

Д. т. н. В. В. Кузин (✉), д. т. н. С. Н. Григорьев, к. т. н. М. А. Волосова

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет
«Станкин», Москва, Россия

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

ТЕПЛОВЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДЕТАЛИ ИЗ ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКИ, КОНТАКТИРУЮЩЕЙ С ДЕТАЛЬЮ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПРИ НАГРЕВЕ

Приведены результаты изучения тепловых и деформационных процессов в поверхностном слое детали из оксидно-карбидной керамики, контактирующей с деталью из никелевого сплава ЭП741НП, при нагреве. Установлено, что кривые, описывающие влияние времени нагрева на температуру и напряжение в разных контрольных точках конструкции системы $TiC - MgO - Al_2O_3 - ЭП741НП$, имеют три характеристических диапазона. Определены особенности тепловых и деформационных процессов в каждом из этих диапазонов и отмечена необходимость их учета при проектировании узлов оборудования, в состав которых входят керамические детали.

Ключевые слова: керамика, тепловые и деформационные процессы, напряженно-деформированное состояние, поверхностный слой, моделирование, никелевый сплав, проектирование.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые условия эксплуатации технологического оборудования в разных областях промышленности имеют важное значение в обеспечении его надежности [1]. Температура при стационарном режиме и динамика переходных тепловых процессов в совокупности определяют характер деформации, износа и разрушения поверхностных слоев контактирующих деталей [2]. Часто именно эти процессы приводят к непрогнозируемым отказам отдельных узлов оборудования. Типичным примером выхода оборудования из работоспособного состояния являются случаи, когда одна из контактирующих деталей изготовлена из керамического материала [3].

Для выяснения природы этих отказов важно знать основные закономерности влияния нестационарных тепловых режимов на напряженно-деформированное состояние керамических деталей, которые наиболее чувствительны к резким и значительным перепадам температуры [4, 5]. Задача весьма сложная из-за значительного влияния большого числа факторов на характер тепловых и деформационных процессов в разных узлах конкретного оборудования [6].

К одному из наиболее важных факторов следует отнести условия контакта деталей из материалов, характеризующихся существенными различиями в теплофизических свойствах и находящихся под действием теплового потока [7–9]. Однако решение этой задачи имеет важную инженерно-техническую значимость для проектирования технологического оборудования, а также прогнозирования его ресурса и возможных отказов.

Настоящая работа проведена с целью исследования тепловых и деформационных процессов в поверхностном слое детали из оксиднокарбидной керамики в разных условиях контакта с деталью из никелевого сплава ЭП741НП при нагреве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи сформировали и проанализировали систему «узел из деталей «втулка» и «подпятник», находящуюся в режиме нагрева. Фрагмент рассматриваемого узла толщиной Δ представлен на рис. 1, а. Деталь «втулка» Д1 выполнена из высокоплотной оксиднокарбидной керамики, деталь «подпятник» Д2 — из жаропрочного никелевого сплава. Узел имеет два варианта конструктивного исполнения. В первом случае деталь Д1 свободно (но без зазора) установлена в деталь Д2, из-за чего между ними отсутствует силовое взаимодействие. Во втором случае деталь Д1 запрессована в деталь Д2, что формирует силовой



