

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(5) (2020) 289-290 DOI: 10.22060/mej.2019.15054.6014

Discrete Element Method Simulation of Crack Propagation in Brittle Coatings

M. A. Ghasemi and S. R. Falahatgar*

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT: Coatings are used in different industries in order to improve the surface properties in components and instruments. In some situations, such as improving the wear resistance of an instrument, brittle coatings have been considered. Dominant failure mode in these structures is crack initiation and propagation. So, investigating the fracture behavior of these structures is of great importance. In this paper, the discrete element method is used to simulate the crack initiation and propagation in coating/substrate structures. This method has a great ability to predict damage initiation and propagation in structures. For this purpose, a discrete element solver code is written by authors. Brittle elastic behavior is considered in coating and substrate and the effect of elastic mismatch in constituents of structure and the coating thickness in damage initiation and propagation were investigated. The results showed that in structures in which coating stiffness is less than substrate stiffness, in the case of the low thickness of the coating thickness, the crack grows into or parallel to the interface. In structures in which the coating stiffness is greater than substrate stiffness, no matter to the coating thickness, the crack grows to the substrate.

Review History:

Received: 9/30/2018 Revised: 12/13/2018 Accepted: 2/4/2019 Available Online: 2/8/2019

Keywords:

Coating/substrate structures Brittle coating Discrete element method Damage propagation

1. INTRODUCTION

Coatings are used in many industries to improve surface properties. Crack creation in coatings may cause catastrophic issues in the whole of the structure. Therefore, the prediction of damage initiation and the evolution pattern have great importance.

In brittle coatings, damages appear due to tensile stresses at the surface and propagate through the thickness. At this state, depending on the mechanical properties of different constituents, cracks may cease at the interface of coating and substrate, propagate through the interface or propagate on the substrate [1].

Three and four point bending tests on coating/substrate structures are common methods to investigate cracking under tensile stress in these structures [2]. Bending tests have been performed in order to fracture toughness calculation at coating or interface [3] or to clarify the damage growth pattern [4]. In addition to experimental observations, finite element simulations on crack evolution patterns have been performed [2, 5].

Unlike the previous numerical simulations which used Finite Element Method (FEM), Discrete Element Method (DEM) is used in the present paper in order to capture the local damages in the brittle coating/substrate structures due to three-point bending. DEM considers discrete nature for the bulk material. In this method, the domain is discretized with a set of rigid disks (in 2D) and spheres (in 3D) which have interaction with themselves. The macroscopic behavior of the material arises from the interaction of particles at the microscale. These particles can be bonded together to simulate the continuous solid material [6]. In this situation, micro-cracks create when the bonds break. DEM has been used by Ghasemi and Falahatgar [7, 8] to simulate delamination due to thermal loading and damages due to three-point bending by the use of cohesive contact model in brittle coating/substrate structures.

In this paper, DEM is used to simulate damage initiation and propagation in brittle coating/substrate systems under threepoint bending by the use of the elastic-perfectly brittle bond model. DEM solver code is written in FORTRAN programming language by the authors and validation is performed by comparing the DEM simulation results with experimental ones, qualitatively and quantitatively. A parametric study was performed and the effects of elastic parameters mismatch between coating and substrate and coating thickness on damage initiation and propagation are investigated.

2. DISCRETE ELEMENT METHOD

As noticed before, in this method, the interaction of particles, define the macroscopic behavior of the bulk material. The translational and rotational motion of particles is governed by Newton and Euler's equation (rigid body dynamic). Explicit time integration of these equations leads to the new position of each particle.

$$u_i^{n+1} = u_i^{n-1} - 2u_i^n + \frac{F_i}{m_i} \Delta t^2$$
⁽¹⁾

$$\theta_i^{n+1} = \theta_i^{n-1} - 2\theta_i^n + \frac{T_i}{I_i}\Delta t^2$$
⁽²⁾

elastic-perfectly brittle force-displacement relations of each bond [9, 10]. In addition, m_i and I_i are the mass

*Corresponding author's email: falahatgar@guilan.ac.ir



and moment of inertia of particle, u_i is the translational displacement, θ_i is the rotational displacement, and Δt is the stable time step.

In this paper, in the coating and substrate, bond breakage happens when the stresses reach the material tensile strength. This criterion is explained by Tavarez and Plesh [10]. At the interface, due to mixed mode fracture, bond breakage criterion considers both the normal and shear stresses.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Validation is performed with experimental results [4], qualitatively and quantitatively. Table 1 gives the material properties and dimensions. Fig. 1 compares damage evolution, qualitatively and load-displacement curves, quantitatively.

In the remainder of the paper, two different coefficients of elastic mismatch (a) which is introduced in Ref. [11] and two coating thickness ratios ($h_c/h_s=0.15$ and $hc/h_s=0.4$) are considered to define the effects of elastic mismatch and coating thickness. In these results, material strength is considered as E/1000 (E is Young's modulus of the constituents). In addition, the mechanical properties of the interface are the average properties of coating and substrate. Fig. 2 shows the damage evolution in all cases.

4. CONCLUSIONS

Damage evolution is simulated in the brittle coating/ substrate structure to clarify the effects of the elastic mismatch and coating thickness. The results show that, when there is the high difference in mechanical properties of coating

100 GPa	Coating Young's modulus
200 GPa	Substrate Young's modulus
200 MPa	Coating tensile strength
350 MPa	Interface strength
15 mm	Length
3 mm	Width
1.5 mm	Thickness







(b) Fig. 2. Damage evolution in (a) α =-0.7 and (b) α =0 with two different coating thicknesses

and substrate, for thick coatings, damage propagates at the interface but for thin coatings, damage propagation appears at the substrate. By reduction of their differences, no matter the coating thickness, damage propagates to the substrate.

REFERENCES

- A. Strawbridge, H. E. Evans, Mechanical failure of thin brittle coatings, Engineering Failure Analysis, 2(2) (1995) 85-103.
- [2] P. Bansal, P. Shipway, S. Leen, Finite element modelling of the fracture behaviour of brittle coatings, Surface and Coatings Technology, 200(18-19) (2006) 5318-5327.
- [3] I. Hofinger, M. Oechsner, H.-A. Bahr, M. V. Swain, Modified four-point bending specimen for determining the interface fracture energy for thin, brittle layers, International Journal of Fracture, 92(3) (1998) 213-220.
- [4] X. Li, L. Liang, J. Xie, L. Chen, Y. Wei, Thickness-dependent fracture characteristics of ceramic coatings bonded on the alloy substrates, Surface and Coatings Technology, 258 (2014) 1039-1047.
- [5] P. Forschelen, A. Suiker, O. van der Sluis, Effect of residual stress on the delamination response of film-substrate systems under bending, International Journal of Solids and Structures, 97 (2016) 284-299.
- [6] D. O. Potyondy, P. A. Cundall, A bonded-particle model for rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(8) (2004) 1329-1364.
- [7] M. A. Ghasemi, S. R. Falahatgar, Damage initiation and propagation simulation of coatings in coating/substrate structures under thermal loading using discrete element method, Modares Mechanical Engineering, 18(2018) 163-172 (in Persian).
- [8] M. A. Ghasemi, S. R. Falahatgar, Damage evolution in brittle coating/substrate structures under three-point bending using discrete element method, Surface and Coatings Technology, 358(2019) 567-576.
- [9] J. Rojek, E. Oñate, Multiscale analysis using a coupled discrete/ finite element model, Interaction and Multiscale Mechanics, 1(1) (2007) 1-31.
- [10] F. A. Tavarez, M. E. Plesha, Discrete element method for modelling solid and particulate materials, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 70(4) (2007) 379-404.
- [11] H. Mei, Y. Pang, R. Huang, Influence of interfacial delamination on channel cracking of elastic thin films, International Journal of Fracture, 148(4) (2008) 331.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۵، سال ۱۳۹۹، صفحات ۱۱۵۳ تا ۱۱۶۶ DOI: 10.22060/mej.2019.15054.6014

