

Могажи Пиус Бамиделе<sup>1</sup> (✉), Жамиру Тамба<sup>1</sup>, Десай Давуд<sup>1</sup>, Садику Ротими<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отделение машиностроения, Чванский университет технологии, Претория, Южная Африка

<sup>2</sup> Отделение технологии полимеров, Чванский университет технологии, Претория, Южная Африка

УДК 666.3/7:621.43(68)

## ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ УПРОЧНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Благодаря таким свойствам керамических материалов, как коррозионная стойкость, стойкость к окислению при высоких температурах, к износу и низкая относительная плотность, они представляют большой интерес для применения, например, в качестве изоляции камеры сгорания блока цилиндров автомобильного двигателя. Недостатки керамических материалов, например низкий показатель вязкости разрушения, можно устранить с помощью различных методов упрочнения. Представлен обзор некоторых материалов, применяемых для изоляции камеры сгорания блока цилиндров автомобильного двигателя, а также технологий нанесения керамических покрытий и механизмов упрочнения керамических материалов, применяемых для изоляции блока цилиндров автомобильного двигателя. Особое внимание уделено методологиям, сильным и слабым сторонам.

**Ключевые слова:** керамические материалы, механизм упрочнения, изоляция камеры сгорания, двигатель внутреннего сгорания (ДВС), высокотехнологичная керамика.

### ВВЕДЕНИЕ

**Б**лок цилиндров обеспечивает движение транспортного средства [1], работающего на двигателе внутреннего сгорания (ДВС). Блок представляет собой отлитую деталь, в которой располагаются цилиндры и их компоненты внутри охлаждаемого и смазываемого картера двигателя [2]. Чтобы блок цилиндров соответствовал таким функциональным требованиям, как продолжительный срок службы транспортного средства, надежное укрытие внутренних движущихся деталей и жидкостей, легкость в обслуживании, а также мог противостоять давлению, образующемуся в ходе процесса сгорания, конструкционные материалы, используемые для его производства, должны обладать высокими прочностью, коэффициентом упругости, стойкостью к истиранию и коррозии [3]. Эти материалы должны также иметь низкие плотность, ТКЛР и теплопроводность [4]. Хорошая обрабатываемость и способность металлического сплава к отливанию также являются важными факторами для подбора соответствующего материала, так как чем труднее он обрабатывается, тем выше стоимость произ-

водства [5]. Вдобавок к вышеперечисленным свойствам сплавы должны также обладать хорошим показателем демпфирования колебаний, чтобы поглощать вибрацию движущихся деталей [6]. На рис. 1 показан четырехцилиндровый блок ДВС.

Исследования по снижению затрат, количества потребляемого топлива в ДВС и по обновлению технологий продолжают. В настоящее время интенсифицировались работы, направленные на улучшение эффективности работы двигателя за счет конструкционных модификаций. Например, параллельно разработке передовой керамики быстро увеличивается применение керамических покрытий в ДВС [7]. Для улучшения характеристик двигателя энергию топлива необходимо как можно быстрее пре-



Рис. 1. Четырехцилиндровый блок ДВС

✉  
Могажи Пиус Бамиделе  
E-mail: MogajiPB@tut.ac.za

Таблица 1. Некоторые свойства высокотехнологичной керамики

Материал	Температура плавления, °С	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Вязкость разрушения, МПа · м <sup>1/2</sup>	Твердость, кг/мм <sup>2</sup>
SiO <sub>2</sub>	500	2,20	48	7,2	0,5	650
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050	3,96	250–300	36–40	4,5	1300
ZrO <sub>2</sub>	2700	5,60	113–130	17–25	6,9	1200
SiC	3000	3,20	310	40–44	3,4	2800
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1900	3,24	410	30–70	5,0	1300