В. В. Кузин

E-mail: kyzena@post.ru

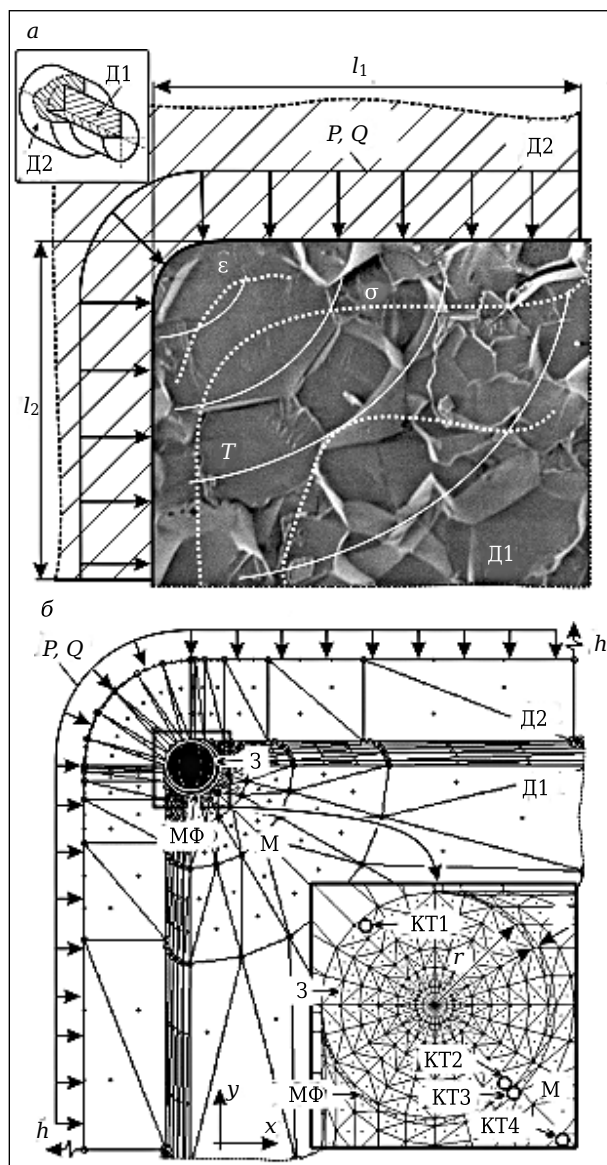


Рис. 1. Микроструктурная модель узла (а) и расчетная схема (б)

контакт между этими деталями. Приняли допущение, что в этой системе действуют только упругие деформации и не протекают химические процессы, изменяющие структуру поверхностного слоя контактирующих деталей.

Базовые связи в этой системе определили следующим образом. Под действием эксплуатационных (тепловых переменных во времени) нагрузок керамическая деталь Д1 (см. рис. 1, а) нагревается до температуры T , деформируется (ϵ) и в ее поверхностном слое формируются микро- и макронапряжения σ . Эти взаимосвязанные процессы определяют причины отказов керамической детали Д1 при эксплуатации. На эти связи влияют условия контактного взаимодействия между деталями узла, характер теплового нагружения, свойства материалов деталей Д1 и Д2.

С использованием метода выделения элементарного фрагмента структуры керамики построили микроструктурную модель детали Д1 [10]. Модель формализует структурно-неоднородный материал, состоящий из совокупности следующих структурных элементов керамики: зерно (З), межзеренная фаза (МФ) и матрица (М). Каждый из этих структурных элементов характеризуется собственными свойствами как не зависящими от температуры (плотность ρ_3 , ρ_{MF} и ρ_M ; модуль упругости E_3 , E_{MF} и E_M ; температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) α_3 , α_{MF} и α_M ; коэффициент Пуассона μ_3 , μ_{MF} и μ_M), так и зависящими от температуры (теплопроводность λ_3 , λ_{MF} и λ_M ; теплоемкость C_3 , C_{MF} и C_M).

С учетом микроструктурной модели создали расчетную схему, показанную на рис. 1, б. При ее создании приняли следующие допущения: рассматривается плоская задача; керамика и никелевый сплав являются бездефектными материалами; отсутствуют пластические деформации в деталях. В соответствии с расчетной схемой структурно-неоднородный материал детали Д1, выполненной из TiC (зерно), MgO (межзеренная фаза) и Al_2O_3 (матрица), контактирует с однородным никелевым сплавом ЭП741НП детали Д2. Эту конструкцию было принято называть «система TiC – MgO – Al_2O_3 – ЭП741НП». Свойства элементов системы, не зависящие от температуры, представлены в табл. 1, свойства, зависящие от температуры, — в табл. 2. Полный список справочников и монографий, из которых позаимствованы значения этих свойств, приведен в работе [11].