شبیهسازی المان گسسته گسترش ترک در پوششهای ترد

محمد امين قاسمي، سيد رضا فلاحتگر*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۸۸-۷۰-۱۳۹۷ بازنگری: ۲۲-۹۹-۱۳۹۷ پذیرش: ۱۵-۱۱-۱۳۹۷ ارائه آنلاین: ۱۹-۱۱-۱۳۹۷

کلمات کلیدی: ساختارهای پوشش-بستر پوشش ترد روش المان گسسته گسترش آسیب

بسته به نوع بارگذاری و تنشهای ایجاد شده، مودهای آسیب در

این ساختارها متفاوت است. در پوششهای ترد، در موارد بسیاری،

آسیب در اثر تنشهای کششی بهوجود میآید. در اثر تنشهای

کششی در آنها، آسیب اولیه به صورت ترکهایی در کل ضخامت

پوشش، ایجاد میشوند. این ترکها ممکن است که در فصل مشترک

بین پوشش و بستر متوقف شوند. حالت دیگر، گسترش آنها در فصل

مشترک و یا داخل بستر است. ایجاد هر یک از این حالتها، بسته

به رفتار مواد اجزاء تشکیل دهنده ساختار و فصل مشترک بین آنها

است [۲]. شکل ۱ به صورت شماتیک این حالتها را نشان میدهد.

شرایط بارگذاری مختلف وجود دارد. اوانز و همکاران [۳] اثر تنشهای

کششی و فشاری پسماند در پوشش (تنشهایی که در حین فرآیند

ساخت و یا بر اثر اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین پوشش و

بستر بر اثر سرد کردن نمونه از دمای لایهنشانی به دمای محیط،

در اجزای ساختار ایجاد می شوند) را در شکست این ساختارها با

روشهای مختلفی برای بررسی رفتار شکست این ساختارها در

خلاصه: پوششدهی قطعات و اجزاء در صنایع مختلف برای بهبود خواص سطح آنها انجام میشود. در این بین، پوششهای ترد در کاربردهایی نظیر افزایش مقاومت در برابر خوردگی و حرارت بسیار مورد توجه قرار گرفتهاند. مود آسیب غالب در این ساختارها، ایجاد و گسترش ترک است، از اینرو بررسی رفتار شکست در این ساختارها از اهمیت ویژهای برخوردار است. در این مقاله، از روش المان گسسته برای شبیهسازی فرآیند ایجاد آسیب اولیه و گسترش آن در ساختارهای شامل پوشش و بستر، به دلیل قابلیت بالای آن در پیش بینی این فرآیند، استفاده شد. رفتار پوشش و بستر ، مورت ترد الاستیک در نظر گرفته شد و اثر پارامترهای اختلاف ضرایب الاستیک اجزای تشکیل دهنده و ضخامت پوشش بر گسترش آسیب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، در ساختارهایی که سفتی پوشش به مراتب کمتر از سفتی بستر است، در ضخامتهای کم پوشش، مود غالب آسیب، ایجاد ترک و گسترش آن به داخل بستر است، در حالی که با افزایش ضخامت پوشش، گسترش ترک به داخل و یا به موازات فصل مشترک بین پوشش و بستر اتهای می افترد. اما در ساختارهایی که در آن سفتی پوشش بزرگتر از بستر است، بدون توجه به ضخامت پوشش، گسترش آسیب به داخل بستر نفوذ می نمایی در آن سفتی به داخل و یا به موازات فصل مشترک بین پوشش، گسترش آسیب به داخل

۱– مقدمه

پوششها کاربردهای مختلفی در صنایع گوناگون دارند. به عنوان مثال محافظت در برابر خوردگی در پرههای توربینهای گازی و یا استفاده به عنوان عایقهای الکتریکی، از کاربردهای مهم آنها است. ایجاد ترک در پوششها و گسترش آن، یکی از مودهای آسیب مهم در ساختارهای شامل پوشش و بستر در بارگذاریهای مختلف است. ایجاد و گسترش این ترکها ممکن است باعث ایجاد آسیبهای مهمی در کل ساختار بشود. برای مثال، ایجاد ترک و گسترش آن در برخی پوششهای سرامیکی که بر روی بستر آلیاژی، به منظور محافظت از آنها در برابر حرارت مورد استفاده قرار می گیرند (پوششهای مقاوم بالا قرار گیرد و باعث ایجاد آسیب در کل ساختار شود [۱]. بنابراین پیشبینی آسیب ایجاد شده در این ساختارها و نحوه گسترش آنها از اهمیت بسیاری برخوردار است.

falahatgar@guilan.ac.ir : نویسنده عهدهدار مکاتبات: *

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License)





در نظر گرفتن رفتار ترد برای پوشش مورد بررسی قرار دادند. توبی و همکاران [۴] نیز به شبیهسازی گسترش ترک عرضی در پوشش نسبتاً ضخیم ترد، در اثر بارهای وارد ناشی از تماس جسم خارجی با سطح پوشش پرداختند. گسترش ترک با در نظر گرفتن مدلی بر مبنای مکانیک شکست الاستیک خطی، برای ترکی که به صورت پیشفرض در پوشش وجود دارد، شبیهسازی شد و پارامترهای مؤثر بر مسیر گسترش ترک مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایشهای خمش سهنقطهای و چهارنقطهای، از متداول ترین روشها برای بررسی شکست در پوششهای دارای رفتار ترد، تحت تنش کششی است [۵]. در واقع، با استفاده از این آزمایشها، ویژگیهای رفتار شکست و نحوه گسترش ترک در ساختارهای شامل یوشش و بستر مورد مطالعه قرار می گیرد. برای مثال، استفاده از آزمایش خمش چهارنقطهای، برای محاسبه چقرمگی شکست در پوشش و یا فصل مشترک بین پوشش و بستر در مراجع [۶] و [۷] ارائه شده است. هوفینگر و همکاران [۶] با استفاده از آزمایش خمش چهارنقطه، چقرمگی شکست (نرخ آزادسازی انرژی بحرانی) در فصل مشترک پوشش سرامیکی (ZrO₂) که بر روی بستر فلزی پوششدهی شده بود را محاسبه کردند. این کار با ایجاد ترک اولیه در فصل مشترک بین پوشش و بستر و مقید کردن نمونه بر گسترش ترک در مسیر مشخص شده، انجام شد. همچنین در برخی دیگر از آزمایشها، به بررسی نحوه گسترش آسیب در این ساختارها پرداخته شده است [۱و۸]. برای مثال، لی و همکاران [۱] با استفاده از آزمایش خمش سهنقطهای برای ساختارهای شامل پوشش و بستر (دارای پوششهای مقاوم در برابر حرارت)، اثر ضخامت پوشش را در نحوه