вращать в механическую энергию. Покрытие камеры сгорания керамическими материалами с низкой теплопроводностью приводит к повышению температуры и давления в цилиндрах ДВС. Следовательно, происходит увеличение КПД двигателя [8]. Керамические покрытия, применяемые в камерах сгорания дизельных двигателей, предназначены для снижения нагрева, идущего от цилиндров к системе охлаждения двигателя. В будущем системы охлаждения двигателей исчезнут из ДВС благодаря разработке передовой керамики [9]. Можно ожидать, что мощность ДВС увеличится, а его масса и стоимость снизятся в результате устранения элементов системы охлаждения (насос системы охлаждения, вентилятор, водяная рубашка, радиаторы и т. д.) [10, 11]. Запуск двигателя облегчится, как это происходит в дизельных двигателях с керамическим покрытием и укороченной задержкой зажигания благодаря повышению температуры после сжатия в результате снижения отвода тепла [12]. Можно добиться более тихой работы двигателя, так как происходит уменьшение детонации и шума в результате неконтролируемого сгорания [13]. Двигатель может работать при более низких коэффициентах сжатия благодаря укорочению задержки зажигания. Таким образом, можно добиться увеличения механического КПД и экономии топлива [14]. Еще одна важная тема при рассмотрении ДВС — снижение выделения продуктов сгорания с отработавшими газами. Повышение температуры в камере сгорания ДВС с керамическим покрытием обеспечивает снижение выбросов сажи и оксида углерода. При повышении температуры отработанных газов улучшаются турбонаддув и общий показатель теплового КПД [15].

Прочность материала зависит от его микроструктуры. Инженерная конструкция, на которую нанесен тот или иной материал, может изменять эту микроструктуру [16]. Среди множества механизмов упрочнения, изменяющих прочность материала, следует назвать механизм упрочнения межзеренных границ [17]. Ниже пойдет речь о механизме упрочнения керамических материалов для изоляции каме-

ры сгорания блока цилиндров автомобильного двигателя.

### НЕКОТОРЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Керамика используется почти с самого начала применения двигателей с низким показателем отвода тепла [18]. Керамические материалы обладают низкой массой и пониженной теплопроводностью по сравнению с материалами, из которых изготавливают обычные двигатели [10]. В настоящее время сделаны важные открытия, касающиеся качества керамических материалов [19]. В последней четверти XX века было начато производство новых материалов, получивших название «высокотехнологичная керамика» [20]. Высокотехнологичная керамика характеризуется устойчивостью к воздействию высоких температур, повышенными химической стабильностью и твердостью, низкой пористостью, устойчивостью к износу, низкой теплопроводностью и повышенным пределом прочности при сжатии [21]. Сырье для производства такой керамики можно найти в окружающей среде.

Высокотехнологичная керамика состоит из оксидов высокой степени чистоты, таких как Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, MgO, BeO, а также неоксидов. Некоторые свойства высокотехнологичной керамики представлены в табл. 1 [22]. Диоксид циркония занимает важное место среди материалов для формирования покрытий, обладает особыми свойствами и применяется в специальных областях [23]. Наиболее важное свойство ZrO<sub>2</sub>, если рассматривать его в качестве керамического покрытия в ДВС, — термостойкость. Керамика, содержащая ZrO<sub>2</sub>, обладает высокой температурой плавления и устойчивостью к термоударам [24], а также имеет хорошие показатели стойкости к коррозионному и эрозионному воздействию. Используется в дизельных двигателях и лопастях турбин для снижения теплопередачи [8].

**ZrO<sub>2</sub>**. Обнаруживается в трех кристаллических структурах (рис. 2): моноклинной (*m*), тетра-

гональной (*t*) и кубической (*c*). Моноклинная структура стабильна в диапазоне от комнатной температуры до 1170 °С, затем выше 1170 °С превращается в тетрагональную. Тетрагональная структура стабильна до 2379 °С, а при более высоких температурах превращается в кубическую. Обычно трещины наблюдаются во время изменения фаз, поскольку в процессе перехода из моноклинной структуры в тетрагональную объем изменяется на 8% [25]. Чтобы не допустить этого и придать кубической структуре  $ZrO_2$  стабильность при комнатной температуре, вводят добавки  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Y_2O_3$ , оксидов РЗЭ. Керамические материалы на основе  $ZrO_2$ , стабилизированные  $Y_2O_3$ , обладают лучшими свойствами, чем стабилизированные  $MgO$  и  $CaO$  [26, 27].

**$Y_2O_3$ .** Точка плавления 2410 °С. Очень стабилен на воздухе, растворяется в кислотах и поглощает  $CO_2$ . Используется в лампах Нернста в качестве нити накала (сплав с небольшими количествами  $ZrO_2$  и  $ThO_2$ ). Первичные минералы  $Y_2O_3$  — гадолинит, ксенотайм (xenotime) и фергусонит (fergusonite). Кубическая структура  $Y_2O_3$  очень огнеупорна [28].

