

文章编号：1000-4750(2002)04-135-06

# 热喷涂构件中残余应力的理论分析

黄晨光，段祝平，吴承康

(中国科学院力学研究所，北京 100080)

**摘 要：**本文发展了一种新的分析涂层结构(平板、梁)热残余应力的模型，可以研究骤冷过程(Quenching)和冷却过程(Cooling)在涂层结构内引发的残余应力分布。与以往模型相比，其优势在于：它可以考虑源于喷涂过程的涂层孔隙率、温度梯度等因素对于涂层和基底内残余应力的影响。其中孔隙率和温度分布由计算机模拟涂层沉积过程得到。另外，当基底的材料和几何参数被固定时，我们分析了诸如涂层的理想模量、厚度、热膨胀系数等参数，对于涂层结构中最终残余应力分布的改变机理。

**关键词：**热喷涂；残余应力；孔隙率；沉积过程

中图分类号：O34 文献标识码：A

## 1 引言

等离子体喷涂技术的应用已有近三十年的历史，它在航空、特殊机械等领域中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>。一般地，热喷涂构件在冷却到室温后，涂层和基底中会出现热残余应力。残余应力的大小直接影响着部件的抗热冲击性能、疲劳寿命等参数。

热喷涂构件中的残余应力按产生的机制可以分为骤冷应力和冷却应力两种<sup>[1]</sup>。前者出现的机理是，当熔化的颗粒到达基底时，由于碰撞的速度较高，液态颗粒首先沿基底铺开而形成层片，在短时间内层片将会凝固并发生冷却，因受到基底的约束而出现拉伸应力，并相应的引起基底内相邻区域的压缩应力，同时在结构内产生弯矩。冷却应力是指整个喷涂过程完成后，涂层和基底同时冷却到室温，由于两种材料热膨胀系数等的不同而产生的一种热失配应力。

近年来，有关涂层残余应力分析的工作大量涌现<sup>[2-7]</sup>。Clyne<sup>[3,4]</sup>，Suresh<sup>[5]</sup>等人利用各自的模型得到了热残余应力的解析解，后者的模型中还考虑了基底材料内可能出现的线性硬化塑性变形。但其中没有考虑骤冷应力，只讨论了热失配所产生的冷却应力。Tsui, Clyne<sup>[2]</sup>取得了一定的进展，计入了骤冷

应力的影响。但仍存在不足：一是忽略了涂层材料中的孔隙率；二是在冷却应力的计算中假设喷涂构件内的温度是均匀分布的。关于残余应力的数值模拟工作，Gill, Clyne<sup>[6]</sup>利用一维的有限差分法考虑了一些复杂因素对残余应力的改变，如材料弹性参数对温度的依赖等。Ferrari<sup>[7]</sup>等人的研究通过一维差分法和二维有限元计算的结合，对颗粒的沉积过程、构件内的温度演化和分布、热残余应力的大小等诸多方面进行了初步但较系统的模拟。

本文中，作者利用计算机模拟，得到了实际工艺条件下，涂层内的温度和孔隙率分布，接着，利用新的模型研究了涂层内孔隙率、温度分布等因素对残余应力产生的影响。结果表明，在残余应力的计算中，考虑孔隙率、涂层内温度矩、平均温差等因素的影响是十分必要的。最后提出了改变喷涂部件热残余应力的一些途径和因素。

## 2 沉积过程和温度场的计算

本节改进了Civolini<sup>[7,8]</sup>等人的方案，用计算机模拟了喷涂中颗粒的沉积过程，得出了涂层内孔隙率的分布及在喷涂过程中，产生的沿涂层厚度方向的温度分布。

收稿日期：2000-11-16；修改日期：2001-04-12

基金项目：国家及中科院自然科学基金重点项目资助(10002021)

作者简介：黄晨光(1969)，男，副研究员，博士，从事材料力学及冲击动力学研究

段祝平(1938)，男，研究员，从事爆炸力学研究

吴承康(1929)，男，研究员，从事等离子体科学、燃烧、烧蚀研究

在研究液态陶瓷颗粒的沉积过程时，可以认为每个液态陶瓷颗粒与基底(或前面的涂层)碰撞，变形铺开并冷凝成小涂层片(Lamella)的过程是独立的，并且假设涂层片呈小圆饼状。

