 235-241.
- 8 J. Andersons, S. Tarasovs and Y. Leterrier, Evaluation of thin film adhesion to a compliant substrate by the analysis of progressive buckling in the fragmentation test, *Thin Solid Films* 517 (6) (2009): 2007-2011.
- 9 Chen-Wu Wu, Zhi-Lin Wu, Kun Zhang and Guang-Nan Chen, A Method of Impact with the Coated Bullet to Evaluate the Adhesion between the Film and Substrate, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, in press.
- 10 J.L. Vossen. Measurements of film-substrate bond strength by laser spallation. *Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films and Bulk Coatings*, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 640 (1978):122-123.
- 12 侯振德, 汤灵霞, 富东慧, 张增幅, 田欣利, 利用应力波测量涂层的结合强度, *兵工学报* 27 (2) (2006): 306-309.
- 12 蔡兰, 周明, 张永康, 激光涂层层裂技术的理论建模及相关诊断技术, *江苏理工大学学报(自然科学版)* 21 (6) (2000): 4-8.
- 13 M. Zhou, D. Y. Zeng, J. P. Kan, Y. K. Zhang, L. Cai, Z. H. Shen, X. R. Zhang, and S. Y. Zhang, Finite element simulation of the film spallation process induced by the pulsed laser peening, *Journal of Applied Physics* 94 (5) (2003): 2968-2975.
- 14 周明, 张永康, 蔡兰, 激光层裂法定量测量涂层界面结合强度, *中国科学(E辑)* 32 (1) (2002): 28-36.
- 15 Junlan Wang, Thin-film Adhesion Measurement by Laser-Induced Stress Waves, thesis for PHD, Urbana, Illinois 2002.
- 16 王仁等译(H.考尔夫斯基著), 固体中的应力波, 北京: 科学出版社, 1958.
- 17 王礼立 编著, 应力波基础(第2版), 北京: 国防工业出版社, 2005.
- 18 Tarabay Antoun, Lynn Seaman, Donald R. Curran, Gennady I. Kanel, Sergey V. Razorenov and Alexander V. Utkin, Spall Fracture, Springer, Newyork, 2003.
- 19 Zhi-Lin Wu, Chen-Wu Wu, Guang-Nan Chen, and Kun Zhang, On a novel method of impact with front-end-coated bullet to evaluate the interface adhesion of the film and substrate, 5th coatings science international conference, Noordwijk, The Netherlands, 22 June - 26 June 2009.

## DYNAMIC EVALUATION METHOD FOR INTERFACE ADHESION

Wu Chenwu\* Chen Guangnan\* Zhang Kun\* Wu Zhilin\*\*

\* (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

\*\* (School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract** The method of impact by front-ended-coated bullet to evaluate the interface adhesion between the film and substrate was demonstrated. The theoretical description of the initiate, propagation and evolution of the stress pulse during impact was developed and formulized. An example of such dynamic process was simulated numerically by finite element method.

**Key words** Coating, Interface adhesion, Bullet impact, Spallation