

Абделмагид Абделрахман Мохамед Хамед (Египет)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Орлова Евгения Георгиевна, к.ф.-м.н.,

СДВИГ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛЕЙДЕНФРОСТА НА ПОВЕРХНОСТЯХ КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ, ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Карбидокремниевая керамика является перспективной для использования в качестве конструкционного материала теплопередающих устройств в атомной промышленности. Благодаря уникальному сочетанию теплофизических и механических свойств керамики технологические поверхности, изготовленные из этого материала, способны функционировать в экстремальных условиях [1]. Известны [2] исследования возможности использования материалов, изготовленных из SiC, в качестве оболочек тепловыделяющих элементов реакторов на легкой воде. Преимущества SiC по сравнению с циркониевыми сплавами: высокая температура плавления, более низкая скорость образования водорода в результате реакции с водой при высоких температурах, высокая коррозионная стойкость [2]. Однако использование этого материала не решает проблемы кризиса теплообмена, возникающего при подводе к теплоносителю тепловых потоков высокой плотности. Кризис теплообмена представляет собой эффект Лейденфроста, который является частным случаем пленочного кипения [3]. Капля жидкости при контакте с твердой поверхностью, температура которой значительно выше температуры кипения этой жидкости, формирует теплоизолирующий слой между поверхностью и жидкостью, значительно снижающий интенсивность теплообмена. Температура поверхности теплонагруженного оборудования в таких случаях будет увеличиваться, что может привести к его возгоранию или тепловому разрушению.

Реализация эффекта Лейденфроста зависит от большого числа факторов: химический состав и текстура поверхности, ее свободная поверхностная энергия, теплофизические свойства жидкости и твердого тела [4]. До настоящего времени не установлено какой из факторов является доминирующим. Мало работ посвящено исследованию кризиса теплообмена на поверхностях керамики. В настоящей работе предложен новый подход к решению проблемы управления кризисом теплообмена на поверхностях карбидокремниевой керамики за счет их модификации лазерным излучением.

В работе использовались образцы субмикронной карбидокремниевой керамики, изготовленные методом искрового плазменного спекания

с использованием системы GT Advances Technologies SPS10-4 [5] при температуре 1700 °С и давлении 120 МПа. Поверхность одного образца полировалась алмазными пастами, второго обрабатывалась лазерным излучением. Последнее проводилось иттербиевым наносекундным импульсным волоконным лазером IPG-Photonics с длиной волны 1064 нм в воздушной среде. Лазерный импульс длительностью 200 нс, частотой 20 кГц, при фиксированной энергии в импульсе 1 мДж фокусировался на поверхностях в пятно диаметром 60 мкм. Двухосевым гальваносканером контролировалась скорость перемещения луча 200 мм/с и количество линий прохода 60 на 1 мм.

Исследования кризиса теплообмена выполнялись на экспериментальной установке (рис. 1) с использованием теневого оптического метода.

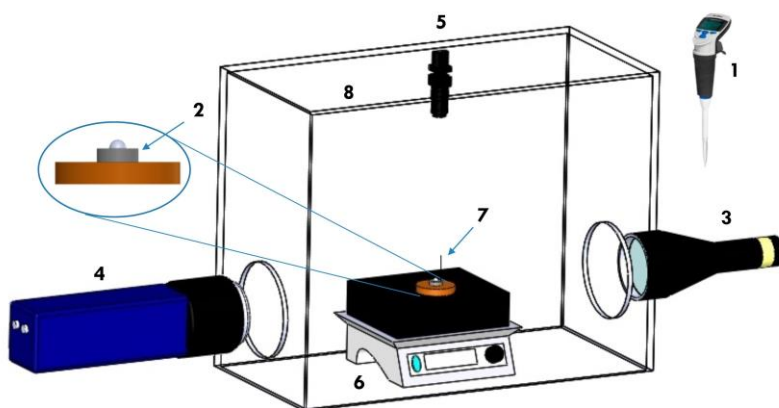


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 – дозатор, 2 – образец SiC, 3 – источник света, 4 – видеокамера, 5 – видеокамера, 6 – плита, 7 – термопары, 8 – прозрачный бокс

Дозирующим устройством 1 капля типичного теплоносителя (дистиллированная вода) помещалась на разогретый образец 2. Системой источник света 3 и высокоскоростная видеокамера 4 осуществлялась видеорегистрация процесса. После раскадровки теневые изображения обрабатывались в программном обеспечении Drop Shape Analysis [6]. Определялись геометрические параметры капель и время их жизни. Погрешность не превышала 5%. Камерой 5 контролировалось расположение капли на поверхности. Нагрев осуществлялся плитой 6 с возможностью автоматически поддерживать заданную температуру. Температура регистрировалась термопарами 7 типа хромель-алюмель (погрешность $\pm 0,1$ °С). Одна устанавливалась с нижней стороны образца, две другие с верхней. Прозрачный бокс 8 использовался для минимизации воздействия окружающей среды на исследуемый процесс.