在涂层生长过程的模拟中，我们采用了6个假设：(1) 液态颗粒变形后在冲击区严格按照下一层的形状扑开；(2) 在冲击区下，只隔一个小涂层片厚度的空洞将会湮灭；(3) 液态涂层材料在冲击区外向四周自然流动至指定大小；(4) 小涂层片在冲击区外将在其上下表面温差的作用下，发生翘曲；(5) 未熔化颗粒经过碰撞后形成半球，位于下层表面的平均高度线上，并填充颗粒与下层间的所有空洞。如果未熔化颗粒的下层也是未熔化颗粒则会弹开；(6) 部分熔化的颗粒，其熔化的部分按(1-4)处理，未熔化部分按(5)处理。

在前述模型的基础上，得到了孔隙沿厚度方向的分布如图1所示，它与一些实验结果是吻合的<sup>[1]</sup>。模拟中使用的主要参数如表1所示，其它各参数可参见文献[1,7,8]。

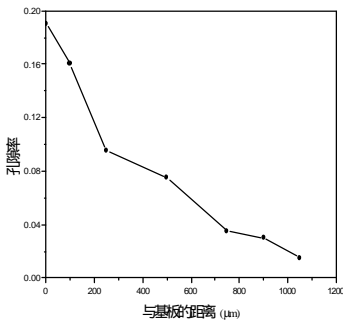


图 1 涂层内孔隙率沿涂层厚度方向的分布

Fig.1 Porosity distribution along the thickness direction

表1 模拟沉积过程所用参数

Table 1 Parameters used in the simulation of deposite process

颗粒直径	碰撞速度	底板粗糙度	颗粒温度	底板温度	雷诺数
20 ~ 80	50 ~ 200	7.491	~ 3300	300 ~ 1200	250

在沉积过程的计算机模拟中，需要知道基底(或下一层涂层)的温度，以便计算新的涂层片的翘曲大小。同时在热残余应力的分析中，也需要知道涂层内初始温度的分布。本文中，我们利用有限元方法来确定温度场，采用了ANSYS 5.4商业软件。热传导方程、边界条件的确定及各参数的大小可参考文献[10]。此处仅给出两种不同基底温度下的涂层内温度分布，如图2所示。

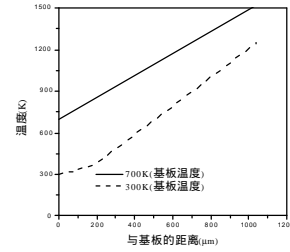


图 2 涂层内的温度沿其厚度方向的分布

Fig.2 Temperature distribution along the thickness direction

### 3 残余应力分析的理论模型

#### 3.1. 沉积过程中骤冷应力引起的残余应力分布

骤冷应力源于液态颗粒与底板碰撞所形成层片的快速冷却和凝固过程。人们一般利用模型实验的测量结果估算涂层内每一薄层的骤冷应力，然后按下面的理论计算骤冷残余应力在涂层内的分布及其对基底内应力分布的影响。

涂层内孔隙率和温度沿厚度方向的分布会导致每层中的弹性常数和骤冷应力等不同。计第*i*层中的骤冷应力为  $s_q^i$ ，由之引起的失配应变为

$$De^i = \frac{s_q^i}{E_d^i} \tag{1}$$

其中  $E_d^i$  为第*i*层涂层的杨氏模量， $E_d^i$  的计算方法在文献[7]中有详细的介绍，其中详细讨论了空洞等因素对材料杨氏模量的影响。根据复合梁理论<sup>[2,9]</sup>，利用叠加原理可获得多个薄层(Layer)在涂层和基底内引发的残余应力。

$$s_{sbn} = s_s |_{y=-H} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{-E_s F_i}{b(H E_s + \sum_{j=1}^i w E_d^j)} \right) \tag{2}$$

$$+ E_s (\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_{i-1}) \cdot (\mathbf{d}_i + H))$$

$$s_{stm} = s_s |_{y=0} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{-E_s F_i}{b(H E_s + \sum_{j=1}^i w E_d^j)} + E_s (\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_{i-1}) \mathbf{d}_i \right) \tag{3}$$

$$s_{dk} = s_d |_{y=(k-1/2)w} = \frac{F_k}{bw} - E_d^k (\mathbf{k}_k - \mathbf{k}_{k-1}) \cdot \left( (k - \frac{1}{2})w - \mathbf{d}_k \right) + \sum_{i=K+1}^n \left( \frac{-E_d^i F_i}{b(H E_s + \sum_{j=1}^i w E_d^j)} - E_d^i (\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_{i-1}) \left( (k - \frac{1}{2})w - \mathbf{d}_i \right) \right) \tag{4}$$