گسترش آسیب بررسی کردند. آنها در بررسیهای خود، به گسترش ترک در فصل مشترک، برای یوشش های نسبتاً ضخیم و ایجاد ترکهای موازی، عمود بر فصل مشترک در پوششهای نسبتاً نازک اشاره کردند. همچنین شبیهسازی عددی (المان محدود) این فرآیند، با در نظر گرفتن مدل ناحیه چسبنده ابرای گسترش ترک و آسیب، توسط آنها انجام شد. همچنین، شبیهسازی المان محدود ایجاد و گسترش ترک در پوشش ترد WC-Co، که بر روی بستر الاستیک Ti-۶Al-۴V يوشش دهی شده است، تحت خمش چهارنقطه ای، توسط بانسال و همکاران [۵] انجام شد. در این مقاله، معیار حداکثر تنش برای پیشبینی محل ایجاد و گسترش ترک مورد استفاده قرار گرفت و اثر پارامترهای سفتی و ضخامت پوشش و تنشهای یسماند موجود در آن، در رفتار شکست ساختار، بررسی شد. فورشلن و همکاران [۹] با در نظر گرفتن رفتار الاستیک برای یوشش و بستر، نرخ آزادسازی انرژی ترک بینلایهای را در خمش چهارنقطهای، برای حالت گسترش پایدار ترک (حالتی که گسترش ترک بین دو تکیه گاه داخلی اتفاق بیفتد) و با در نظر گرفتن اثر تنشهای پسماند، محاسبه کردند. همچنین، شبیهسازی المان محدود این فرآیند نیز با در نظر گرفتن مدل المانهای ناحیه چسبنده، برای گسترش ترک، انجام شد. همچنین، در نظر گرفتن اثر تغییر شکل پلاستیک در بستر بر گسترش جدایش نیز از دیگر کارهایی بود که در این مقاله ارائه شد. در مقالههایی که به آنها اشاره شد، از روش المان محدود که روشی بر مبنای محیط پیوسته است، برای شبیهسازی عددی فرآیند ایجاد و گسترش آسیب استفاده شدهاست. از این و در آنها، اثر

¹ Cohesive Zone Model (CZM)

ریزساختارهای مواد و آسیبهای جزئی که در حین فرآیند شکست ایجاد میشوند را نمیتوان مشاهده کرد. بنابراین در این حالت، می توان از روشهایی مانند روش شبکه (که توضیح کاملی از این روش در مرجع [۱۰] آورده شده و برای مثال توسط کروسبی و برادلی [۱۱] در ساختارهای شامل پوشش و بستر مورد استفاده قرار گرفته است) یا روش المان گسسته ۱ استفاده کرد.

در این مقاله، شبیهسازی فرآیند ایجاد و گسترش آسیب در پوششهای ترد با استفاده از روش المان گسسته انجام شده است. کاندال و استراک [۱۲] نخستین بار این روش را برای بررسی رفتار مواد دارای ساختار دانهای^۲ ارائه کردند. در این روش، توده ماده در مقياس ماكرو، از كنار هم قرار گرفتن مجموعهاى از ديسكها و گویهای صلب (در مقیاس میکرو) که با یکدیگر بر هم کنش دارند، توصيف مي شود. در ادامه، مدل هايي براي اتصال ذرات ارائه شد [۱۳] به طوری که رفتار ماکرو، مجموعه ذرات متصل مشابه رفتار یک جامد پیوسته باشد. از اینرو، امکان شبیهسازی پدیدههایی مانند رشد ترک و آسیب در مقیاس میکرو فراهم شد. پژوهشهای بسیاری به استفاده از روش المان گسسته در شبیهسازی ایجاد و گسترش آسیبهای جزئی در ساختارهای مختلف پرداختهاند. ویتل و همکاران[۱۴و۱۵] با در نظر گرفتن المانهای گسسته به عنوان سطح مقطع الیاف، گسترش ترک عرضی در لایه ۹۰ درجه از یک کامپوزیت متعامد متقارن، را شبیهسازی کردند. یانگ و همکاران [۱۷و۱۲] از روش المان گسسته و با استفاده از مدل تماس نرمشونده"، به شبیهسازی گسترش ترک عرضی در یک لایه کامیوزیت ۹۰ درجه و همچنین جدایش بین لایه ای در یک چند لایه کامپوزیتی پرداختند. ختاک و ختاب [۱۸و۱۹] با استفاده از روش المانهای گسسته بهصورت دوبعدى به شبيهسازى رفتار كامپوزيت پليمرى با الياف كربن بافته شده تحت بار کششی و فشاری پرداختند. مدل تماس تیر چسبنده برای اتصال المانهای گسسته توسط آندره و همکاران [۲۰] ارائه شد و توسط ماهئو و همکاران [۲۱] برای شبیهسازی فرآیند گسترش آسیب در یک المان واحد از کامپوزیت الیافی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین لی و همکاران [۲۲] از مدل تیر چسبنده همراه با مدل تماس نرمشونده برای شبیهسازی گسترش ترک عرضی و

جدا شدن الیاف و ماتریس در یک المان واحد و همچنین جدا شدن لایهها از یکدیگر استفاده کردند. علاوه بر مقالات اشاره شده، قاسمی و فلاحتگر [۲۳]از روش المان گسسته برای شبیهسازی ایجاد و گسترش آسیب از ریشه ترکهای کانالی شکل در ساختارهای پوشش/بستر در اثر بار حرارتی پرداختند. همچنین، شبیهسازی گسترش آسیب در این ساختارها، در اثر خمش سهنقطهای با استفاده از مدل تماس نرمشونده در روش المان گسسته از دیگر کارهایی است که توسط نویسندگان انجام گرفته است [۲۴].