К внешнему контуру детали Д2 (на всей длине контактных площадок $l_1 = l_2 = 0,05$ мм) прикладывали: не зависящую от времени рас-

Таблица 1. Свойства элементов системы, не зависящие от температуры

Соединение, сплав	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона	ТКЛР (20–1500 °C), 10^{-6} град ⁻¹
TiC	4,9	484	0,22	7,95
MgO	3,4	315	0,18	13,4
Al_2O_3	4,0	380	0,24	8,5
ЭП741НП	8,35	193	0,33	13,7

Таблица 2. Свойства элементов системы, зависящие от температуры

Соединение, сплав	Теплопроводность λ , Вт/(м·град)	Удельная теплоемкость C_p , кДж/(кг·град)
TiC	$\lambda = 23,2 e^{0,00027T}$	$C_p = 556,7 - 8 \cdot 10^{-2}T + 4 \cdot 10^{-5}T^2 - 2 \cdot 10^{-7}T^3$
MgO	$\lambda = 7871,2/(T - 125) + 3,6 \cdot 10^{-33}T^{10}$	$C_p = 1136,7 + 125,2 \cdot 10^{-3}T - 218,5 \cdot 10^{-5}T^2$
Al_2O_3	$\lambda = 2100 T^{-0,78}$	$C_p = 1093,6 + 183,7 \cdot 10^{-3}T - 304,3 \cdot 10^{-5}T^2$
ЭП741НП	$\lambda = 7,954 e^{0,00137T}$	$C_p = 380,21 e^{0,00067T}$

пределенную силовую нагрузку $P = 2 \cdot 10^8$ Па и зависящий от времени тепловой поток $Q = 4 \cdot 10^8$ Вт/м². В расчетах также учитывали конвективные потери тепла с коэффициентом теплообмена $h = 10^5$ Вт/(м²·град) на свободных от теплового потока участках внешнего контура детали Д2.

Для решения задачи нестационарной термоупругости использовали построенную математическую модель и автоматизированную систему термомеханических расчетов керамических пластин RKS-ST v.1.0 [11, 12]. Расчеты выполнены для керамической детали Д1 со следующими параметрами: радиус зерна $r = 3$ мкм; толщина межзеренной фазы $\delta = 0,2$ мкм; $n_1 = 6$; $n_2 = 6$; $n_3 = 6$; $n_4 = 4$ (совокупность параметров n используется при автоматической генерации конечных элементов в расчетной схеме).

Сравнительный анализ температур и микронапряжений в керамической детали Д1 выполняли с использованием метода контрольных точек (КТ), которыми считали фиксированные конеч-

ные элементы конструкции [13]. В качестве базовых использовали четыре КТ, две из которых расположены в зерне и по одной — в межзеренной фазе и матрице (см. рис. 1, б). Зависимости на рисунках, относящиеся к определенным КТ, имеют в обозначениях соответствующие индексы (например, для КТ1 — T^1 и σ_i^1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы изучили тепловое состояние системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП в условиях неустановившейся термоупругости.

В качестве примера на рис. 2 приведены температурные поля в детали Д1 через 0,05 и 0,075 с после начала нагрева конструкции. Видно, что различия в температурах проявляются только в областях матрицы, непосредственно примыкающих к межзеренной фазе.

Влияние времени нагрева на изменение температуры в разных КТ этой конструкции представлено на рис. 3. Установлено, что процесс достаточно просто описывается с использованием трех характеристических диапазонов. В характеристическом диапазоне 1, длительность которого составляет $\tau = 0,05$ с, температура резко повышается от 0 до T_1 . В характеристическом диапазоне 2, длительность которого составляет 0,025 с, температура плавно возрастает от T_1 до T_2 . В характеристическом диапазоне 3, который начинается через 0,075 с после начала нагрева, температура стабилизируется, конструкция выходит на стационарный режим и ее тепловое состояние далее не изменяется.