其中

$$F_i = \mathbf{s}_d^i b w \left( \frac{HE_s + \sum_{j=1}^{i-1} w E_d^j}{HE_s + \sum_{j=1}^i w E_d^j} \right) \quad (5)$$

$$\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_{i-1} = \frac{F_i \left( (i - \frac{1}{2})w - \mathbf{d}_{i-1} \right)}{\mathbf{S}_i}$$

$$\sum_i = b \int_{-H+\mathbf{d}_i}^{(\frac{i-1}{2})w-\mathbf{d}_i} E(y_c) y_c^2 dy = \sum_{j=1}^i (b E_d^j \left( \frac{j^3 - (j-1)^3}{3} w^3 - (j^2 - (j-1)^2) w^2 \mathbf{d}_i + w \mathbf{d}_i^2 \right)) \quad (6)$$

$$+ E_s b H \left( \frac{H^2}{3} + H \mathbf{d}_i + \mathbf{d}_i^2 \right)$$

$$\mathbf{d}_i = - \frac{H^2 E_s - \sum_{j=1}^i (2j-1) w^2 E_d^j}{2(H E_s - \sum_{j=1}^i w E_d^j)} \quad (7)$$

在方程(2-7)中,  $\mathbf{s}_{sbn}, \mathbf{s}_{sm}, \mathbf{s}_{dk}$  分别为第n个薄层喷涂后, 基底底部、界面和第K层薄层内中心处的残余应力,  $H, w$  分别为基底厚度和单涂层的厚度。  $\mathbf{d}_i, \sum_i$  代表第i个薄层喷涂后结构的中性面位置和抗弯模量。  $\mathbf{k}_i$  为第i个薄层喷涂后复合梁弯曲时的曲率。

### 3.2 冷却过程引起的残余应力

在以往喷涂残余应力的分析模型中, 人们只考虑了涂层材料和基底材料的热膨胀系数不同而引起的应力, 即假定涂层内的温度分布是均匀的且与基底的温度相同。这在大多数情况下是不能成立的, 特别在涂层成长速度较高时, 这种假定就更不适用<sup>[1,7]</sup>。作者认为, 冷却过程中的热失配应变应该是,

$$\mathbf{De} = (\mathbf{a}_s - \mathbf{a}_d) \mathbf{DT}_1 - \mathbf{a}_d \mathbf{DT}_2 \quad (8)$$

$$\mathbf{DT}_1 = T_s - T_0, \quad \mathbf{DT}_2 = T_d^{ave} - T_s$$

其中,  $\mathbf{a}_s, \mathbf{a}_d$  分别为基底和涂层材料的热膨胀系数,  $T_s, T_d^{ave}, T_0$  则为基底温度、涂层平均温度和室温温度。上式右边的第一部分代表的就是由膨胀系数不同引起的失配应变, 后一部分则由于基底温度和涂层平均温度的差异所造成。在涂层和基底内引起的力及弯矩为,

$$F_C = b \cdot \mathbf{De} \left( \frac{E_d^{ave} E_s h H}{E_d^{ave} h + E_s H} \right), \quad M_C = F_C \left( \frac{H+h}{2} \right) \quad (9)$$

其中,  $E_d^{ave}, h$  分别代表涂层的平均杨氏模量和总厚

度。而涂层内由于温度的不均匀引发的温度弯矩可写为<sup>[9]</sup>

$$M_T = b E_d^{ave} \mathbf{a}_s \int_{-\frac{1}{2}h}^{\frac{1}{2}h} T_d(y) y dy \quad (10)$$