در این مقاله، شبیهسازی فرآیند ایجاد و گسترش آسیب در ساختارهای شامل پوشش و بستر، با در نظر گرفتن رفتار ترد الاستیک برای آنها، در اثر خمش سهنقطه و با استفاده از مدل تماس الاستیک-ترد کامل در روش المان گسسته، انجام شد. برای این منظور، حل گر المان گسسته در زبان فرترن توسط نویسندگان نوشته شد و برای اعتبارسنجی، نتایج آن با مشاهدات تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. در مقایسه با روشهای پیوسته، مزیت اصلی روش المان گسسته در شبیهسازی فرآیند شکست در میکروساختار ماده، به دلیل در نظر گرفتن ماهیت گسسته آن است. این ویژگی سبب می شود حالت تکینگی نوک ترک (که در روشهای پیوسته به وجود می آید) ایجاد نشود [۱۶و۲۵]. از طرف دیگر، در کارهای گذشته، با در نظر گرفتن رفتار صرفاً الاستیک و یا الاستیک-پلاستیک برای بستر، حالتیکه به ازای آن امکان گسترش ترک از پوشش به داخل بستر وجود دارد، در نظر گرفته نشده است. اما، در مقاله حاضر، با در نظر گرفتن رفتار ترد الاستیک برای بستر، امکان گسترش آسیب به داخل آن نیز در نظر گرفته شد. از اینرو بررسی پارامتریک، به منظور در نظر گرفتن اثر اختلاف ضرایب الاستیک بین پوشش و بستر و ضخامت پوشش، بر ایجاد و نحوه گسترش آسیب در ساختارهای شامل پوشش و بستر انجام شد.

۲- روش المان گسسته

همان طور که اشاره شد، روش المان گسسته نخستین بار توسط کاندال و استراک [۱۲] برای توصیف رفتار مکانیکی یک ماده دارای خاصیت دانهای ارائه شد. در این روش، توده ماده به وسیله مجموعهای از دیسکها و گویها (ذرات) گسستهسازی می شود. به طوری که حل عددی صریح برای جابجایی تکتک ذرات تشکیل دهنده، رفتار ماده

¹ Discrete Element Method (DEM)

² Granular Material

³ Contact Softening Model



شکل ۲: فلوچارت مراحل انجام محاسبات در روش المان گسسته Fig. 2: The flowchart of DEM calculation procedure

می شود، به دست می آیند. در حالت کلی، حرکت هر ذره در هر بازه زمانی Δt زمانی Δt ، بر اساس معادلات حرکت، به ترتیب برای حرکتهای انتقالی و دورانی، مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می شود. بنابراین اگر برای هر ذره i_i ، I_i و T_i به ترتیب برآیند نیروها و گشتاورهای وارد بر هر المان گسسته (ذره) باشند که دارای جرم m و ممان اینرسی I است، آنگاه جابجایی ذره (u_i) و سرعت زاویه ای (ω_i) برابر است با [75]:

$$\ddot{u}_{i}^{n} = \frac{F_{i}}{m_{i}}$$

$$\dot{u}_{i}^{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}_{i}^{n-\frac{1}{2}} + \ddot{u}_{i}^{n} \Delta t$$

$$u_{i}^{n+1} = u_{i}^{n-1} + \dot{u}_{i}^{n+\frac{1}{2}} \Delta t$$
(1)

$$\dot{\omega}_{i}^{n} = \frac{T_{i}}{I_{i}}$$

$$\omega_{i}^{n+\frac{1}{2}} = \omega_{i}^{n-\frac{1}{2}} + \dot{\omega}_{i}^{n} \Delta t$$

$$\Delta \theta_{i} = \omega_{i}^{n+\frac{1}{2}} \Delta t$$
(Y)

در رابطه (۲)، م*θ* تغییرات جابهجایی دورانی هر ذره است. همچنین میتوان به منظور از بین بردن انرژی جنبشی و بهدست آوردن پاسخ حالت پایدار، میرایی را نیز به این معادلات اضافه کرد.

۲-۲- شبيهسازى رفتار جامد الاستيک

در روش المان گسسته، برای شبیهسازی رفتار توده ماده، ذرات در مقیاس میکرو در کنار یکدیگر قرار گرفته و توده ماده را تشکیل میدهند. سپس بین ذرات مجاور که با هم در تماس هستند پیوند در مقیاس ماکرو را شبیه سازی میکند. در این روش برای توصیف یک جامد پیوسته، اتصال بین ذرات طوری در نظر گرفته می شود که شکست اتصال بین ذرات در اثر بارگذاری بیان گر ایجاد میکروتر کها و آسیب در ساختار ماده است [۲۴].

شکل ۲ فلوچارت مراحل محاسبات در روش المان گسسته را نشان میدهد. شبیه ازی به روش المان گسسته شامل سه مرحله اصلی است. اول، محاسبه نیروهای عکسالعمل بین ذراتی است که با یکدیگر در تماس هستند با استفاده از روابط نیرو-جابجایی برای هر تماس انجام می شود. دوم، محاسبه شتاب ذره در اثر نیروهای اعمال شده با استفاده از معادلات حرکت (معادلات نیوتن و اویلر) و سوم، انتگرال گیری زمانی از معادلات حرکت به صورت صریح و بر مبنای روش تفاصل مرکزی برای محاسبه موقعیت جدید ذره است. این فرآیند بارها و بارها تا زمانی که قید مورد نظر برای توقف محاسبات برقرار شود، ادامه پیدا می کند.

۱-۲- فرمول بندي روش المان گسسته

در روش المان گسسته، فرض می شود که یک ماده جامد می تواند به وسیله مجموعه ای از ذرات صلب (به صورت دیسک در حالت دوبعدی و کره در حالت سه بعدی) توصیف شود که با یکدیگر در تماس هستند. حرکت نسبی بین هر جفت از ذرات باعث به وجود آمدن نیروها و ممان هایی بین آن ها می شود. این نیروها و ممان ها با استفاده از قوانین نیرو – جابه جایی که برای هر تماس در نظر گرفته



شکل ۴: نمودار نیرو-جابهجایی برای تماس پیوندی (الف) در راستای خط تماس (ب) راستای عمود بر خط تماس

Fig. 4: Force-displacement diagram for bonded contact (a) in the direction of the centerline of the particles and (b) perpendicular to the centerline



شکل ۵: آرایش شش ضلعی ذرات

Fig. 5: Hexagonal packing arrangement of particles

ایجاد می شود. رفتار این پیوندها (رابطه نیرو-جابه جایی) به گونهای 🦳 شده و در نتیجه میکروترک در ساختار توده ماده شکل می گیرد [۱۶]. تماس بین ذرات از نوع پیوند در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تماس از نوع پیوندی، تا قبل از شکسته شدن اتصال، فنر عمودی هم در کشش و هم در فشار عمل می کند. اما پس از شکسته شدن اتصال، به منظور جلوگیری از ایجاد همیوشانی بین دو ذره، تنها در حالت فشاری عمل می کند. در رابطه با فنر برشی نیز پس از رسیدن نیروی برشی به مقدار مشخص، بین دو ذره لغزش اتفاق میافتد. در این پژوهش، به منظور شبیهسازی رفتار ماکرو به صورت ترد الاستیک،

تعریف می شود که رفتار مجموعه ذرات با رفتار توده ماده در مقیاس ماکرو یکسان باشد. در واقع، بر خلاف روشهای ماکرو (مانند روش المان محدود) که بر مبنای رابطه بین تنش و کرنش است، در روش المان گسسته خواص پیوندهای بین ذرات تعیین کننده رفتار ماکروی ماده است. همچنین در اثر بارگذاری، هنگامی که نیروی ایجاد شده در پیوند بین ذرات از مقدار مقاومت پیوند بیشتر شود، پیوند شکسته

1 Finite Element Method (FEM)

رابطه نیرو-جابهجایی برای پیوند بین ذرات مطابق نمودارهای ارائه شده در شکل ۴ در نظر گرفته شد.