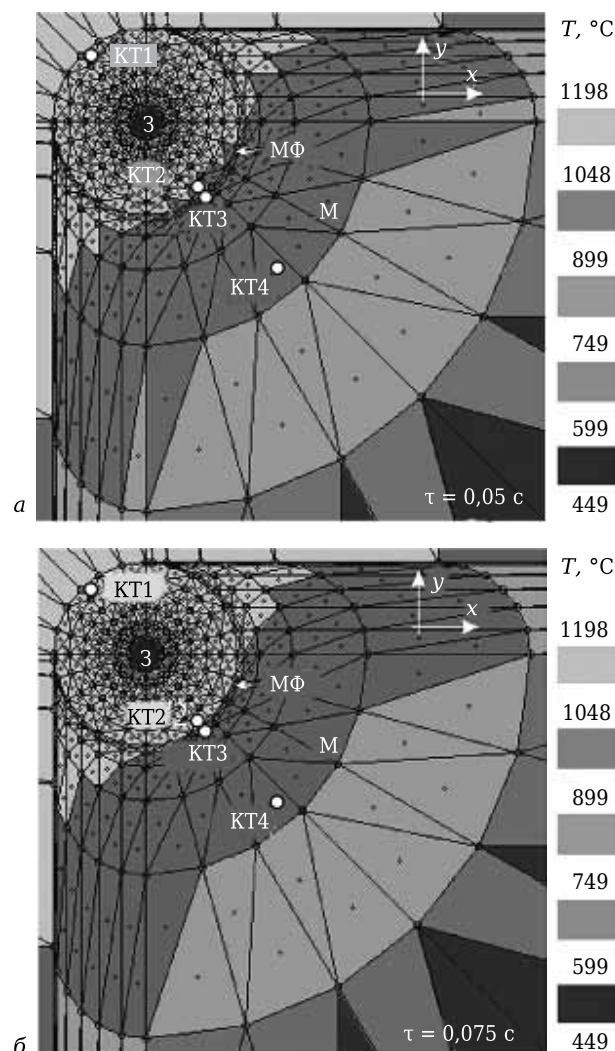


Рис. 2. Температурные поля в разных КТ конструкции системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП через разное время нагрева τ при $Q = 1,5 \cdot 10^8$ Вт/м²; $h = 10^5$ Вт/(м²·град)

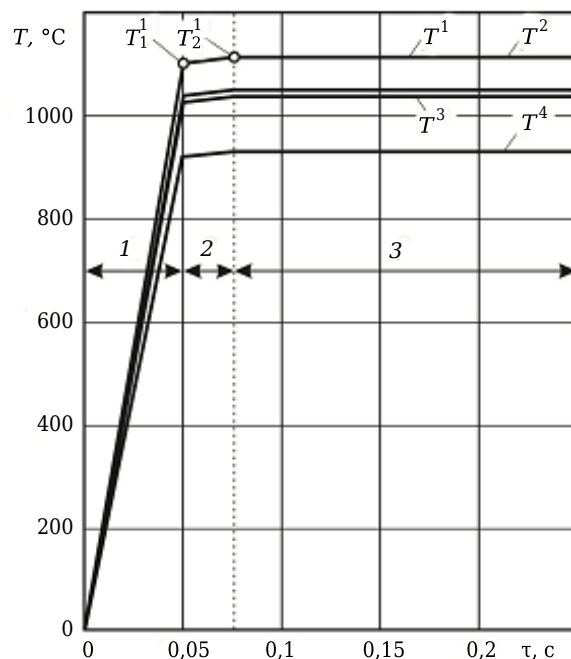


Рис. 3. Влияние времени нагрева τ на температуру в разных КТ конструкции системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП при $Q = 1,5 \cdot 10^8$ Вт/м²; $h = 10^5$ Вт/(м²·град)

