

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Абусдель А.М., Ильинков А.В., Ильинкова Т.А.
(КГТУ им. А.Н.Туполева, г. Казань, Россия)

The model can be used to assess the effects of numerous material, process, or geometric variables on the stress behavior within a TBC. Two principal variables originally studied and characterized during model were bond-coat thermal expansion, and interfacial roughness. The outputs of the model include stresses as functions of location and direction. The model has been applied to simulate the effect of using different types of bond coat with different coefficient of thermal expansion, optimum top coat thickness and surface roughness of a typical side TBC composed of 0.1-mm-thick NiCrAlY bond coat and a 0.25-0.5 mm-thick top coat comprised of a mixture of zirconia with 8 weight percent yttria.

В процессе развития авиадвигателестроения постоянно ужесточаются требования к материалам. Рабочие и сопловые лопатки турбины ГТД являются наиболее нагруженными деталями двигателя. Они эксплуатируются в условиях высоких температур, усталости, ползучести, в агрессивной среде продуктов сгорания топлива, в условиях. Поэтому требования к материалам лопаток чрезвычайно высоки.

В настоящее время лопатки турбины изготавливают из жаропрочных и жаростойких сплавов на никелевой основе. Кроме того, их изготавливают с воздушным охлаждением и защитой поверхности с помощью напыления керамического слоя на основе ZrO_2 , имеющего низкую теплопроводность, что позволяет снизить температуру поверхности лопатки примерно на $170^\circ C$.

Для улучшения адгезии керамического слоя на поверхность лопатки наносят подслоя из сложного легированного никелевого сплава, который по своим характеристикам должен быть близким к сплаву основы. Таким образом, имеем сложную композиционную систему, состоящую из трех и более элементов, на которую воздействуют механические и термические нагрузки.

Для обеспечения работоспособности данной системы в течение длительного времени необходим правильный выбор состава каждого элемента и его толщины.

Как известно, при работе лопаток наибольшее значение имеют растягивающие напряжения. Кроме того, такие напряжения являются наиболее опасными для хрупкой керамики. Поэтому определение состава каждого элемента и его толщины было проведено в расчете именно на растягивающие напряжения. Для моделирования такого напряженно-деформированного состояния используется четырехточечный изгиб. Его схема приведена на рис. 1.

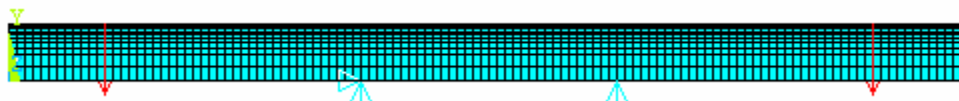


Рис. 1. Для определения величин напряжений и деформаций композиционной системы применялся метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в прикладном пакете ANSYS

Осуществление данной задачи требует знание зависимостей от температуры таких характеристик основы, подслоя и внешнего керамического слоя, как коэффициент тер-

мического расширения, коэффициент теплопроводности λ , модуль нормальной упругости (Юнга) E , коэффициент Пуассона ν ?.

Задача решалась в двумерной постановке. Рассматривался образец, состоящий из основного сплава ЖС30 толщиной 3 мм, подслоя с тремя вариантами составов (NiPt50Al+Hf, Ni7Cr13AlY, Ni20Cr19AlY) толщиной до 0,1 мм и керамического покрытия на основе ZrO_2 , стабилизированного 8% Y_2O_3 (8YSZ) толщиной до 0,5 мм.

На образец наносилась сетка, состоящая из плоских четырехузловых конечных элементов с двумя степенями свободы в каждом узле. Граничные условия представляли собой закрепления в двух точках и приложение нагрузки в двух других точках.

В результате проведения серии расчетов установлено напряженно-деформированное состояние системы для различных нагрузок, учитывающих термические напряжения и напряжения от газовых и центробежных сил. Это позволило определить оптимальное соотношение характеристик α , E , ν многослойной системы и соотношение толщин, составляющих ее элементов.

В результате проведения серии расчетов установлено напряженно-деформированное состояние системы для различных нагрузок, учитывающих термические напряжения и напряжения от газовых и центробежных сил. Это позволило определить оптимальное соотношение характеристик α , E , ν многослойной системы и соотношение толщин, составляющих ее элементов.