Смачивание поверхности и ее текстура значительно влияют на процесс испарения малых объемов жидкости. Поэтому предварительно мы исследовали свойства смачивания полированного и текстурированного образцов SiC по величине статического контактного угла (θ), сформированного каплей воды объемом 10 мкл и поверхностью. Установлено, что на полированном образце SiC θ варьируется в широком диапазоне (от 62° до 92°) в зависимости от области, в которую помещается капля. Такое явление называется гистерезисом контактного угла, причиной которого является шероховатость поверхности и химическая неоднородность. Шероховатость полированной поверхности оценена параметром $Sa=4,75$ мкм. Таким образом, с учетом гистерезиса на полированном образце – $\theta = 77^\circ \pm 15^\circ$. Текстурированный образец характеризуется меньшим значением θ (лучшей смачиваемостью). Последнее связано с увеличением поверхностной энергии после лазерного текстурирования за счет образования оксидов [7]. Однако, разброс углов незначителен $\theta = 20^\circ \pm 5^\circ$ из-за меньшей шероховатости – $Sa=1,85$ мкм.

Испарение капель исследовалось в широком диапазоне варьирования температуры нагрева поверхности SiC: от 80°C до 300°C .

В современной литературе известно три способа определения эффекта Лейденфроста: 1) по величине контактного угла; 2) по зависимости времени жизни капли от температуры нагретой поверхности; 3) по наличию парового слоя, формирующегося между каплей и поверхностью. В настоящей работе использованы все три способа. На рисунке 2 представлены фотоизображения капель на нагретых поверхностях SiC. С помощью оборудования теневого метода установлено, что температура Лейденфроста для капли дистиллированной воды объемом 10 мкл на полированной поверхности составила 210°C , для текстурированной – 260°C . При таких температурах формируется теплоизолирующий слой между поверхностью и жидкостью, капля приобретает сфероидальную форму (контактный угол равен 180°), витая над поверхностью. При этом, форма капли определяется взаимодействием силы тяжести, поверхностного натяжения и динамики пара в пространстве между поверхностью нагрева и нижней поверхностью жидкого сфероида.



Рисунок 2. Фотоизображение левитирующей капли объемом 10 мкл на нагретых поверхностях SiC: (а) полированная, (б) текстурированная

На рисунке 3 представлены зависимости времени испарения капель от температуры нагрева поверхностей SiC.

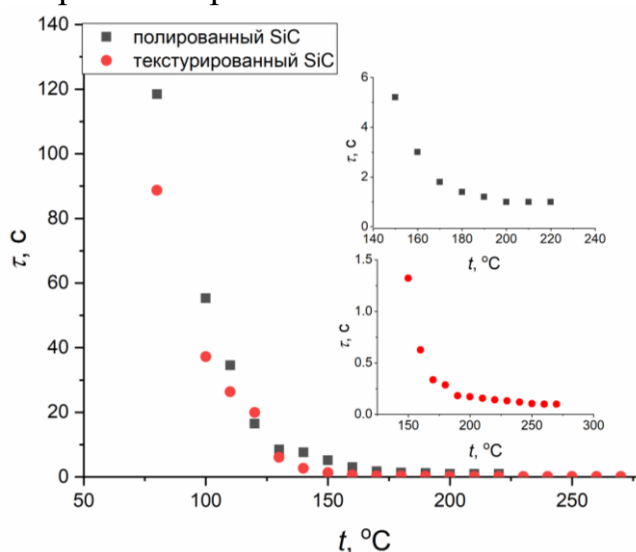


Рисунок 3. Зависимости времени испарения капли воды объемом 10 мкл от температуры нагрева поверхностей SiC

Время испарения капель в состоянии Лейденфроста практически не изменяется при повышении температуры из-за изоляционного парового слоя. Поэтому исходя из представленных зависимостей температуры начала эффекта Лейденфроста равны 200 °C и 250 °C на полированной и текстурированной поверхностях, соответственно.

Наличие парового слоя зарегистрировано по результатам анализа теневых изображений капель воды (рис. 2) на поверхностях SiC на полированной при температуре 210 °C, на текстурированной – 260 °C. Толщина парового слоя на полированной поверхности составила 0,045 мм, на текстурированной – 0,023 мм.

По результатам проведенных экспериментов предложен и обоснован новый подход к решению проблемы теплофизики – управление кри-

зисом теплообмена. С помощью лазерного текстурирования поверхностей карбидокремниевой керамики удалось увеличить температуру Лейденфроста на 50 °С по сравнению с температурой на полированной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Snead L.L., Nozawa T., Katoh Y., and Byun. T. Handbook of SiC properties for fuel performance modeling // Nuclear Materials. – 2008. – Vol. 371., No. 2007. – P. 329–377.
2. Wang. Z., Qu. W., Xiong. J., Zhong. M., and Yang. Y., Investigation on effect of surface properties on droplet impact cooling of cladding surfaces // Nuclear Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 52., No. 3. – P. 508–519.
3. Кутателадзе. С. С., Накоряков. В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск.: Наука, 1984.
4. Liu. G., Craig. V.S.J. Macroscopically flat and smooth superhydrophobic surfaces: Heating induced wetting transitions up to the Leidenfrost temperature Exploring nanoscale hydrophobic hydration // Faraday Discussions. – 2010. – Vol. 146. – P. 13–18.
5. Sivkov A.A., Nikitin D.S., Pak A.Y., and Rakhmatullin I.A., Direct plasmadynamic synthesis of ultradisperse silicon carbide // Technical Physics Letters. – 2013. – Vol. 39., No. 1. – P. 105–107.
6. Islamova A., Orlova. E. Wettability inversion of aluminum-magnesium alloy surfaces // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1019., No. 1. – P. 8–13.
7. Yang Z., Liu X., and Tian Y. Insights into the wettability transition of nanosecond laser ablated surface under ambient air exposure // Journal of Colloid and Interface Science. – 2019. – Vol. 533. – P. 268–277.