

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОМ ПОКРЫТИИ В МОМЕНТ ПРИПЛАВЛЕНИЯ К ОСНОВЕ

*Рощин М.Н.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва*

**Ключевые слова:** лазер, наплавка, металлокерамические покрытия, температура, плотность мощности, время, теплофизические параметры.

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию наплавки металлокерамического покрытия с учетом его теплофизических параметров с добавкой упрочняющих фракций  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ . Установлено, что температура в покрытии в процессе оплавления не превышает температуру разложения упрочняющей фазы. Кривая распределения температуры с добавкой  $\text{ZrO}_2$  имеет большие значения температуры, чем с добавками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrB}_2$ . Это объясняется тем, что коэффициент теплопроводности  $\text{ZrO}_2$  намного ниже, чем у  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrB}_2$ . На основании проведенных исследований разрабатывается технологический процесс наплавки металлокерамических покрытий.

## TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE METAL-CERAMIC COATING AT THE TIME OF ADDITION TO THE BASE

*Roshchin M.N.*

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow*

**Keywords:** laser, surfacing, metal-ceramic coatings, temperature, power density, time, thermal parameters.

**Abstract.** The work is devoted to the study of the surfacing of a metal-ceramic coating taking into account its thermophysical parameters with the addition of hardening fractions  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ . It is established that the temperature in the coating during the melting process does not exceed the decomposition temperature of the hardening phase. The temperature distribution curve with the addition of  $\text{ZrO}_2$  has larger temperature values than with the additives  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrB}_2$ . This is due to the fact that the thermal conductivity coefficient of  $\text{ZrO}_2$  is much lower than that of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrB}_2$ . Based on the conducted research, the technological process of surfacing metal-ceramic coatings is being developed.

**Введение.** Лазерная наплавка относится к перспективным технологиям создания покрытий с целью получения специальных свойств на поверхности изделий, а также восстановления изношенных деталей машин. Отпадает необходимость использования объемно-легированных материалов и появляется возможность в известной степени решить кардинальную задачу машиностроения – повышение надежности и долговечности деталей машин.

Процесс лазерной наплавки заключается в нанесении на поверхность обрабатываемого изделия покрытия путем расплавления композиционной шихты. Наплавка осуществляется с подводом дозированной энергии для расплава шихты и подплавления основы, поэтому свойства покрытия зависят главным образом от свойств наплавленного композиционного материала. Подача наплавочного материала в зону оплавления осуществляется различными способами, один из которых является плазменное напыление композиционного покрытия. При

воздействии лазерного излучения на поверхность детали происходит быстрый ее нагрев и плавление. Концентрация мощной энергии в пятне сфокусированного луча на поверхности материала позволяет получать высокую плотность теплового потока, необходимую для интенсивного нагрева или локального расплавления. Локальность воздействия позволяют производить обработку только поверхностного участка материала без нагрева остального объема и нарушения его структуры и свойств. Высокая скорость нагрева приводит к быстроизменяющимся процессам, происходящим на поверхности детали: неравномерность распределения температуры по толщине материала и по времени; высокие скорости локального нагрева; наличие сложных гидродинамических эффектов в ванне расплава. Одним из развивающихся направлений лазерной наплавки композиционных покрытий является оплавление плазменных порошковых покрытий [1]. Лазерное плавление покрытий накладывает определенные ограничения на используемые материалы, как по толщине, так и по теплофизическим свойствам. Для решения задач по повышению износостойкости и надежности тяжело нагруженных узлов трения, композиционный материал покрытия должен иметь пластическую матрицу, мелкое зерно, высокую твердость мелкодисперсной упрочняющей фазы, при оптимальной ее концентрации. В качестве пластичной матрицы используется сплавы на основе никеля или кобальта, твердые растворы и др., а так же композиции на их основе. Высокой пластичностью обладает матрица на основе кобальта. Перспективным композиционным материалом, для тяжело нагруженных трибосопряжений является использование в качестве пластичной матрицы эвтектических сплавов системы Ni-Cr-B-Si [2,3]. При лазерной наплавке износостойких металлокерамических покрытий необходимо знать, какие физические процессы происходят в материале. Для регулирования параметров технологического процесса при лазерной обработке и составом обрабатываемых материалов в широком интервале их теплофизических свойств позволяет получать качественно новые свойства наплавленных покрытий. На процесс распространения температуры влияют следующие факторы: плотность теплового потока на поверхности, время его воздействия, теплофизические параметры обрабатываемого материала [4].

**Цель работы:** определить распределение температуры в металлокерамическом покрытии в момент приплавления к основе.

**Материалы и оборудование.** Лазерная наплавка проводилась на сталь 30ХГСА со следующими теплофизическими свойствами  $\lambda=37 \text{ Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$ ;  $\alpha = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $c = 504 \text{ Дж/(кг}^{\circ}\text{C)}$ ,  $T_{пл} = 1535^{\circ}\text{C}$ , где  $\lambda$  - теплопроводность,  $\alpha$  - температуропроводность,  $c$  - удельная теплоемкость,  $T_{пл}$  - температура плавления основы. Для предварительного нанесения порошковых композиций использовался оптимизированный процесс плазменного напыления. Порошковая композиция состояла из пластичной матрицы системы Ni-Cr-B-Si (порошок ПГ-10Н-01, состава, %: С-0,6...1,0; В-2,8...3,4; Si-4...4,5; Cr-14...20; Fe-3...4,5; Ni-основа) с добавками износостойких фракций:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ . Составлялась композиция из порошка ПГ-10Н-01 и упрочняющих износостойких добавок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ , фракции 5...20 мкм. Концентрация каждой упрочняющей фракции составляла 20% (весовых). Толщина покрытия составляла 0,6мм,

покрытие наносилось на сталь 30ХГСА. Лазерная наплавка износостойких покрытий осуществлялась при плотности мощности  $3 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  на оборудовании, разработанном в ИМАШ РАН на лазерном технологическом комплексе ЛТК-01, с использованием технологической оснастки.