На рис. 2 показаны геометрические и теплофизические параметры системы «покрытие-основа», использованные при решении задачи теплопроводности. Температура газов – продуктов сгорания топлива, воздействующих на лопатку 1 ступени турбины, оценивалась применительно к ГТД наземной энергетической установки как 1400 К. Температура охлаждающего воздуха, проходящего по внутренним каналам лопатки, принималась равной 610 К. Значения теплофизических характеристик жаростойких и жаропрочных сплавов на основании [1], которых приведены в таблице 1.

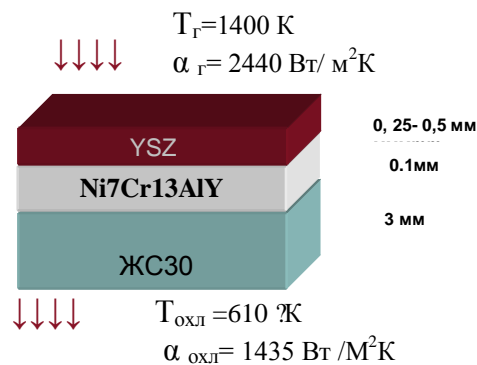


Рис. 2. Геометрические и теплофизические параметры системы «покрытие-основа»

Результаты расчета приведены на рис.3. Как видно из рисунка, температура на поверхности керамического слоя с увеличением толщины слоя от 250 мкм до 500 мкм повышается от 1168 К до 1200 К. В то же время на поверхности подслоя в зависимости от его состава температура снижается с 1030 К до 990-960 К с увеличением толщины керамики. В результате разница в температурах на поверхностях обоих слоев системы достигает 138-240 К в зависимости от толщины керамического слоя.

Таблица 1. Свойства материалов

ЖС 30 [5]						
	200С	600С	800С	900С	1000С	
Е (Па)		$1,7 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	
?	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
$\alpha 10^6$ (1/К)	12,3	14,01	15,8	16,3	21,1	
λ (Вт/мК)	(11)	17,5	20,2	22	23,8	
Ni7Cr13AlY [1-4]						
	200С	600С	800С	900С	1000С	
Е (Па)		$1,6 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$0,95 \cdot 10^{11}$	-	
?	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
$\alpha 10^6$ (1/К)	14,1	15,9	17,0	17,7	18,6	
λ (Вт/мК)	-	-	-	13	-	
NiPt50Al+Hf [1-4]						
	200С	600С	800С	900С	1000С	
Е (Па)	-	-	-	$1,45 \cdot 10^{11}$	-	
?	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
$\alpha 10^6$ (1/К)	13,6	14,6	14,9	15,1	15,5	
λ (Вт/мК)	-	-	-	80	-	
Ni20Cr19Al Y [1-4]						
	200С	600С	800С	900С	1000С	
Е (Па)		$1,6 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$0,95 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{11}$	
?	0,3					
$\alpha 10^6$ (1/К)	13,3	14,6	15,7	16,3	18,9	
λ (Вт/мК)					13	
8YSZ [1-4]						
	200С	600С	800С	900С	1000С	1100 С
Е (Па)	-	$3,5 \cdot 10^{10}$	$2,8 \cdot 10^{10}$	$2,6 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^{10}$
?	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,25
$\alpha 10^6$ (1/К)	11	11,0	-	-	-	12,2
λ (Вт/мК)	-	1,1	-	-	-	-