其中,  $T_d$  表示涂层内的温度分布函数。

同样由复合梁理论<sup>[9]</sup>, 可求出冷却过程中, 在基底和涂层内诱导发生的残余应力。

$$\mathbf{s}_s |_{y=-H} = - \frac{F_C}{bH} + E_s (\mathbf{k}_c - \mathbf{k}_n) (H + \mathbf{d}) \quad (11)$$

$$\mathbf{s}_s |_{y=0} = - \frac{F_C}{bH} + E_s (\mathbf{k}_c - \mathbf{k}_n) \mathbf{d} \quad (12)$$

$$\mathbf{s}_d |_{y=(j-\frac{1}{2})w} = \frac{F_C}{bh} - E_d^{ave} (\mathbf{k}_c - \mathbf{k}_n) \left( (j - \frac{1}{2})w - \mathbf{d} \right) \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{d} = \frac{h^2 E_d^{ave} - H^2 E_s}{2(h E_d^{ave} + H E_s)}, \quad \mathbf{k}_c - \mathbf{k}_n = \frac{(M_c + M_T)}{\mathbf{S}_c} \quad (14)$$

$$\mathbf{S}_c = b \int_{-H+\mathbf{d}_1}^{h-\mathbf{d}_1} E(y_c) y_c^2 dy = E_d^{ave} b h \left( \frac{h^2}{3} - h \mathbf{d} + \mathbf{d}^2 \right) + E_s b H \left( \frac{H^2}{3} + H \mathbf{d} + \mathbf{d}^2 \right) \quad (15)$$

将公式(2-7)与(10-15)叠加, 即可求出热喷涂构件中由于骤冷和冷却所产生的残余应力。

## 4 分析结果和讨论

本节中, 首先将我们的模型退回到Clyne等人的工作<sup>[2]</sup>。故此, 忽略涂层内的孔隙率和温度分布, 假定涂层与基底的温度相同。在计算过程中采用的参数如表2所示。

表2 残余应力计算中所采用的各参数

Table 2 Parameters used in the calculation of residual stresses

$E_s$ (GPa)	$H$ (mm)	$b$ (mm)	$C_1$	$w$ (mm)	$E_d^0$ (GPa)
280	1.62	20.3	0	0.104	34.1
$C_2$	$\mathbf{s}_d^0$ (MPa)	$T_0$ (K)	$\mathbf{DT}^i$ (K)	$\mathbf{a}_d$ (K <sup>-1</sup> )	$\mathbf{a}_s$ (K <sup>-1</sup> )
0	65	700	0	12.0e <sup>-6</sup>	12.1e <sup>-6</sup>

此时预测的残余应力如图3所示, 从中可以发现, 本文模型的计算结果与Clyne等人所得的结果相同, 这表明文献[2]中的模型可以作为本文的特例。

图4显示, 当计入孔隙率的影响后, 基底和涂层内残余应力的幅度都减小了。而图5则说明温度梯度引入到计算中后, 残余应力的幅值有大幅度的上升。其主要原因是: 在图3所示的温度分布条

件下，涂层内的平均温度明显高于基底的平均温度，而二者的热膨胀系数相当，故引起一正的附加弯矩；同时温度梯度形成的温度矩也是同向的，在此两种因素的作用下，使得残余应力幅值加大。当然，由于涂层内温度梯度的存在，骤冷应力会沿着厚度方向递减。不过在本文的参数条件下，这一效应与前二者相比要小得多，并不能控制残余应力分布的规律。

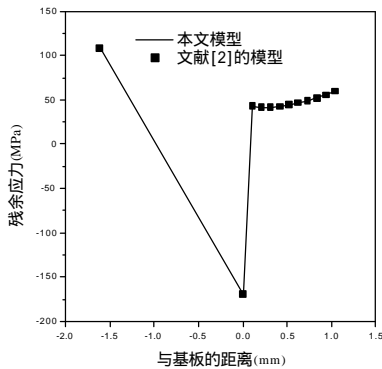


图 3 涂层残余应力模拟结果的比较(与文献[2])  
Fig.3 Simulation results about residual stresses and comparison with those of reference[2]

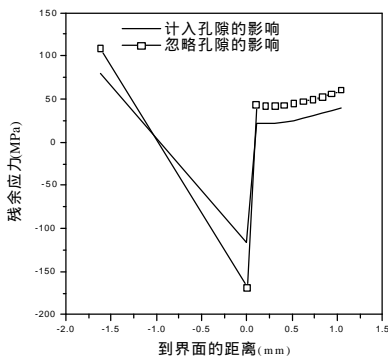


图 4 涂层内空洞的存在对喷涂构件中残余应力的影响  
Fig.4 The effect of porosity on the distribution of residual stresses

