

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ НА МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКРАНОВ ПРОТИВОМЕТЕОРНОЙ ЗАЩИТЫ

Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Девойно О.Г., Оковитый В.В.,  
Асташинский В.М.

(БНТУ, г. Минск, Беларусь)

Тел./Факс: (017)293-92-23; E-mail: [scvdmed@bntu.by](mailto:scvdmed@bntu.by)

**Abstract:** *The main cause of destruction plasma coatings are thermomechanical stresses arising from mismatch thermal expansion a ceramic and a base metal layers and uneven distribution the temperature field in the coating. As part of the optimization of the parameters of air plasma spraying process for the material  $ZrO_2$ . Optimization of the parameters on the basis of the deposition was carried out to maximize the utilization rate of the material.*

**Key words:** *Ceramic coating, plasma spraying, utilization rate of the material, optimization of the parameters.*

К антиметиоритным покрытиям предъявляются очень жесткие требования, покрытия должны [1-3]:

- характеризоваться плавным изменением физико-механических свойств (пористости, микротвердости, модулей упругости) в сечении от металлической основы к внешнему керамическому слою;

- выдерживать многократные циклы теплосмен;

- сохранять газонепроницаемость в условиях эксплуатации и обеспечивать при этом достаточно высокий уровень эрозионной прочности.

В общем случае антиметиоритные покрытия представляет собой многослойную систему, включающую металлический подслои и внешний керамический слой. Термомеханические напряжения усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое [4].

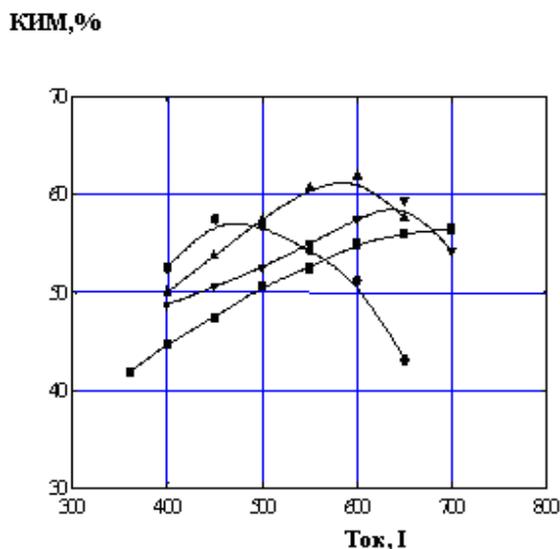
В качестве материалов для керамического слоя антиметиоритных покрытий часто применяют композиции на основе частичного стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦД) [5]. Это обусловлено рядом его свойств: сравнительно высоким коэффициентом линейного термического расширения и возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики, в частности ударной вязкости.

В силу простоты аппаратного оформления, а также высокой эффективности в настоящее время для нанесения керамического слоя на основе частичного стабилизированного диоксида циркония в основном используется метод плазменного напыления в воздушной среде [1-5].

Оптимизация проводилась по методике, описанной в источниках [5]. На первом этапе проводилась оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования материала. Вначале КИМ определяли при различных значениях тока (400 А; 500 А; 600 А; 700 А) и расходах плазмообразующего газа  $R_{N_2}$  (40; 45; 50; 55) л/мин, но с постоянной дистанцией напыления  $L=120$  мм (рис. 1). На следующем этапе оптимальные значения дистанции напыления определялись с постоянными значениями тока и величины расхода плазмообразующего газа ( $I=600$  А;  $R_{N_2}=50$  л/мин) (рис. 2) и наконец для оптимальной дистанции напыления и постоянном значении  $R_{N_2}$  изменялся ток ( $L=110$  мм,  $R_{N_2}=50$  л/мин) (рис. 3). Покрытия напылялись с и без охлаждения порошком фракционного состава  $< 50$  мкм. Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 1) до определенных значений приводят к увеличению КИМ, т.к. эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1-4]. Дальнейшее их увеличение