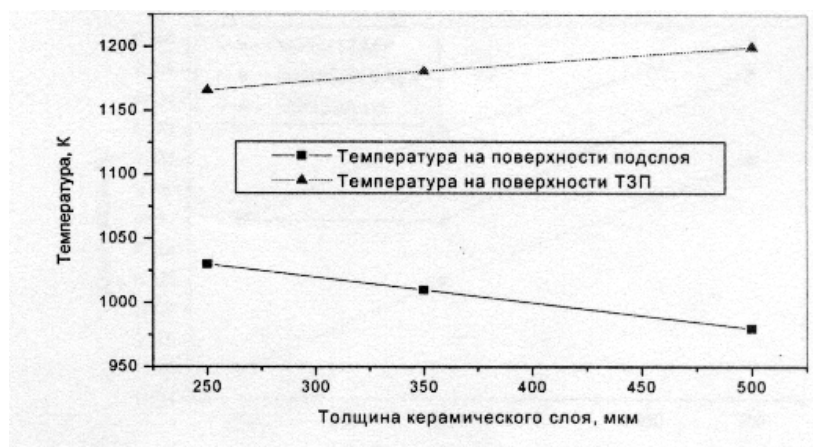
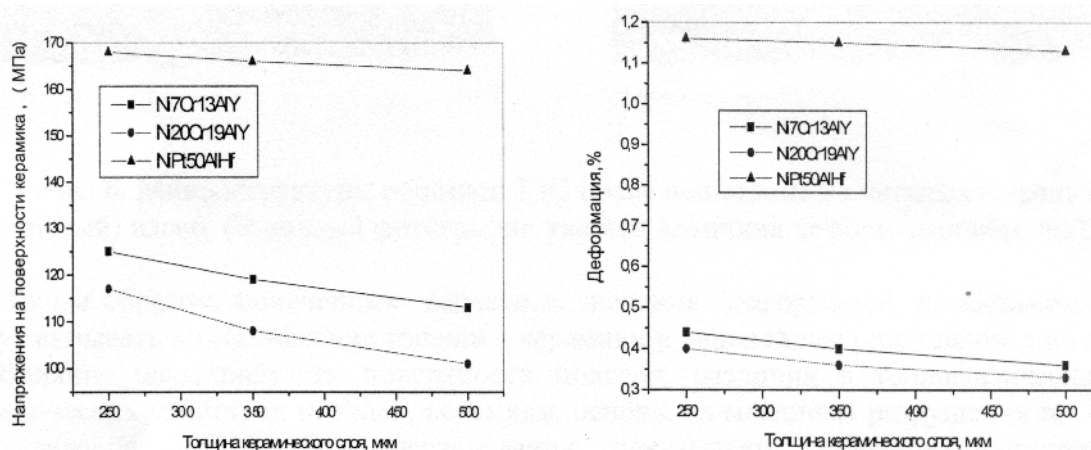


Рис. 3. Распределение температуры на поверхности керамического слоя (ТЗП) и подслоя.

Деформации, возникающие в системе в результате воздействия тепловых напряжений, в зависимости от толщины керамического слоя изменяются незначительно для всех исследованных сплавов (рис.4.). Однако достаточно высокие деформации (приблизительно 1,15%) возникают в сплаве NiPt50Al+Hf. С увеличением толщины керамики они лишь незначительно снижаются. В сплавах типа NiCrAlY деформации существенно ниже (0,45% и менее). С увеличением толщины керамики они снижаются также незначительно. Таким образом, установлено, что более предпочтительным сплавом-подслоем для ЖС30 может служить сплавы типа NiCrAlY, КТР которых несколько выше, чем у сплава NiPt50Al+Hf.



а)

б)

Рис. 4. Напряжения (а) и деформации (б) и возникающие в системе «покрытие-основа», в зависимости от типа подслоя и толщины керамики под воздействием тепловых напряжений при высокой температуре

Остаточные напряжения, возникающие в системе после напыления, в зависимости от типа применяемых материалов и их толщин могут вызывать различные деформации.

При механическом нагружении таких систем по схеме четырехточечного изгиба деформации с увеличением толщины керамики растут (рис. 5).

Однако предельные значения не превышают размера 0,136%.

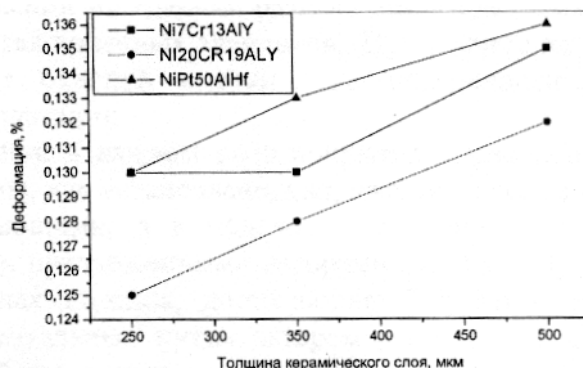


Рис. 5. Деформации, возникающие в системе «покрытие-основа» после напыления, в зависимости от типа подслоя и толщины керамики

Величина расчетных деформаций, хорошо согласуются с результатами металлографических исследований образцов, проведенных авторами работы [6] после испытаний на чистый изгиб (рис. 6).