下面单独分析冷却温度的影响。图6表明，只有当涂层和基底的膨胀系数存在一定的差异时，冷却温度的大小对残余应力的影响才能显现。当基底的热膨胀系数大于涂层材料的值，骤冷引起的残余应力与冷却所引起的残余应力方向相反，故随着冷却温度的变大，涂层和基底内残余应力的幅值逐渐减小，然后向相反方向发展。从这一角度来看，喷涂中，适当提高基底温度有利于降低构件冷却后的残余应力。

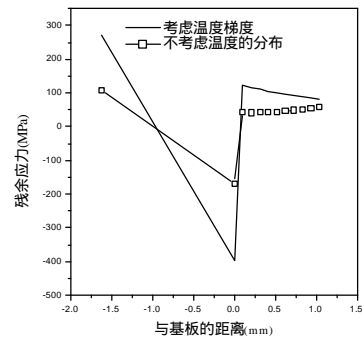


图 5 考虑涂层内的温度分布对残余应力的改变  
Fig.5 Temperature gradient effect on the residual stresses

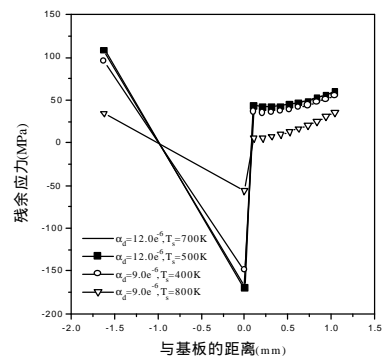


图 6 整体冷却温度对喷涂构件内残余应力分布的影响  
Fig.6 Effect of cooling temperature on the distribution of residual stresses

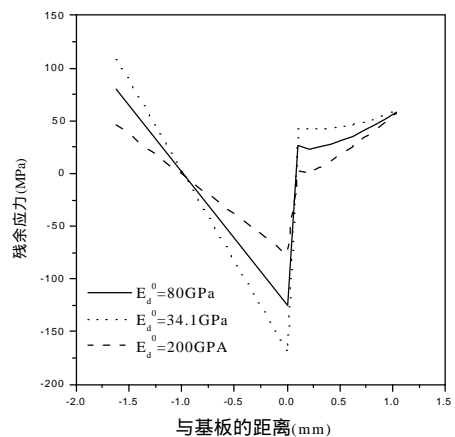


图 7 涂层材料弹性模量的改变对喷涂构件残余应力的影响  
Fig.7 Effect of Young's modulus of coating on the residual stresses

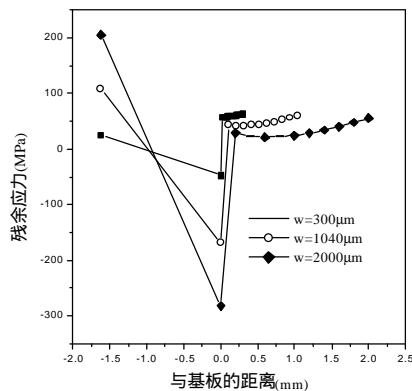


图8 喷涂中,变化涂层厚度对构件内残余应力分布产生的影响

Fig.8 Effect of coating's thickness on the residual stresses of spraying samples

从图9可以看到,与影响残余应力的其它因素相比,涂层结构内残余应力分布对于两种材料间热膨胀系数的差异十分敏感,当涂层的热膨胀系数从  $12.0 \times 10^{-6} K^{-1}$  变化至  $4.0 \times 10^{-6} K^{-1}$  时,基底和涂层残余应力的变化幅度大至几百兆帕。当然,这种变化的幅度也与基底和涂层的平均温度相关。从公式8可以知道,热膨胀系数改变对于残余应力的影响,是与整体温度的降低耦合在一起的。