**$MgO$ .** Наиболее часто встречающийся огнеупорный оксид. Точка плавления 2800 °С, ТКЛР очень высок, легко восстанавливается при высоких температурах и испаряется при 2300–2400 °С. При высоких температурах устойчив к воздействию неорганических кислот, кислых газов, средних солей и влаги. При контакте с углеродом стабилен до 1800 °С. Быстро вступает в реакцию с углеродами и карбидами при температурах выше 2000 °С. Наиболее важные минералы — магнезит, асбест, тальк, доломит, шпинель.

**$Al_2O_3$ .** Точка плавления примерно 2000 °С. Очень стоек к механическим нагрузкам и химическому воздействию в среднем диапазоне температур. Относительно низкая точка плавления ограничивает его применение. Не растворяется в воде, неорганических кислотах и щелочах при условии, что подвергнут достаточной степени обжига. Обнаруживается в виде корунда вместе с силикатами, а также в виде соединений в боксите, диаспоре, криолите, силлиманите, кианите, нефелине и во многих других минералах. Чем выше степень чистоты  $Al_2O_3$ , тем выше его стойкость к износу, воздействию высоких температур и электричества.

**$BeO$ .** Обладает высокими стойкостью к восстановлению и термостойкостью. Точка плавления 2550 °С. Наиболее стоек к восстановлению углеродом при высоких температурах. Электропроводность очень низкая, механиче-

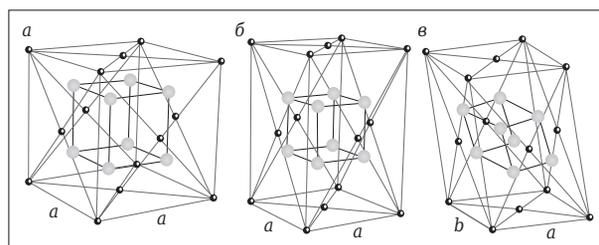


Рис. 2. Кубическая, тетрагональная и моноклинная структура  $ZrO_2$

ские свойства не изменяются до 1600 °С. Один из оксидов, обладающих высоким пределом прочности при сжатии при этой температуре. Хороший огнеупорный материал для выплавки металлов, так как очень стоек к химическому воздействию [27].

## НЕКОТОРЫЕ ИЗВЕСТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ДВС

Керамические покрытия, применяемые для снижения теплопередачи, подразделяются на две группы: покрытия толщиной до 0,5 мм и толщиной 5–6 мм [29]. Тонкие покрытия применяют в газовых турбинах, днищах поршней, головках цилиндров и клапанах карбюраторных и дизельных двигателей. На заре применения керамических покрытий для снижения отвода тепла из двигателей применяли толстые покрытия из монолитной керамики, которые наносили на детали двигателя. Позже стало ясно, что такие покрытия не подходят для условий эксплуатации дизельных двигателей. Поэтому начались поиски новых подходов [26, 30].

### Нанесение покрытия путем химического осаждения из паровой (газовой) фазы (CVD)

Этот метод обеспечивает нанесение плотных покрытий на материалы благодаря разложению газов, подаваемых при относительно высоком давлении. Газообразные соединения наносимых материалов подаются на поверхность подложки и образуют покрытие в результате тепловой реакции. Побочные продукты реакции удаляются из системы. Это очень универсальный процесс, с помощью которого можно получать различные покрытия, порошки, волокна и монолитные детали. CVD-методом можно получать почти все виды металлических и неметаллических элементов, включая углерод и кремний, а также такие соединения, как карбиды, нитриды, бориды, оксиды и др. [31].

### Нанесение покрытия осаждением из паров

При использовании этой технологии происходит перенос материала на атомном уровне.

Процесс состоит из следующих четырех стадий: **напыление** (материал покрытия наносится с помощью высокоэнергетического источника в виде пучка электронов или ионов, который срывает атомы с поверхности цели прежде, чем испарить их); **перенос** (движение испаренных атомов от цели к подложке, на которую наносится покрытие); **реакция** (покрытия из металлов окисляют, азотируют, обезуглероживают новые цели из металла. Атомы металла вступают в реакцию с соответствующими газами во время стадии переноса); **осаждение покрытия** (образование покрытия на поверхности подложки).

#### Процесс газопламенного напыления

Пламя горения является источником тепла для расплавления материала покрытия, который может быть в виде прутка, проволоки или порошка. При применении проволоки или прутка специальный механизм подает материал в камеру сгорания, где пламя расплавляет и приводит частицы в движение (благодаря большой скорости потока газов), в результате чего образуется металлизированное покрытие. Возможно применение порошка, который переносится с помощью дополнительного источника газа (обычно азота) из бункера в распылитель с последующим сгоранием и отложением в виде покрытия [8].