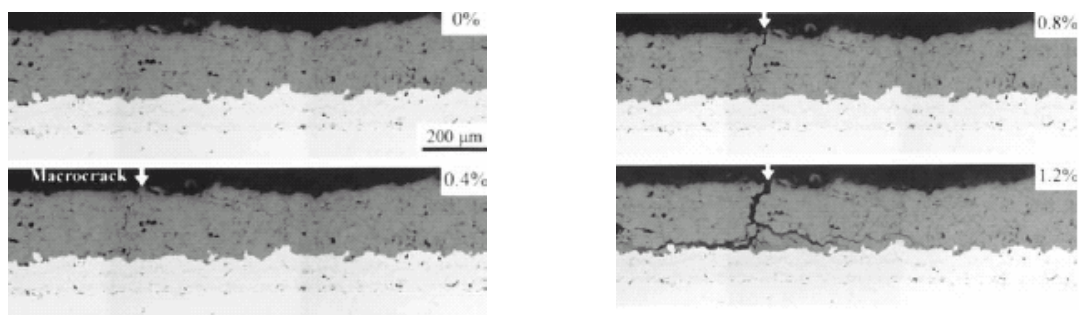


Рис. 6. Микроструктуры образцов ТЗП после испытания на четырехточечный (чистый) изгиб (В каждой фотографии указана величина деформации образца)

Таким образом, полученные расчетные значения деформаций, по-видимому, не будут вызывать возникновение трещин в керамики и дальнейшее разрушение системы.

Влияние шероховатости поверхности подслоя, различия в теплофизических и механических свойствах подслоя, керамики, основы на механизм разрушения изучали ряд авторов [7-13]. Эти исследования показывают значение напряжений, действующих по нормали к поверхности покрытия при рабочих температурах.

При высоких температурах материалы подслоя и основы стремятся расширяться, поскольку имеют высокий КТР. Однако наличие керамического слоя с низким КТР, не позволяет это сделать. Таким образом, в подслое возникают сжимающие напряжения, а в керамике - растягивающие. Уровень этих напряжений зависит от параметров шероховатости. Поэтому авторами был произведен расчет влияния параметров шероховатости на распределение напряжений в системе.

Для оценки уровня напряжений в керамике и подслое были выбраны следующие параметры шероховатости: длина волны L - 50,100,150 мкм, амплитуда волны H - 5,10,15,20 мкм. Параметры шероховатости поверхности основы: L - 152 мкм, H - 6 мкм.

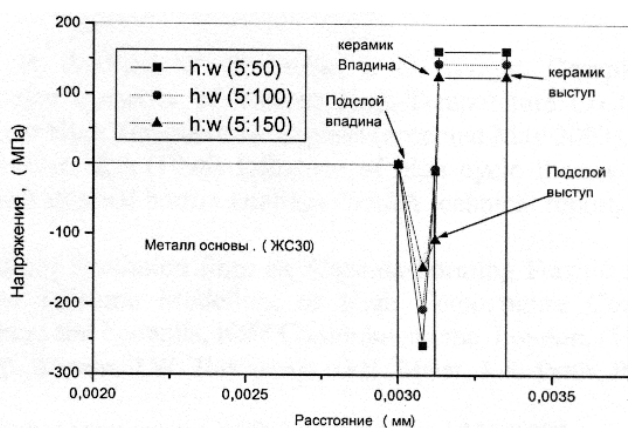


Рис. 7. Зависимость напряжений от расстояния от поверхности основы

Данные значения параметров были измерены на профилографе-профилометре для плазменных покрытий. Толщина керамического слоя была выбрана в 250 мкм. Толщина подслоя Ni20Cr19ALY определена в 100 мкм.

Для расчета напряжений на границе раздела «подслой-керамика» использовалась плоская треугольная сетка конечных элементов. При расчете не учитывались влияние ползучести и наличие окисной пленки на поверхности подслоя, неизбежно возникающей при эксплуатации.