بر خلاف روشهای پیوسته، پارامترهای ورودی در روش المان گسسته سفتی و مقاومت اتصالها هستند که اصطلاحاً میکروپارامتر نامیده میشوند. این میکروپارامترها باید به گونهای معرفی شوند که رفتار مجموعه ذرات، منطبق بر رفتار توده ماده در مقياس ماكرو باشد. برای این منظور، قبل از شبیهسازی، کالیبره کردن پارامترهای ورودی برای مقایسه رفتار ماکروی ماده شبیهسازی شده با نتایج آزمایشگاهی انجام میشود. اما با استفاده از آرایش ذرات بهصورت منظم ششضلعی (مطابق آنچه در این مقاله فرض شده و در شکل ۵ نشان داده شدهاست) می توان از کالیبره کردن صرفنظر کرد. در این حالت، برای محاسبه سفتی فنرهای عمودی و مماسی، المان واحدی از مجموعه ذرات (۷ ذره در شکل ۵) انتخاب و با یک المان واحد از جسم پیوسته معادلسازی می شود. برای ماده دارای رفتار الاستیک خطی و ایزوتروپیک، در حالت کرنش صفحهای ثابتهای اتصال ذرات (سفتی فنرهای عمودی و برشی) برحسب ثابتهای الاستیک ماده (مدول الاستیک و ضریب یواسون) مطابق رابطه (۳) تعریف می شوند در این رابطه، K_n سفتی فنر عمودی، K_t سفتی فنر [۲۸و۲۷]مماسی (برشی)، E مدول الاستیک ماده و ν ضریب پواسون آن است.

$$K_{n} = \frac{E}{\sqrt{3}(1-\nu)(1-2\nu)}$$

$$K_{t} = \frac{(1-4\nu)E}{\sqrt{3}(1-\nu)(1-2\nu)}$$
(7)

۳-۲- معیار تخریب اتصالها

همانطور که اشاره شد، میکروتر کها و آسیب در روش المان گسسته به واسطه شکسته شدن اتصال بین ذرات ایجاد می شوند. بنابراین تعریف معیاری مناسب برای شکسته شدن اتصال بین ذرات از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله، معیار شکست برای اتصالهای عمودی و مماسی، رسیدن نیروی آنها به بیشترین مقدار ممکن (مقاومت یک اتصال) است که به عنوان یک میکروپارامتر ورودی، باید تابعی از مقاومت نهایی ماده در مقیاس ماکرو باشد.

همان طور که اشاره شد، در اغلب موارد، در ساختارهای ترد آسیب در اثر تنشهای کششی به وجود میآید. در این حالت، گسترش

آسیب هنگامی اتفاق میافتد که تنش در آن نقطه به مقدار مقاومت کششی ماده برسد. برای اتصالهای ذرات در پوشش و بستر، مقادیر مقاومت در اتصالهای عمودی (F_n^{cr}) و مماسی (F_s^{cr}) بر حسب مقاومت در اتصالهای عمودی (r_n^{cr}) و مماسی (F_s^{cr}) بر حسب مقاومت کششی ماده (u_{tt}) مرحسب واحد تنش) مطابق رابطه (۴) مقاومت کششی ماده (این رابطه فقط برای ذرات دارای آرایش شش ضلعی مورد استفاده قرار می گیرد). بنابراین، هنگامی که تنش در پوشش و یا بستر، و یا مماسی در پوشش و این معمودی و یا مورد استفره قرار می گیرد). بنابراین، هنگامی که تنش در پوشش و یا بستر، به مقدار مقاومت کششی خود برسد، نیروهای عمودی و یا ماسی در فنرهای اتصال، برابر با مقادیر بحرانی تعریف شده توسط ماسی در فنرهای اتصال، برابر با مقادیر بحرانی تعریف شده توسط ماسی در فنرهای اتصال، در این مقادیر بحرانی تعریف شده توسط می ماسی در فنرهای اتصال، برابر با مقادیر محانی تعریف شده توسط ماسی در فنرهای اتصال، برابر با مقادیر بحرانی تعریف شده توسط ماسی در فنرهای اتصال، در این مقادیر محانی تعریف شده توسط معاسی در فنرهای اتصال، در این مقادیر محانی تعریف شده توسط ماسی در فنره و تعار در این مقادیر محانی مقدار می مده در این مقادیر محانی مقدار مولی محانی معمودی و یا محاسی در فنرهای اتصال، در این مقادیر محانی تعریف شده توسط ماسی در فنرهای اتصال، در این مقادیر محانی تعریف شده توسط معمودی و یا محاسی در فنرهای اتصال می توانند تحمل کنند [۲۷]. بنابراین، شکست هنگامی اتفاق میافتد که اندازه نیروی تماس، بزرگ تر از محال مقدار مقاومت تعریف شده باشد. در این رابطه، r شعاع ذرات است.

$$F_{n}^{cr} = \frac{r\sigma_{ult}}{2(1-v^{*})} \left(\sqrt{3} - \frac{v^{*}}{\sqrt{3}}\right)$$

$$F_{s}^{cr} = \frac{r\sigma_{ult}}{2(1-v^{*})} (1-3v^{*})$$

$$v^{*} = \frac{v}{1-v}$$
(*)

این معیار برای بیان شکست در اتصالهای ذرات پوشش و بستر مورد استفاده قرار گرفت. اما در فصل مشترک، هم تنشهای عمودی و هم تنشهای برشی در ایجاد و گسترش آسیب نقش دارند. بنابراین صرفاً در نظر گرفتن معیار تنش کششی حداکثر نمیتواند مورد استفاده قرار بگیرد. بنابراین در این مقاله، برای اتصالهای فصل مشترک، هر دو مقاومت کششی و برشی برای اتصالها در نظر گرفته شد.

۳- نتايج و بحث

در ابتدا به منظور بررسی صحت عملکرد حل گر المان گسسته نوشته شده، شبیه سازی نحوه گسترش آسیب در یک ساختار شامل پوشش و بستر که در مقاله [۱] تحت خمش سه نقطه مورد آزمایش قرار گرفت، انجام شد. نمونه های مورد آزمایش، شامل پوشش سرامیکی مقاوم در برابر حرارت بود که بر روی آلیاژ فلزی لایه نشانی شده است. این آزمایش ها برای دو حالت پوشش ضخیم و پوشش نازک انجام شد. خواص مواد و ابعاد نمونه ها در جدول ۱ آورده شده است.