приводит к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно КИМ уменьшается. При увеличении расхода  $N_2$  происходит уменьшение значений тока для максимального КИМ. Для  $R_{N_2}=55$  л/мин максимальный КИМ=56% соответствует  $I=450$  А, для  $R_{N_2}=50$  л/мин максимальный КИМ=62% соответствует  $I=600$  А, для  $R_{N_2}=45$  л/мин максимальный КИМ=57% соответствует  $I=650$  А. Похожая тенденция сохраняется и при изменении дистанции напыления (рис. 2) при оптимизации значения расхода  $N_2$  и тока (в нашем случае  $R_{N_2}=50$  л/мин,  $I=600$  А). При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой  $<t_{пл}$ . В нашем случае возрастание КИМ идет до  $L=110$  мм, дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИМ падает [5].

Влияние скорости подачи порошка на КИМ показано на рис. 4. Так как в формировании покрытия принимают участие все частицы в плазменной струе, то наилучшими свойствами будут обладать покрытия, отвечающие плазменным режимам, где доля расплавленных частиц в струе и их концентрация максимальны. Для определенных выше оптимальных режимов максимальный КИМ соответствует расходу порошка 2 кг/ч, при дальнейшем увеличении расхода КИМ уменьшается, поскольку тепловой энергии плазменной струи не хватает для расплавления всех подаваемых в струю частиц. С увеличением степени охлаждения при одинаковых скоростях подачи порошка КИМ уменьшается [1-5]. При увеличении толщины керамического слоя его долговечность определяется двумя противоположными факторами: 1) с ростом толщины керамического слоя уменьшается его проницаемость для газов и снижается температура подслоя, что увеличивает долговечность покрытия; 2) с ростом толщины керамического слоя резко возрастают напряжения в покрытии (как остаточные, так и возникающие в процессе нагрева-охлаждения), что снижает долговечность [6-8].



● –  $R_{N_2}=55$  л/мин, ▲ –  $R_{N_2}=50$  л/мин,  
▼ –  $R_{N_2}=45$  л/мин, ■ –  $R_{N_2}=40$  л/мин

Рис. 1. Влияние тока и расхода плазмообразующего газа ( $N_2$ ) на КИМ при напылении покрытий на основе  $ZrO_2$   $L=120$  мм (размер порошка менее 50 мкм)

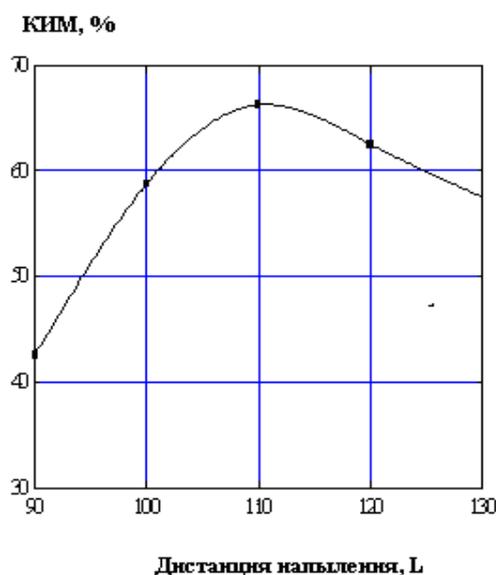
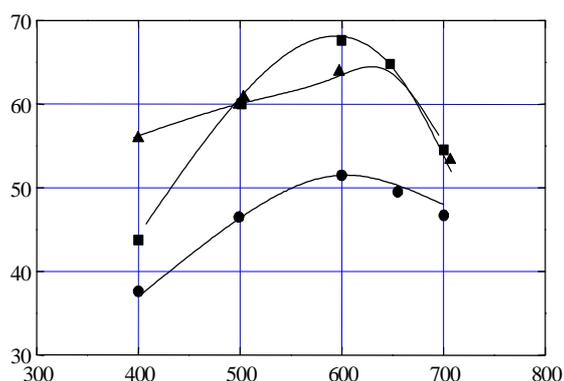