#### Процесс распыления и наплавления

Этот процесс, состоящий из комбинации двух стадий, когда материал покрытия сначала напыляется с помощью пламенного напыления (или плазменного напыления) и сразу после напыления подвергается плавлению с помощью ацетилено-кислородной горелки, индукционного нагрева или тепловой обработки в печи (которая обычно находится в восстановительной атмосфере или в вакууме). Температура наплавления велика, часто до 1300 °С, но при этом могут получаться более толстые покрытия (до 2000 мкм) высокой степени твердости. Плюсы этой технологии заключаются в создании абсолютно плотной микроструктуры и в высокой силе сцепления покрытия с подложкой. Основным недостатком — высокие температуры, которые приходится выдерживать подложке на стадии сплавления [31].

#### Нанесение покрытия напылением металла при высокой температуре с помощью высокоскоростной ацетилено-кислородной горелки

Это еще один вид газопламенного напыления. Материал покрытия используется в виде порошка. Эту технологию подразделяют на два

типа: взрывное (пульсовое) нанесение покрытия напылением металла при высокой температуре с помощью высокоскоростной ацетилено-кислородной горелки и высокотемпературное нанесение при непрерывном горении. Разница между двумя системами состоит в типе газообразного топлива и в системах охлаждения. Кроме того, в системе взрывного типа горение поддерживается с помощью синхронизированной искры, которая детонирует смесь частиц и газа [26, 32].

#### Технология плазменного напыления покрытия

Плазма, которую часто называют четвертым состоянием вещества, состоит из нейтральных атомов, положительных ионов и свободных электронов. Плазма генерируется, когда в газ подается достаточная энергия, которая ионизирует его, в результате чего электроны и ионы начинают существовать независимо друг от друга. Примерно 98 % видимой части Вселенной существует в форме плазмы. Плазма встречается на земле в виде северного полярного сияния и молнии. Примеры плазмы, созданной человеком, — неоновые и флуоресцентные трубки и лампы. Равновесная (термическая) плазма — это такое состояние, при котором энергетические уровни электронов, тяжелых частиц и ионов одинаковы. Более высокие уровни переноса ионов значительно усиливают кинетическую энергию газа по сравнению с тем, что наблюдается во время столкновения электронов. Плазма с более высокой температурой электронов, хотя и является активной, не дает более высокие уровни переноса энергии, свойственные частицам малой массы. Источниками энергии для создания термической плазмы обычно являются электрические дуги, разряды в постоянном электрическом поле и высокочастотные разряды. Термическую плазму можно также генерировать с помощью микроволн, гамма-излучения и электрических дуг на основе переменного тока [31].

#### НЕКОТОРЫЕ МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Чтобы компенсировать низкий показатель вязкости разрушения керамических материалов, используются различные механизмы упрочнения. О них речь пойдет ниже.

#### Метод упрочнения с помощью пьезоэлектрики

Разработан новый подход к упрочнению керамики с использованием пьезоэлектрического

кристалла вторичной фазы, который вводится в матрицу керамики в качестве упрочняющей фазы. Благодаря этому  $K_{Ic}$  возрастает до  $5,1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  [33]. Все механизмы упрочнения керамики базируются на принципе рассеяния энергии / баланса энергии (Бехер и Ам; Vecher & Am, 1991). Прочность композитной керамики можно выразить следующим образом:

$$K_{Ic} = [E^c (J^m + \Delta J)]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $K_{Ic}$  — общая прочность композитной керамики;  $E^c$  — коэффициент Юнга;  $J^m$  — изменение энергии, вызванное распространением трещины в матрице;  $\Delta J$  — прирост изменения энергии в результате присутствия вторичной фазы, которая может играть роль упрочняющей фазы, но посредством других механизмов.

Расширив понятие рассеяния энергии, можно разработать альтернативные подходы к керамике, в матрицу которой введен пьезоэлектрический материал вторичной фазы, а упрочнение осуществляется путем рассеяния энергии благодаря пьезоэлектрическому эффекту [34]. Ту часть механической энергии, которая вызывает распространение трещины, можно превратить в электрическую энергию или рассеять путем трансформации сегнетоэластической фазы под воздействием напряжений и путем сдвига доменной стенки. Это впоследствии приводит к усилению стойкости к возникновению трещин.