**Результаты и обсуждения.** Технология получения износостойких металлокерамических покрытий разрабатывалась на основе физико-математического моделирования процессов плазменного нанесения и лазерного оплавления покрытия с учетом зависимости теплофизических параметров от температуры. Расчет теплофизических параметров композитного покрытия производился по методике [4]. Для разработки технологического процесса оплавления металлокерамических покрытий проведен численный анализ нагрева и плавления двухслойного полуограниченного тела, с граничными условиями Стефана. По результатам расчета были определены технологические параметры лазерной наплавки. Распределение температуры в покрытии в момент его приплавления приведено на рисунке 1. Покрытие считается приплавленным к основе, когда температура основы достигнет температуры плавления. Температура в покрытии в процессе оплавления не превышает температуру разложения упрочняющей фазы. Кривая распределения температуры с добавкой  $\text{ZrO}_2$  имеет большие значения температуры, чем с добавками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrB}_2$ . Это объясняется тем, что коэффициент теплопроводности  $\text{ZrO}_2$  намного ниже, чем у  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и  $\text{ZrB}_2$ .

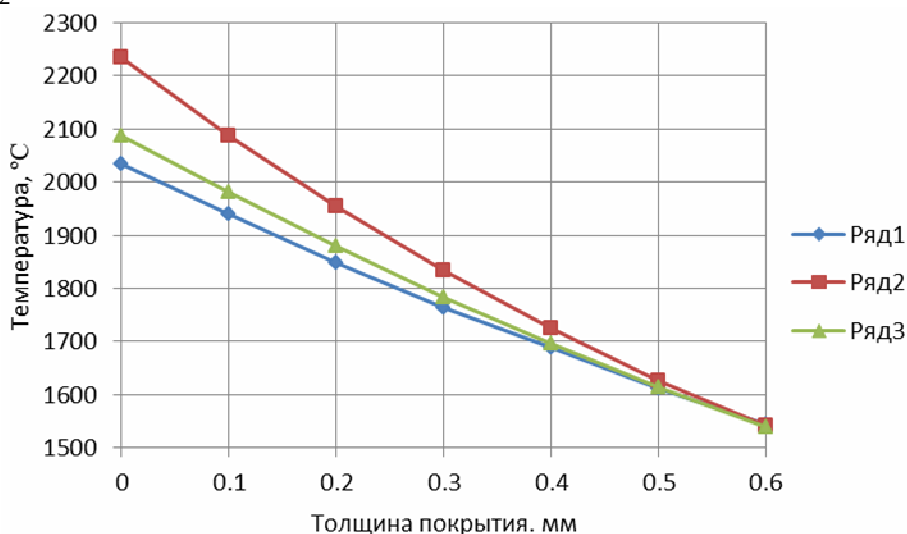


Рис. 1. Распределение температуры по глубине покрытия в момент его приплавления к основе при плотности мощности  $3 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  материалов: 1- ПГ-10Н-01+20% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2-ПГ-10Н-01+20% $\text{ZrO}_2$ , 3-ПГ-10Н-01+20% $\text{ZrB}_2$

## Выводы

Проведен численный анализ нагрева и плавления, износостойкого композиционного покрытия эвтектического сплава системы Ni-Cr-B-Si и добавкой упрочняющих мелкодисперсных фракций  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{ZrB}_2$ , предназначенного для тяжелонагруженных трибосопряжений. Температура в покрытии в процессе оплавления не превышает температуру разложения упрочняющей фазы. Кривая распределения температуры с добавкой  $\text{ZrO}_2$  имеет большие значения температуры, чем с добавками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrB}_2$ . Это объясняется тем, что коэффициент теплопроводности  $\text{ZrO}_2$  намного ниже, чем у  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и  $\text{ZrB}_2$ .

На основании проведенных исследований разрабатывается технологический процесс наплавки металлокерамических покрытий. Результаты могут быть использованы при оплавлении поверхности в лазерных аддитивных технологиях.

#### **Список литературы**

1. Калиниченко А.С., Девойно О.Г. , Мешкова В.В. Разработка износостойких покрытий, сформированных плазменным напылением сплава системы Ni-Fe-Cr-Si-B-C, упрочненного керамикой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Наука и техника. – 2026. – Т.15, №5. – С. 365-370.
2. Makarov A.V., Korobov Yu. S., Soboleva N.N., Khudorozhkova Yu.V. , Vopneruk A.A. , Balu P., Barbosa M.M., Malygina I.Yu., Burov S.V., Stepchenkov A.K. Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications // Letters on Materials. – 2019. – No.9(4). – P. 470-474.
3. Алисин В.В. Владиславлев А.А, Роцин М.Н. Технология получения износостойких металлокерамических покрытий с ультрадисперсной упрочняющей фазой // Перспективные материалы и технологии. Нанокompозиты, (космический вызов 21 век, Том 2). Под. ред. А.А Берлина и И.Г. Ассовского. – М.: Торус Пресс, 2005. – С. 59-68.
4. Алисин В.В., Роцин М.Н. Численный анализ тепловых потоков в процессе плавления покрытий лазером // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – №4. – С.93-101.

#### Сведения об авторе:

*Роцин Михаил Николаевич* – к.т.н., ведущий научный сотрудник, ИМАШ РАН, г.Москва;