Рис. 2. Влияние дистанции напыления на величину КИМ при напылении покрытий на основе  $ZrO_2$   $R_{N_2}=50$  л/мин,  $I=500$  А

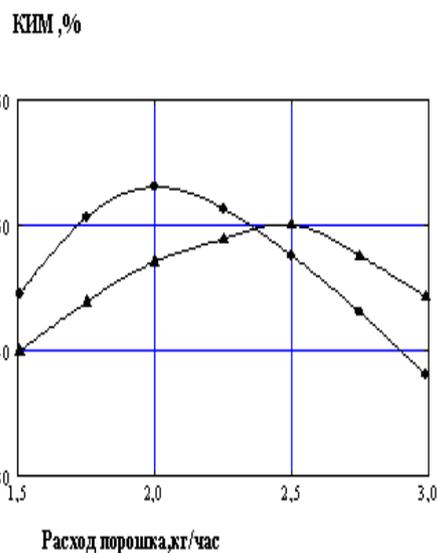
Для различных фракций порошка  $ZrO_2-7,1\%Y_2O_3$  (<50 мкм, 50–63 мкм, 63–100 мкм, 100–160 мкм) при различных токах дуги I (400 А, 500 А, 600 А) были измерены КИМ и процентное содержание фаз в порошке. Влияние размера частиц на КИМ показано на рис. 5,а. С увеличением тока дуги для фракций порошка  $ZrO_2$  (<50 мкм и 50–63 мкм) КИМ растет до 650 А, на более жестких режимах частицы переплавляются и КИМ уменьшается [5]. Для крупных фракций (63–100 мкм, 100–160 мкм) КИМ постоянно растет даже при 700 А частицы недостаточно проплавлены и КИМ не высок порядка 35 %. При увеличении размера фракции с <50 мкм до 100–160 мкм в покрытии уменьшится количество тетрагональной фазы (рис. 5,б), приводящее к ухудшению ударной вязкости [9].

Проведена оптимизация параметров APS (плазменное напыление на воздухе) процесса для материала  $ZrO_2$ . Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала. На оптимальных режимах (ток дуги -600А; дистанция напыления-110 мм; расход плазмообразующего газа азота-50 л/мин; фракционный состав порошка диоксида циркония <50 мкм; расход сжатого воздуха для охлаждения 1 м<sup>3</sup>/мин; р=4 атм) мы получаем антиметеоритных покрытий на основе диоксида циркония с коэффициентом использования материала -62%; содержание тетрагональной фазы-96%; общую пористость керамического слоя -6%.



● — расход сжатого воздуха 1,5 м<sup>3</sup>/мин р=6 атм; ▲ — расход сжатого воздуха 1 м<sup>3</sup>/мин р=4 атм; ■ — без охлаждения

Рис. 3. Влияние тока на величину КИМ при напылении покрытия на основе  $ZrO_2$  при  $L=110$  мм,  $R_{N_2}=50$  л/мин (размер порошка менее 50 мкм)



● — расход сжатого воздуха 1 м<sup>3</sup>/мин р=4 атм; ▲ — расход сжатого воздуха 1,5 м<sup>3</sup>/мин р=6 атм

Рис. 4. Влияние скорости подачи порошка на КИМ при напылении покрытий на основе  $ZrO_2$  при  $R_{N_2}=50$  л/мин,  $I=600$  А,  $L=110$  мм (размер частиц порошка менее 50 мкм)