Вязкость разрушения композитной керамики можно выразить в виде более расширенной формулы (1):

$$K_{Ic} = [E^c (J^m + \Delta J + \Delta J^{\text{piezo}})]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\Delta J^{\text{piezo}}$  — энергия, рассеянная под воздействием пьезоэлектрического эффекта.

Этот уникальный механизм упрочнения можно назвать пьезоэлектрическим механизмом рассеяния энергии (Чен и Янг — Chen & Yang, 1997).

#### Метод образования связей между частицами

Авторы статьи [35] работали по проблеме создания связей между частицами, в ходе чего образуется поверхность, защищенная от образования трещин, когда наночастицы перекрывают распространяющуюся трещину за ее вершиной. Это еще один механизм упрочнения керамических нанокомпозитов. Прочность  $\Delta K$  усиливается при перекрывании трещин [36]:

$$\Delta K = \zeta \sigma_s l_s^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\zeta$  — постоянная величина разряда единиц;  $\sigma_s$  — защитная нагрузка;  $l_s$  — длина защитной зоны.

#### Упрочнение керамики на основе энергетического равновесия Гриффита (Griffith's energy equilibrium)

Механизмы упрочнения нанокомпозитов на основе керамики базируются на энергетическом равновесии Гриффита и на остаточной нагрузке вокруг наночастиц вторичной фазы, диспергированных в зернах матрицы. Особо были проанализированы остаточные тепловые напряжения вокруг сферически диспергированных частиц в пределах концентрической сферы матричного зерна. Это было сделано для того, чтобы выяснить воздействие остаточных напряжений на увеличение жесткости во фронтальной зоне процесса, в результате чего происходит образование нанотрещин, а также на механизм упрочнения, вызываемый образованием смещений. В ходе анализа данных было обнаружено, что соотношение ТКЛР частицы и матрицы оказывает заметное воздействие на остаточные напряжения и что остаточные напряжения были такой величины, что смогли генерировать дефекты кристаллической решетки. Причем смещения вокруг частиц в керамике и наночастиц внутри матрицы привели к смещениям только вокруг частиц [37].

#### Метод дислокации субграниц

Авторы статьи [38] разработали технологию для улучшения вязкости разрушения областей субповерхностей керамических материалов. На поверхность различных керамических материалов (отдельных кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Si}$ , спеченных поликристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) было оказано воздействие с помощью твердых керамических частиц при комнатной температуре. При этом использовали технологию дробеструйной обработки. Важным моментом является создание соответствующих условий для дробеструйной обработки и отжига, причем  $K_{Ic}$  можно увеличить примерно в 4 раза. В табл. 2 приведена оптимальная величина  $K_{Ic}$ , полученная при условиях, применяемых при таком подходе [38]. Наибольшая величина  $K_{Ic}$  равнялась  $15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  и была замечена у спеченных поликристаллов  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Этот показатель гораздо выше, чем  $K_{Ic} \text{ ZrO}_2$  ( $\sim 8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ), и выше, чем  $K_{Ic}$  типичных хрупких металлических материалов ( $10\text{--}12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) [39].

#### Метод упрочнения путем образования in situ β-карбида кремния

Производство композитов на основе керамической матрицы, упрочненных с помощью образования in situ β-карбида кремния, и исследование их характеристик осуществлены авторами публикации [40]. Им удалось создать компози-

Таблица 2. Упрочнение материалов [38]

Материал	Температура отжига, К	Вязкость разрушения $K_{Ic}$ , МПа · м <sup>1/2</sup>		
		в исходном состоянии (a)	после упрочнения (b)	коэффициент улучшения (b/a)
Монокристалл:				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1673	0,9	3,7	4,0
Si	1673	0,9	1,9	2,1
Спеченный поликристалл:				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99,99 %)	1473	3,0	4,3	1,4
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1573	5,9	15,2	2,6