100GPa	مدول الاستيك پوشش
200GPa	مدول الاستيك بستر
200MPa	مقاومت نهایی پوشش
350MPa	مقاومت نهايي فصل مشترك
850MPa	تنش تسليم بستر
15mm	طول نمونه
3mm	عرض نمونه
1/5mm	ضخامت نمونه

جدول ۱: خواص مواد و ابعاد نمونهها [۱]

Table 1: Material properties and dimensions of the model [1]





۶ هندسه مسئله را نشان میدهد. در این شکل، $h_c^{}$ ضخامت پوشش و $b_s^{}$ هندسه مسئله را نشان میدهد. در این شکل، $h_s^{}$ فخامت بستر است. بارگذاری به صورت سرعت ثابت در ذرات سطح بالایی اعمال شد و فرآیند حل تا زمانی که تعداد قابل توجهی از اتصالها شکسته شوند ادامه پیدا کرد.

شکلهای ۷ و ۸ نتایج شبیهسازی حاصل از المان گسسته، نتایج آزمایشگاهی و حل المان محدود را در نحوه گسترش آسیب نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود، به ازای ضخامت حدود μμ ۵۰۰(پوشش ضخیم در شکل ۷)، در نمونه آزمایشگاهی گسترش آسیب در فصل مشترک اتفاق افتاده است که در حل المان گسسته نیز مشاهده میشود. همچنین برای ضخامت حدود μμ

نسبتاً نازک در شکل ۸)، آسیب ایجاد شده تماماً در پوشش اتفاق افتاده است در حالیکه فصل مشترک دچار شکست نشده است. این نتیجه نیز در شبیهسازی حاصل از المان محدود و المان گسسته قابل مشاهده است. علاوه بر مقایسه نتایج کیفی از نحوه گسترش آسیب، نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از حل المان گسسته نیز با نتایج تجربی برای این دو حالت (پوشش ضخیم و پوشش نسبتاً نازک) به ترتیب در شکلهای ۹ و ۱۰ ارائه شده است. در نمودار حاصل از حل المان گسسته، نقطه شروع آسیب مشخص است بهطوریکه از آن نقطه به بعد، به دلیل کاهش سفتی کل ساختار، شیب نمودار کاهش پیدا کرده است. تغییر روند نمودارهای حل تجربی به دلیل تغییر



شكل ٧: مقايسه كيفى از نحوه گسترش آسيب در نمونه با پوشش ضخيم (الف) نتيجه آزمايشگاهى [١]، (ب) حل المان محدود [١] و (ج) حل المان گسسته Fig. 7: Qualitative comparison on damage evolution pattern in the sample with thick coating (a) experimental observation [1], (b) FEM simulation [1] and (c) DEM simulation



شکل ۸: مقایسه کیفی از نحوه گسترش آسیب در نمونه با پوشش نسبتاً نازک (الف) نتیجه آزمایشگاهی]۱[، (ب) حل المان محدود]۱[و (ج) حل المان گسسته

Fig. 8: Qualitative comparison on damage evolution pattern in the sample with relatively thin coating (a) experimental observation [1], (b) FEM simulation [1] and (c) DEM simulation





thick coating



شکل ۱۱: الگوی گسترش ترک در ساختار با α=-۰/۷ در (الف) پوشش نسبتاً نازک و (ب) پوشش ضخیم

Fig. 11: Crack growth pattern in the structure with α =-0.7 in (a) relatively thin coating and (b) thick coating

است. همچنین G مدول برشی و \overline{E} مدول کرنش صفحه ای است و مطابق رابطه (۶) تعریف می شود. از آنجایی که در بسیاری از مقالات، به تأثیر بیشتر پارامتر α نسبت به β اشاره شده است، در این مقاله نیز، اثر اختلاف ضرایب الاستیک به وسیله پارامتر α معرفی می شود. این پارامتر بسته به اختلاف صفتی پوشش و بستر، در محدوده ۱- تا این پارامتر بسته به اختلاف سفتی پوشش و بستر، در محدوده ۱- تا قرار می گیرد. محدوده منفی برای حالتی خواهد بود که سفتی بستر بیشتر از پوشش سفتی بستر این حالتی خواهد بود که سفتی بستر این با قرار می گیرد. محدوده منفی برای حالتی خواهد بود که سفتی بستر بیشتر دارد. همچنین برای پوشش و بستر، ۲۰۰۰ / σ_{ult} بیشتر دارد. همچنین برای پوشش و بستر، در فصل مشترک نیز برابر بیشتر دارد. همچنین برای پوشش و بستر، ۲۰۰۰ / معان می می می معنی برابر با مقدار مقاومت کششی و برشی در فصل مشترک نیز برابر با مقدار مقاومت کششی در پوشش در نظر گرفته شد. همچنین لازم به ذکر است که در نتایجی که ارائه می شوند، به منظور کاهش اثر نظر گرفته شد.

$$\overline{E} = \frac{E}{1 - v^2} \tag{(?)}$$

شش حالت مختلف در این مقاله برای بررسی اثر اختلاف ضرایب شش حالت مختلف در این مقاله برای بررسی اثر اختلاف ضرایب α الاستیک و ضخامت مد نظر قرار گرفت. سه مقدار مختلف از α الاستیک و ضخامت مد نظر قرار گرفت. سه مقدار مختلی ممکن است، در نظر گرفته شد (مقدار مثبت برای سفتی بیشتر پوشش نسبت به بستر، مقدار صفر برای سفتی یکسان و مقدار منفی برای سفتی بیشتر بستر نسبت به بیشتر بستر نسبت به پوشش). همچنین دو مقدار منفاوت از نسبت مخامت ($h_c/e^{-1}/h_s$ که بیانگر تمام حالتهای ممکن به بستر، مقدار صفر برای سفتی یکسان و مقدار منفی برای سفتی مفتی بیشتر پوشش نسبت به بیشتر بستر نسبت به پوشش). همچنین دو مقدار منفاوت از نسبت مخامت ($h_c/e^{-1}/h_s$ که بیانگر پوشش با ضخامت زیاد و h_c/h_s که بیانگر پوشش با ضخامت زیاد و مقدار گرفت. مخامت ($h_c/e^{-1}/h_s$ که بیانگر پوشش با ضخامت زیاد و مقدار منفور که مخامت ($h_c/e^{-1}/h_s$ که بیانگر پوشش می مقدار منفی ($h_c/e^{-1}/h_s$ که بیانگر پوشش مات) مورد مطالعه قرار گرفت. محوه گسترش آسیب در هر یک از این حالتها شبیه سازی شد. مخامت ($h_c/e^{-1}/h_s$ که مخامت که است) مورد مطالعه قرار گرفت. محوه گسترش آسیب در هر یک از این حالتها شبیه ای می مدو مخامت مخامت محمد مخامت در مورد مطالعه قرار گرفت.