Значения напряжений в каж-

дом слое покрытия приведены в таблице 2.

Таблица 2. Величины напряжений в керамике и подслое в зависимости от параметров шероховатости подслоя

h : w	Напряжения керамика выступ, МПа	Напряжения керамика впадина, МПа	Напряжения подслоя выступ, МПа	Напряжения подслоя впадина, МПа
5:50	161	161	-10	-258
5:100	143	143	-7	-206
5:150	124	124	-108	-147
10:50	184	58	-5,4	-258
10:100	150	150	-25	-258
10:150	134	90	0	-222
15:50	169	46	46	-260
15:100	162	105	-85	-236
15:150	150	100	-49	-100
20:50	137	137	33	-225
20:100	163	60	74	-200
20:150	156	102	-8	-224

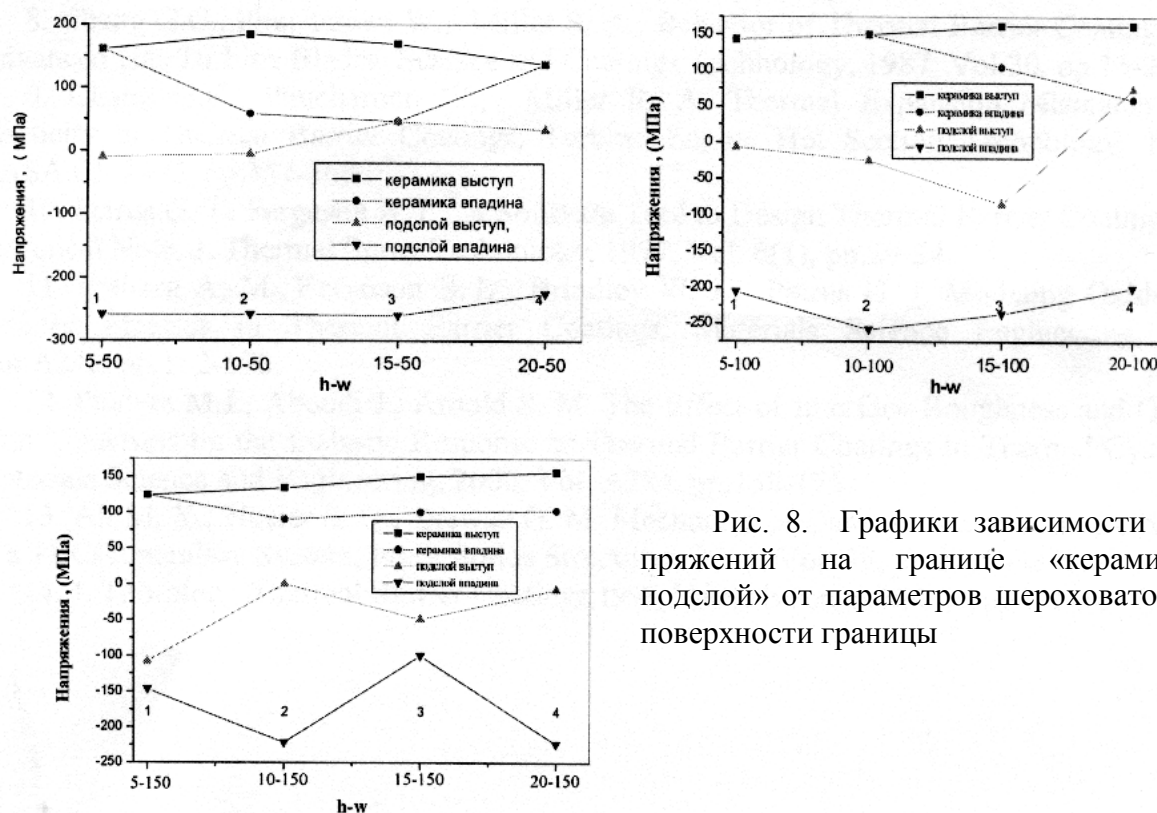


Рис. 8. Графики зависимости напряжений на границе «керамика-подслой» от параметров шероховатости поверхности границы

Для данной толщины подслоя, как установлено, напряжения в керамике в направлении оси Y являются растягивающими, а в подслое – сжимающими (рис.7), что хорошо согласуется с моделями, предложенными авторами работ [7-13]. Уровень сжимаю-

щих напряжений во впадинах подслоя, достигающие 258 МПа, можно сопоставить с полученным экспериментальным путем автором работы [14]. Однако учет скорости релаксации напряжений при ползучести и кинетики роста оксидной пленки, имеющей характеристики значительно отличающиеся от подслоя и керамики, изменит указанные значения напряжений.