Таблица 3. Информация о существующих методах упрочнения керамических материалов

Исследователи, год	Применяемая методология	Сильные стороны	Слабые стороны
Хе и др., 1997 г.	Создание связей по наклонной плоскости	Имеются надежные данные по улучшению свойств	Исходят из концепции, что стойкость можно смоделировать
Чен и Яанг, 1997 г.	Пьезоэлектрический подход	Значительное увеличение показателя $K_{Ic}$	Появление некоторых фаз усложняет проблему
Охьи и др., 1998 г.	Механизм построения связей между частицами	Очень высокие напряжения в защитном покрытии и резкое увеличение показателя $K_{Ic}$	Трудно оценить размер исходного дефекта
Авахи и др., 2002 г.	Равновесие энергии по Гриффиту	Прочность и $K_{Ic}$ нанокompозита увеличиваются	Зависит только от образования смещения вокруг частиц вторичной фазы
Моон и др., 2004 г.	Субграницы по смещениям	Значительно возрастает $K_{Ic}$ области субповерхности	Технология очень сложна
Чонгай, 2005 г.	Остаточное термическое напряжение	В керамическом композите наблюдается значительный механизм упрочнения	Эффективно только в том случае, когда диспергированных частиц больше, чем ТКЛР матричного зерна
Шариф и др., 2008 г.	Образование in situ β-карбида кремния	Значительно улучшаются твердость и $K_{Ic}$	Сложный и дорогостоящий процесс

ты из керамической матрицы на основе ZrO<sub>2</sub>, стабилизированного Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, путем образования in situ SiC и его дисперсии, а также путем улучшения механических свойств с помощью уплотнения при высокой температуре на изостатическом прессе. Упрочнение в результате образования β-SiC и уплотнение на изостатическом прессе привели к увеличению твердости композитов. Средний показатель  $K_{Ic}$ , полученный по композитам Z30, Z60 и Z90, составил соответственно 9,39, 10,59 и 10,60 МПа · м<sup>1/2</sup>. Показатель вязкости разрушения ZrO<sub>2</sub>, стабилизированного Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, равняется 8 МПа · м<sup>1/2</sup>. Следовательно, благодаря этому подходу повысился показатель  $K_{Ic}$ . Улучшения показателя удалось добиться не только в результате блокировки распространения трещин (образующихся в результате смещения) с помощью однородной дисперсии образовавшихся in situ частиц β-SiC, имеющих высокий коэффициент Юнга, но и в результате фазового превращения *t*-ZrO<sub>2</sub>

в *m*-ZrO<sub>2</sub>. Это превращение ускорено остаточными напряжениями, возникающими в результате разницы ТКЛР TZ-3YS и SiC [41].

### СИЛЬНЫЕ И СЛАБЫЕ СТОРОНЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ МЕТОДОВ

В табл. 3 приведена информация о методологии, сильных и слабых сторонах некоторых существующих методов упрочнения керамических материалов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен обзор некоторых существующих в настоящее время керамических материалов, применяемых для изоляции камеры горения блока цилиндров автомобильного двигателя. Дана подробная информация по механизмам упрочнения керамических материалов. Хотя

механизмы упрочнения способны значительно улучшить  $K_{Ic}$  керамических композитных материалов, но это все еще связано с множеством проблем. Это надежды на концепцию, что прочностные характеристики можно смоделировать; появление некоторых фаз, усложняющих задачу; трудности в оценке размеров исходного дефекта; тот факт, что действенность механизма прочности зависит только от генерирования смещений вокруг частиц вторичных

фаз; тот факт, что механизм действует, только когда тепловое расширение диспергированных частиц больше, чем тепловое расширение матричного зерна. Дальнейшие исследования направлены на разработку технологии, сочетающей имеющиеся методы, с целью производства улучшенного керамического композита, с помощью которого станет возможным устранить некоторые из проблем по изоляции камеры горения блока цилиндров ДВС.