شکلهای پلاستیک است که در بستر اتفاق میافتد که البته در حل حاصل از المان گسسته، به دلیل در نظر گرفتن رفتار بستر به صورت الاستیک ایزوتروپیک، این تغییر رفتار مشاهده نمیشود. از آنجایی که در حالت پوشش نسبتاً نازک، ضخامت بستر در ساختار نسبت به حالت پوشش ضخیم، بیشتر است، بنابراین، تأثیر بیشتری در نمودار نیرو-جابجایی ساختار دارد. از اینرو، اختلاف بین حل المان گسسته و روش تجربی در این حالت نسبت به ساختار دارای پوشش ضخیم، بیشتر است.

پس از مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی المان گسسته با نتایج عددی و آزمایشگاهی از نمونه های موجود، حال به بررسی پارامتریک اثر اختلاف ضرایب الاستیک بین پوشش و بستر و ضخامت پوشش مر نحوه گسترش آسیب در این ساختارها پرداخته می شود. در این مقاله، رفتار پوشش و بستر به صورت ترد الاستیک ایزوتروپیک و خواص فصل مشترک نیز به صورت میانگین هندسی از خواص پوشش و بستر در نظر گرفته شد. به منظور بررسی اثر اختلاف ضرایب الاستیک بین پوشش و بستر در نحوه گسترش آسیب در ساختار، از پارامترهای داندور ^۱ استفاده می شود. این پارامترها نشان می دهند که مواد، می توان به جای سه پارامتر، از دو پارامتر استفاده کرد [۲۹]. این پارامترها مطابق رابطه (۵) برای حالت کرنش صفحه ای تعریف می شوند.

$$\alpha = \frac{\overline{E}_c - \overline{E}_s}{\overline{E}_c + \overline{E}_s}$$

$$\beta = \frac{G_c (1 - 2\nu_s) - G_s (1 - 2\nu_c)}{2G_c (1 - \nu_s) + 2G_s (1 - \nu_c)} \tag{(a)}$$

در این رابطه، زیرنویس c بیانگر پوشش و زیرنویس s بیانگر بستر

¹ Dundurs' Parameters



شکل ۱۲: نمودار نیروی نرمال شده بر حسب جابه جایی عمودی برای ۲/۰–۵ در دو ضخامت مختلف Fig. 12: Normalized force-vertical displacement curve for α=-0.7 in two different coating thicknesses





Fig. 13: Crack growth pattern in the structure with α=0in (a) relatively thin coating and (b) thick coating







شکل ۱۴: الگوی گسترش ترک در ساختار با α=۰/۲ در (الف) پوشش نسبتاً نازک و (ب) پوشش ضخیم

Fig. 14: Crack growth pattern in the structure with α=0.2 in (a) relatively thin coating and (b) thick coating

بستر است که البته در حالتی که ضخامت پوشش کم باشد، تأثیر گذار نیست. در واقع، در این ساختارها، پس از رسیدن تر کهای پوشش به محدوده فصل مشترک، گسترش آنها در دو حالت امکان پذیر است. این دو حالت به واسطه تنشهایی است که در ساختار در اثر

در شکل مشخص است، در ضخامتهای کم پوشش، گسترش آسیب به داخل بستر و برای ضخامتهای زیاد پوشش، گسترش آسیب به موازات فصل مشترک و یا داخل آن اتفاق میافتد. علت این اتفاق، ضعیفتر بودن خواص اتصال در پوشش و فصل مشترک نسبت به شکل ۱۴ نیز نحوه گسترش آسیب را به ازای α=۰/۲ نشان میدهد. در این حالت، سفتی پوشش بیشتر از بستر است و مطابق فرض این مقاله، سفتی اتصالها در فصل مشترک نیز بزرگتر از بستر خواهد بود. بنابراین همانطور که مشاهده میشود، بدون وابستگی به ضخامت پوشش، گسترش آسیب به داخل بستر اتفاق میافتد.

۴–نتیجهگیری

شبیه سازی گسترش آسیب در ساختارهای شامل پوشش و بستر با در نظر گرفتن رفتار ترد الاستیک برای هر یک از اجزای تشکیل دهنده، با استفاده از روش المان گسسته، انجام شد. برای این منظور، تأثیر پارامترهای اختلاف ضرایب الاستیک بین پوشش و بستر و ضخامت پوشش در نحوه گسترش آسیب مورد بررسی قرار گرفت. بارگذاری نیز به صورت خمش سهنقطه به مجموعه اعمال شد. نتایج نشان داد که برای ساختارهایی که سفتی و مقاومت نهایی پوشش نمان داد که برای ساختارهایی که سفتی و مقاومت نهایی پوشش اسیب در فصل مشترک و یا به موازات آن، در پوشش اتفاق می افتد. اما برای پوشش های نازک، گسترش آسیب به داخل بستر نفوذ می کند. اما برای حالتی که سفتی و در نتیجه مقاومت نهایی پوشش، برابر و یا بزرگ تر از بستر باشد، بدون توجه به ضخامت پوشش، گسترش آسیب

مراجع

- [1] X. Li, L. Liang, J. Xie, L. Chen, Y. Wei, Thicknessdependent fracture characteristics of ceramic coatings bonded on the alloy substrates, Surface and Coatings Technology, 258 (2014) 1039-1047.
- [2] A. Strawbridge, H. E. Evans, Mechanical failure of thin brittle coatings, Engineering Failure Analysis, 2(2) (1995) 85-103.
- [3] A. Evans, G. Crumley, R. Demaray, On the mechanical behavior of brittle coatings and layers, Oxidation of Metals, 20(5-6) (1983) 193-216.
- [4] A. M. Tobi, P. Shipway, S. Leen, Finite element modelling of brittle fracture of thick coatings under normal and tangential loading, Tribology International, 58 (2013) 29-39.
- [5] P. Bansal, P. Shipway, S. Leen, Finite element

خمش سهنقطه بهوجود میآید. در اثر خمش تیر شامل یوشش و بستر (در حالتیکه ترک عرضی به فصل مشترک رسیده باشد)، تنشهای کششی در بستر و تنشهای برشی ناشی از خمش تیر در فصل مشترک بهوجود میآید. حال اگر تنشهای کششی در بستر به مقدار مقاومت کششی آن برسد، ترک در بستر گسترش پیدا میکند. اما گسترش ترک در فصل مشترک به صورت مود ترکیبی اتفاق میافتد (تنشهای کششی ناشی از خمش که در فصل مشترک نیز وجود دارد همراه با تنشهای برشی) که البته اثر مود برشی در آن بیشتر است. حال با توجه به این که ضخامت کل ساختار ثابت است، در حالتی که ضخامت پوشش کم باشد، (به دلیل نزدیکی فصل مشترک به لبه تیر) تنشهای برشی در فصل مشترک کمتر از حالتی خواهد بود که ضخامت پوشش زیاد باشد. بنابراین مشاهده می شود که در ساختار با ضخامت پوشش کم، گسترش ترک در بستر و در حالت با ضخامت بیشتر، گسترش ترک در فصل مشترک (و یا به موازات فصل مشترک و در پوشش) اتفاق افتاده است. بنابراین می توان گفت، در حالتی که سفتی و متعاقب آن مقاومت نهایی بستر (با توجه به فرض در نظر گرفته شده در این مقاله) بیشتر از پوشش باشد، به ازای ضخامتهای پوشش بزرگتر از یک مقدار معین، گسترش آسیب در فصل مشترک یا به موازات آن در پوشش اتفاق می افتد و به ازای ضخامتهای کمتر از آن، گسترش آسیب به داخل بستر است.