По результатам расчета построены графики зависимости напряжений на границе «подслой-керамика» от параметров шероховатости (рис. 8). Из графиков видно, что на выступах формируется более высокий уровень напряжений, который изменяется в зависимости от параметров шероховатости. Наименьший уровень напряжений создается при длине волны L - 50 мкм и амплитуде волны H - 10-15 мкм.

Выводы: Таким образом, проведенные расчеты позволяют сделать обоснованный выбор материала для подслоя теплозащитного покрытия, оптимизировать условия напыления покрытий и подготовку поверхности под напыление.

Список литературы: 1. J. A. Haynes, B. A. Pint, W. D. Porter, I. G. Wright. Comparison of Thermal Expansion and Oxidation Behavior of Various High-Temperature Coating Materials and Superalloys, *Materials at High Temperature*, in press (accepted May 2003). 2. Zhu, D. and Miller, R.A.(1998) Influence of high cycle thermal loads on thermal fatigue behavior of thick thermal barrier coatings. NASA technical report, 3 – 10, NASA TP – 3676. 3. Prediction of Oxide Spallation from an Alumina-Forming Ferritic Steel', H.E. Evans and J.R. Nicholls, in *Lifetime Modelling of High Temperature Corrosion Processes*, Eds.Schutze, Quadackers and Nicholls, IOM Communications, London, (1999) pp 37-49. 4. A.G. Evans, D.R. Mumm, J.W. Hutchinson, G.H. Meier, F.S. Pettit, *Prog. Mater. Sci.* 46 (2001) 505. 5. В сб. *Авиационные материалы, избранные труды 1932-2002 г*, под ред Е.Н.Коблова, М.: МИСИС, ВИАМ, 2002, 422 с. 6. S.Takahashi, M.Yoshiba, Y. Harada Microstructural features of mechanical failure in thermal barrier coating systems under static Loadings., *Materials at high temperatures*, Vol. 18(2), 2001, pp. 125–130. 7. Evans A. G., Crumley G. B., Demaray R. R. On the Mechanical Behavior of Brittle Coatings and Layers, *Oxidation of Metals*, 1983, Vol. 20(5/6), pp.193-216. 8. Chang G.C., Phucharoen W., Miller R. A., Behavior of Thermal Barrier Coatings for Advanced Gas Turbine Blades, *Surface and Coatings Technology*, 1987, Vol.30, pp.13-28. 9. Chang G.C., Phucharoen W., Miller R. A. Thermal Expansion Mismatch and Plasticity in Thermal Barrier Coatings, *Turbine Engine Hot Section Technology*, 1987, NASA CP 2493, pp.357-368. 10. Petrus G. J., Ferguson B. L., A Software Tool to Design Thermal Barrier Coatings: A Technical Note, *J. Thermal Spray Technology*, 1997, Vol. 6(1), pp.29-34. 11. Freborg A. M., Ferguson B. L., Brindley W. J., Petrus G. J. Modeling Oxidation Induced Stresses in Thermal Barrier Coatings, *Materials Science Engineering*, 1998, Vol.A245, pp.182-190. 12. Pindera M.J., Aboudi J., Arnold S. M. The Effect of Interface Roughness and Oxide Film Thickness on the Inelastic Response of Thermal Barrier Coatings to Thermal Cycling, *Materials Science and Engineering*, 2000, Vol. A284, pp.158-175. 13. Ali M. Y., Nusier S. Q., Newaz G. M. Mechanics of Damage Initiation and Growth in a TBC/Superalloy System, *Int. J. Solids Structures*, 2001, Vol. 38, pp.3329-3340. 14. J. Thornton Thermal Barrier Coatings, 1998, *Materials Forum*, Vol. 22, pp.159 -181.

Сдано в редакцию 04.04.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Михайлов А.Н.