### Библиографический список

1. **McMahon, M.** The automotive engine block. Conjecture corporation. Engine rebuild shop plainfield / M. McMahon. — Naperville, Bolingbrook, IL. 2014. — P. 2–3.
2. **Wilhelm, M.** Materials used in Automobile manufacture — current state and perspectives // Journal De physique IV. — 1993. — Vol. 3.
3. **Christopher, S.** Cast in foam / S. Christopher // Automotive Design & Production. — 2003. — Vol. 2, № 3.
4. **Anonymous.** Magnesium alloy resists high temperature in engine blocks / Anonymous // Advanced material and Processes. — 2003. — P. 17.
5. **Anyalebechi, P. N.** Essentials of Materials Science & Engineering. — 2005. — P. 94.
6. **Hieu, N.** Manufacturing Processes and Engineering materials used in Automotive Engine Blocks / N. Hieu. — Term paper: EGR250 — material Science and Engineering Section B., 2005.
7. **Chiang, Y. M.** Fundamental Research Needs in Ceramics: Report from the 1997 NSF Workshop / Y. M. Chiang, K. Jakus. — 2012. — Available at : <http://www.unix.ecs>.
8. **Murat, C.** Ceramic coating application and research fields for internal combustion engines / C. Murat, S. S. Mustafa, C. Eyub, K. Huseyin, S. Ozgur // Intech Journal of ceramics. — 2012. — Vol. 3, № 2.
9. **Gonzons, G. A.** Multiscale Modeling of Armor Ceramics: Focus on AlON / G. A. Gonzons, J. W. McCauley, I. G. Batyrev // ARL Tech Report, ARLRP-337, 2011. — P. 1–11.
10. **Gataowski, J. A.** Evaluation of a Selectively Cooled Single Cylinder 0.5 L Diesel Engine / J. A. Gataowski // SAE, Paper 900693, USA, 1990.
11. **Schwarz, E.** Combustion and Performance Characteristics of a Low Heat Rejection Engine / E. Schwarz, M. Reid, W. Bryzik, E. Danielson // SAE, Paper 930988, USA, 1993.
12. **Hippel, A. R.** Ceramics / A. R. Hippel. — Dielectric Materials and Applications. Technology Press (M.I.T.) and John Wiley & Sons, 1954
13. **Lampman, S.** Tuning Up the Metals in Auto Engines / S. Lampman // Advanced Materials & Processes. — 1991. — P. 17.
14. **Büyükkaya, E.** Effects of Thermal Barrier Coating to Exhaust Emissions of a Turbocharged Diesel Engine / E. Büyükkaya, H. Yaşar, V. Çelik, M. Ekmekci // 5 International Combustion Symposium, Bursa, Turkey, 21–23 July 1997. — P. 21–23.
15. **George, G.** Iron engines may be in your future / G. George // Tooling & Production. — 2003. — Vol. 69, issue 9. — P. 26.
16. **Chonghai, X.** Effects of particle size and Matrix grain size and volume fraction of particles on the toughening of ceramic composite by thermal residual stress / X. Chonghai // Ceramic International. — 2005. — Vol. 31. — P. 537–542.
17. **Schneider, C., Prange, W.** Thyssen Technische Berichte, 1992. — Heft 1. — P. 97–106.
18. **Kingery W. D., Bowen H. K., Uhlmann D. R.** Introduction to Ceramics, 2006. — 690 p. (Wiley-Interscience, 2nd Edition).
19. **Rohrer, G. S.** Challenges in Ceramic science: A report from the workshop on emerging research areas in ceramics / G. S. Rohrer, M. Affatigato, R. K. Bordia // J. Amer. Ceram. Soc. — 2012. — Vol. 95, № 12. — P. 3699–3712.
20. **Niihara, K.** / K. Niihara, T. Ohji, Y. Sakka // 3rd International Congress on Ceramics (ICC3) // IOP Conf. Ser. — 2011. — Vol. 18, 012001. — P. 4–6.
21. **Çevik, İ.** Changing Physical and Chemical Properties of Zirconia Based Ceramic Coatings, PhD Thesis / İ. Çevik. — Istanbul Technical University, Turkey (in Turkish), 1992.
22. **Rahaman, M. N.** Ceramic Processing and Sintering ; 2nd Ed. / M. N. Rahaman. — Marcel Dekker Inc., 2003 (2000).
23. **Conrad, H.** Space Charge and Grain Boundary Energy in Zirconia (3YTZP) / H. Conrad // J. Amer. Ceram. Soc. — 2011. — Vol. 94, № 11. — P. 3641–3642.
24. **Parimal, P. J.** Transparent ceramics for armor and EM window applications / P. J. Parimal // Proceedings of SPIE 4102. — 2000. — P. 1.
25. **Richerson, D. W.** Modern Ceramic Engineering; 2nd Ed. / D. W. Richerson. — Marcel Dekker Inc., 1992.
26. **Yaşar, H.** Effects of Thermal Barrier Coating to Performance of a Turbocharged Diesel Engine : PhD Thesis / H. Yaşar. — Istanbul Technical University, Turkey (in Turkish), 1997.
27. **Geçkinli, A.** Advanced Technology Materials / A. Geçkinli. Teknik Üniversite Matbaası Publishing House, Istanbul, Turkey (in Turkish), 1992.