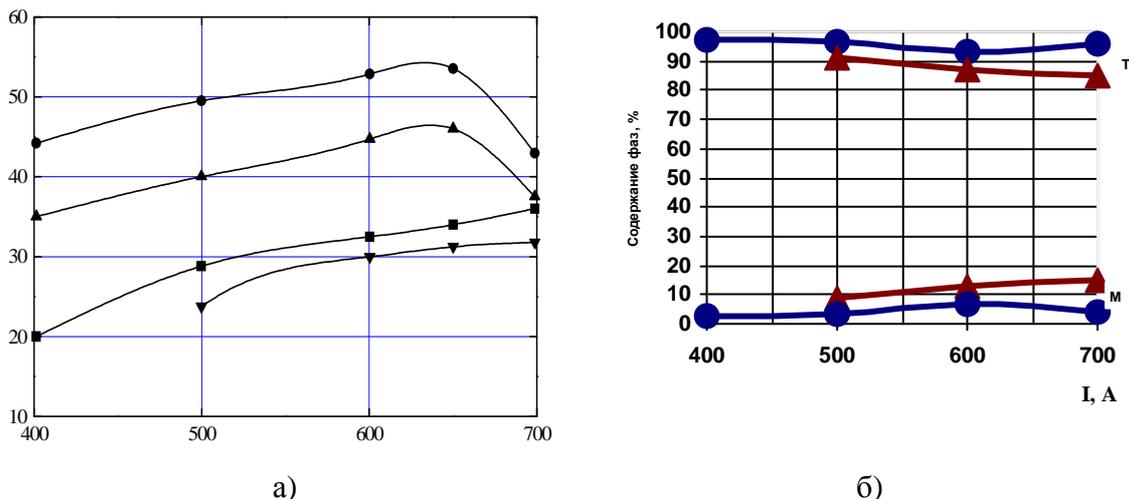


Рис. 5. Влияние тока и размеров частиц порошка на величину КИМ (а) и фазовый состав (б) при напылении покрытий на основе  $ZrO_2$  ( $R_{N_2}=50$ л/мин,  $L=110$  мм,  $R_{ПОР}=2$  кг/ч)

**Список литературы:** 1. Акишин А.И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие.– М: НИИЯФ МГУ, 2007, с. 209. 2. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия Т. 16,17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Новикова Л.С., Панасюка. М.И. М.:Изд-во ЭНЦИТЕХ, 2001. 3. Effects of Space Conditions on materials. Ed. A.I. Akishin, 2001, Nova Science Publ., N.J., p.199. 4. Оковитый, В.А. Создание градиентных плазменных покрытий на основе диоксида циркония/ Оковитый В.А //Международная научно-техническая конференция “Инновационные технологии в машиностроении”. “Полоцк.19-20.10.11. С.239-241. 5. Способ получения композиционного керамического материала: пат. 15565 Респ. Беларусь, МПК В22F 3/23; С04В 35/10 / Оковитый В.А., Девойно О.Г., Пантелеенко А.Ф., Оковитый В.В. заявитель - БНТУ -№ а 2010990; заявл. 29.06.2010, опубл.30.12.11 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. - № 15. 6. Пантелеенко, Ф.И. Оптимизация процесса напыления керамических плазменных покрытий на модели элементов экранов противометеорной защиты/ Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Асташинский В.А. //Тезисы международной научно-технической конференции “Машиностроение и техносфера 21 века”, 15-20 сентября 2014 г., г. Севастополе, т.2, с.123-127. 7. Девойно, О.Г. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью /Девойно О.Г., Оковитого В.В. // “Наука и техника”, БНТУ - Минск, 2014.-Вып.6.- С.3. 8. Пантелеенко, Ф.И. Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония для систем космических аппаратов / Пантелеенко Ф.И.,Оковитый В.А., Девойно О.Г., Асташинский В.М., Оковитый В.В.,Соболевский С.Б.// “Наука и техника”, БНТУ - Минск, 2015.-Вып.3.- С.5-9. 9. Оковитый, В.В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий аппаратов / Оковитый В.В.// “Наука и техника”, БНТУ - Минск, 2015.-Вып.5.- С.26-32.