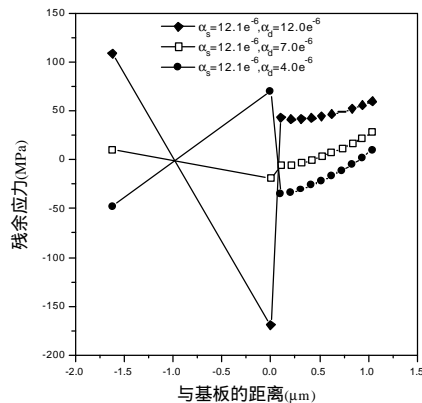


图9 热膨胀系数的差异对涂层内残余应力的影响

Fig.9 Effect of TEC's differences between coating materials and substrate in the residual stresses

## 5 结语

本文的工作包括:一是用计算机模拟了涂层的生长过程,得出了孔隙率和温度沿厚度方向的分布;二是利用材料力学中复合梁的理论,发展了一

种残余应力的分析模型,它能够考虑孔隙率、温度分布、基底温度、涂层厚度与模量、热膨胀系数等对残余应力的影响。

分析发现,当基底的热膨胀系数大于涂层的热膨胀系数时,骤冷应力和冷却应力对残余应力的影响是相反的。这为我们得到有利的涂层内残余应力的分布提供了一个思路。在实际应用中,我们需要涂层内的拉应力尽量减小,以避免涂层的破坏,这时有效的方法是增大冷却应力的幅值,如适当提高构件的冷却温度或者使基底与涂层材料的热膨胀系数的差异变大。

文中得到的残余应力的变化规律,只是在本文的参数范围内有效。针对具体的工程问题,可以采用本文的分析方法,代入具体的参数进行计算。

### 参考文献:

- [1] L Pawlowski. The science and engineering of thermal spray coatings[M]. John Wiley & Sons Ltd, England, 1995.
- [2] Tsui Y.C., Clyne T.W., An analytical model for prediction residual stresses in progressively deposited coatings, Part 1: planar geometry[J], Thin Solid Films, 1997, 306: 23-33.
- [3] Clyne T.W. Residual stresses in surface coating and their effects on interfacial debonding[J]. Key Eng. Mats., 1996. 116-117, 307-330.
- [4] A Berner, S Senderoff. Calculation of stress in electrodeposits from the curvature of a plated strip[J]. J. Res. Natl. Bur. Stand, 1949, 42: 105-123.
- [5] Suresh S, Giannakopoulos A. E., Olsson M. Elastoplastic analysis of thermal cycling layered materials with sharp interface[J]. J. Mech. Phys. Solids, 1994, 42: 979-1018.
- [6] A Gill, Clyne T.W., Thermomechanical modelling of the development of residual stress during thermal spraying[C]. in Plasma Technique symposium, plasma technique, Ed. H. Eschenauer, 1991, 3: 227-238.
- [7] M Ferrari, Harding J.H. M Marchese. Computer simulation of plasma-sprayed coating, II. Effective bulk properties and thermal stress calculation[J]. Surface and Coating technology, 1991, 48: 147-154.
- [8] T Cirolini, Harding J.H., G Jacucci. Computer simulation of plasma-sprayed coating, I. Coating deposition model[J]. Surface and Coating technology, 1991, 48: 137-145.
- [9] Timoshenko S.P., Gere J.M. Mechanics of materials[M]. D. Van Nostrand Company, 1972.

- [10] L Pawlowski, M Vardelle, P Fauchais. Simulation of temperature distribution in the plasma spraying technology[J]. Thin Solid Films, 1982, 94: 307-315.

## A NEW ANALYTICAL MODEL FOR RESIDUAL STRESSES DUE TO THERMAL SURFACE COATING

HUANG Chen-guang , DUAN Zhu-ping , WU Cheng-kang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** In this paper, a new analytical model, which can be used to deal with the residual stresses distributions in the processes of quenching and cooling, is presented with the consideration of effects of porosity and temperature gradient in the coating. Firstly, the distributions of porosity and temperature along the thickness are obtained by computer simulation of the deposition of heated particulates with the new model, the effects of thermal expanding coefficients, Young's modulus, temperature of substrate, etc., on the changing of residual stresses are investigated. It is found that the increase of the cooling temperature and the enlargement of the difference of expanding coefficients between substrate material and coating ceramic can reduce the tensile residual stress in the coating layers and prevent efficiently the coating from failing.

**Keywords:** thermal spraying; residual stress; porosity; deposition process