28. **Martin, L. W.** Advances in the Growth and Characterization of Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Oxide Thin Films / *L. W. Martin, Y. H. Chu, R. Ramesh* // *Mater. Sci. Eng., R.* — 2010. — Vol. 68, № 4/6. — P. 111–333 ; *Materials and Processes.* — 2010. — Vol. 161, issue 8. — P. 13.
29. **Onoda, G. Y.** Ceramic Processing Before Firing / *G. Y. Onoda, L. L. Hench.* — New York : Wiley & Sons, 1979.
30. **Kamo, R.** Thin Thermal Barrier Coatings for Engines / *R. Kamo, D. Assanis, W. Bryzik.* — SAE, Paper 890143, USA, 1989.
31. **Vishal, N. S.** Thermal barrier coating on IC-Engines : Review / *N. S. Vishal, R. T. Mandar, R. W. Amol* // *International Journal of Research in aeronautical and Mechanical Engineering.* — 2013. — Vol. 1, № 7. — P. 134–139.
32. **Anonymous** (2004): Coating Methods, Senkron Metal A.S., 02.10.2004, Available from [www.senkronmetal.com.tr](http://www.senkronmetal.com.tr) (in Turkish).
33. **Chen, X. M.** A new approach for toughening of ceramics / *X. M. Chen, B. Yang* // *Journal of materials Letters.* — 1997. — Vol. 33. — P. 237–240.
34. **He, M. Y.** Toughening and Strengthening by inclined ligament bridging / *M. Y. He, A. G. Evans, D. J. Wisnuck* // *Acta mater.* — 1997. — Vol. 45, № 7. — P. 2813–2820.
35. **Ohji, T.** Strengthening and toughening of ceramicsnanocomposites / *T. Ohji, K. Niihara, Y. Choa, K. Jeon* // *J. Amer. Ceram. Soc.* — 1998. — Vol. 81, № 6.
36. **Sakai, M.** The crack growth resistance curve of Non-phase Transformation ceramics / *M. Sakai, R. C. Bradt* // *J. Ceram. Soc. Jpn.* — 1988. — Vol. 96, № 8. — P. 801–809.
37. **Awaji, H.** Mechanism of Toughening and Strengthening in Ceramicsbasednanocomposite / *H. Awaji, S. Choi, E. Yagi* // *Journal of Mechanics of Materials.* — 2002. — Vol. 34. — P. 411–422.
38. **Moon, W.** Toughening of ceramics by dislocation sub-boundaries / *W. Moon, T. Ito, S. Uchimura, H. Saka* // *Journal of Material Science and Engineering.* — 2004. — A 387–389.
39. **Moon, W. J.** / *W. J. Moon, H. Saka* // *Phil. Mag. Lett.* — 2000. — Vol. 80. — P. 461.
40. **Sharif, A. M.** Fabrication and Characterization of Ceramic Matrix Composites reinforced by In Situ formation of  $\beta$ -silicon carbide / *A. M. Sharif, H. Sueyoshi* // Elsevier Publication Ltd. ScriptaMaterialia. — 2008. — Vol. 58.
41. **Christopher, S.** Hardness and Abrasion Resistance of Nano-crystalline Nickel Alloys near the Hall-Petch Breakdown regime / *S. Christopher, T. G. Nieh* // *Materials Resources Society. Symposium Proceedings.* — 2002. — P. 740. ■

Получено 18.04.14

© Мозажи Пуус Бамиделе, Жамиру Тамба, Десаи Дауд, Садику Ротими, 2014 г.

© Пер. — С. Н. Клявлина  
(ООО «Комбинат «Магнезит»)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ИНСТИТУТ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ



“Мы решим Ваши задачи в кратчайшие сроки...”

5-й международный научно-технический симпозиум

«ПОРИСТЫЕ ПРОНИЦАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ТЕХНОЛОГИИ И ИЗДЕЛИЯ НА ИХ ОСНОВЕ»

Симпозиум посвящен 85-летию со дня основания Национальной академии наук Беларуси

30–31 октября 2014 г. Минск – Раков, Беларусь

Секции симпозиума

1. Пористые порошковые материалы: теоретические и экспериментальные исследования процессов их получения
2. Проницаемые материалы: свойства, технологии получения
3. Эффективные области использования пористых материалов
4. Новые пористые и проницаемые материалы, оборудование и процессы с их применением

Контакты:

Адрес: 220005 Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41, Институт порошковой металлургии  
Телефоны: +375 (17) 290-99-93, +375 (17) 290-95-64 • Факс: (017) 292-82-42 • E-mail: [info50@mail.ru](mailto:info50@mail.ru)