شکل ۱۲ نمودار بار اعمال شده را بر حسب جابجایی برای این دو حالت نشان می دهد به طوری که هر یک از مقادیر نیروها و جابجایی ها بر حسب ضخامت پوشش h_c طول نمونه L و مقاومت کششی پوشش σ_{uu} ، نرمال شدهاند. همان طور که در شکل مشخص است، با توجه به در نظر گرفتن رفتار ترد الاستیک برای هر یک از اجزاء تشکیل دهنده، کل ساختار تا مقدار مشخصی بار تحمل می کند و پس از آن، افت ناگهانی در مقدار بار تحمل شده پدید می آید. همچنین از آنجایی که در ضخامتهای پایین اثر بستر غالب است، بنابراین در ضخامت پایین مقدار جابجایی عمودی نیز بیشتر است.

شکل ۱۳ نحوه گسترش آسیب را به ازای ۰=α در دو ضخامت مختلف نشان میدهد. این مقدار α بیان گر این است که سفتی پوشش و بستر کاملاً یکسان است (در این مقاله میتوان گفت که هر دو از یک جنس هستند) و مطابق انتظار، گسترش آسیب در فصل مشترک اتفاق نمی افتد (در واقع فصل مشترک وجود ندارد). transverse cracking during the pyrolysis of carbon fibre reinforced plastics to carbon/carbon composites, Computational Materials Science, 28(1) (2003) 1-15.

- [16] Y. Sheng, D. Yang, Y. Tan, J. Ye, Microstructure effects on transverse cracking in composite laminae by DEM, Composites Science and Technology, 70(14) (2010) 2093-2101.
- [17] D. Yang, J. Ye, Y. Tan, Y. Sheng, Modeling progressive delamination of laminated composites by discrete element method, Computational Materials Science, 50(3) (2011) 858-864.
- [18] A. Khattab, M. J. Khattak, I. M. Fadhil, Micromechanical discrete element modeling of fiber reinforced polymer composites, Polymer Composites, 32(10) (2011) 1532-1540.
- [19] M. J. Khattak, A. Khattab, Modeling tensile response of fiber-reinforced polymer composites using discrete element method, Polymer Composites, 34(6) (2013) 877-886.
- [20] D. André, I. Iordanoff, J.-I. Charles, J. Néauport, Discrete element method to simulate continuous material by using the cohesive beam model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 213–216 (2012) 113-125.
- [21] L. Maheo, F. Dau, D. André, J. L. Charles, I. Iordanoff, A promising way to model cracks in composite using Discrete Element Method, Composites Part B: Engineering, 71 (2015) 193-202.
- [22] B. D. Le, F. Dau, J. L. Charles, I. Iordanoff, Modeling damages and cracks growth in composite with a 3D discrete element method, Composites Part B: Engineering, 91 (2016) 615-630.
- [23] M. A. Ghasemi, S. R. Falahatgar, Damage initiation and propagation simulation of coatings in coating/ substrate structures under thermal loading using discrete element method, Modares Mechanical Engineering, 18(2018) 163-172 (in Persian).
- [24] M. A. Ghasemi, S. R. Falahatgar, Damage evolution in brittle coating/substrate structures under three-point bending using discrete element method, Surface and

modelling of the fracture behaviour of brittle coatings, Surface and Coatings Technology, 200(18-19) (2006) 5318-5327.

- [6] I. Hofinger, M. Oechsner, H.-A. Bahr, M. V. Swain, Modified four-point bending specimen for determining the interface fracture energy for thin, brittle layers, International Journal of Fracture, 92(3) (1998) 213-220.
- [7] M. V. Babu, R. K. Kumar, O. Prabhakar, N. G. Shankar, Fracture mechanics approaches to coating strength evaluation, Engineering Fracture Mechanics, 55(2) (1996) 235-248.
- [8] H. Liu, L. Liang, Y. Wang, Y. Wei, Fracture Characteristics and Damage Evolution of Coating Systems Under Four-Point Bending, International Journal of Applied Ceramic Technology, 13(6) (2016) 1043-1052.
- [9] P. Forschelen, A. Suiker, O. van der Sluis, Effect of residual stress on the delamination response of filmsubstrate systems under bending, International Journal of Solids and Structures, 97 (2016) 284-299.
- [10] M. Ostoja-Starzewski, Lattice models in micromechanics, Applied Mechanics Reviews, 55(1) (2002) 35-60.
- [11] K. M. Crosby, R. M. Bradley, Simulations of tensile fracture in thin films bonded to solid substrates, Philosophical Magazine B, 76(1) (1997) 91-105.
- [12] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, 29(1) (1979) 47-65.
- [13] D. O. Potyondy, P. A. Cundall, A bonded-particle model for rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(8) (2004) 1329-1364.
- [14] F. K. Wittel, F. Kun, B.-H. Kröplin, H. J. Herrmann, A study of transverse ply cracking using a discrete element method, Computational Materials Science, 28(3–4) (2003) 608-619.
- [15] F. K. Wittel, J. Schulte-Fischedick, F. Kun, B.-H. Kröplin, M. Frieß, Discrete element simulation of

for modelling solid and particulate materials, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 70(4) (2007) 379-404.

- [28] Y. Feng, B. Danh Le, G. Koval, C. Chazallon, Discrete element approach in brittle fracture mechanics, Engineering Computations, 30(2) (2013) 263-276.
- [29] H. Mei, Y. Pang, R. Huang, Influence of interfacial delamination on channel cracking of elastic thin films, International Journal of Fracture, 148(4) (2008) 331.

Coatings Technology, 358(2019) 567-576.

- [25] D. Yang, Y. Sheng, J. Ye, Y. Tan, Dynamic simulation of crack initiation and propagation in cross-ply laminates by DEM, Composites Science and Technology, 71(11) (2011) 1410-1418.
- [26] J. Rojek, E. Oñate, Multiscale analysis using a coupled discrete/finite element model, Interaction and Multiscale Mechanics, 1(1) (2007) 1-31.
- [27] F. A. Tavarez, M. E. Plesha, Discrete element method

بی موجعه محمد ا