Установлено, что уровень температур и интенсивность прироста температуры в каждом последующем характеристическом диапазоне уменьшается по мере удаления КТ от границы керамика – никелевый сплав. Наибольшие температуры и скорость нагрева во всех характеристических диапазонах в КТ1, а наименьшие — в КТ4. Наибольшие температуры зафиксированы в КТ1, температура первоначально повышается до 1058 °С, затем — до 1113 °С и на этом уровне стабилизируется. В КТ2 температура первоначально повышается до 1008 °С, затем — до 1049 °С, после чего стабилизируется. В КТ3, расположенной в межзеренной фазе, температура первоначально повышается до 1001 °С, затем — до 1040 °С и на этом уровне стабилизируется. В наиболее удаленной от поверхности приложения теплового потока КТ4, расположенной в матрице, температура до стабилизации первоначально повышается до 893 °С, затем — до 920 °С. Отношение температур T_2 / T_1 составляет 1,052, 1,041, 1,038 и 1,031 в КТ1, КТ2, КТ3 и КТ4 соответственно.

На втором этапе работы моделировали напряженно-деформированное состояние конструкции системы TiC – MgO – Al₂O₃ – ЭП741НП для варианта свободной (но без зазора) установки детали Д1 в деталь Д2. В этом случае конструкцию, которая характеризуется полным отсутствием напряжений в исходном состоянии, нагружали только тепловым потоком. Под действием симметричной тепловой нагрузки происходила упругая деформация конструкции в виде увеличения диаметра и «выдавливания» зерна (рис. 4).

В результате столь существенной деформации конструкции формировалась сложная картина напряжений при нагреве (рис. 5). Однако задача анализа характера изменения напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i ($\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 4\sigma_{12}^2}$) в разных КТ значительно упрощается в том случае, когда время нагрева условно разделено на три характеристических диапазона, выявленных при исследовании температуры.

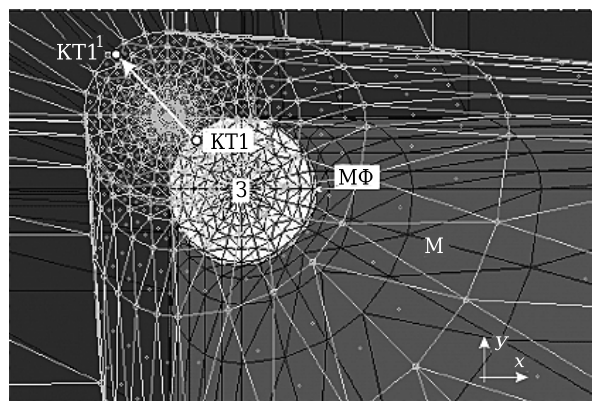


Рис. 4. Схема деформации конструкции системы TiC – MgO – Al₂O₃ – ЭП741НП под действием симметричного теплового потока $Q = 1,5 \cdot 10^8$ Вт/м² при $h = 10^5$ Вт/(м²·град)

Общим признаком для всех кривых является резкое повышение температуры в характеристическом диапазоне 1, которое приводит к значительному увеличению напряжений σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} . В результате столь резкого роста этих напряжений также повышается интенсивность напряжений σ_i . В характеристическом диапазоне 2 зафиксирован разный характер изменения напряжений. Поэтому подробно проанализируем влияние времени нагрева на напряжения в разных КТ конструкции системы TiC – MgO – Al₂O₃ – ЭП741НП в этих характеристических диапазонах.

Установлено, что в КТ1 формируются наименьшие напряжения по отношению к этим показателям других КТ (рис. 5, а). В характеристическом диапазоне 1 напряжения σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} увеличиваются от 0 до 173, 142 и уменьшаются до -69 МПа соответственно. По этой причине происходит увеличение интенсивности напряжений σ_i до 200 МПа. В диапазоне 2 показатели σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} уменьшаются до 170, 138 и -66 МПа соответственно. В характеристическом диапазоне 3 показатели σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} выходят на стационарный режим при значениях 170, 138 и -66 МПа. Интенсивность напряжений σ_i в КТ1 через 0,09 с после начала нагрева достигает значения 196 МПа и стабилизируется на этом уровне.

Напряжения σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} в КТ2 увеличиваются от 0 до 3 и уменьшаются до -27 и -224 МПа со-

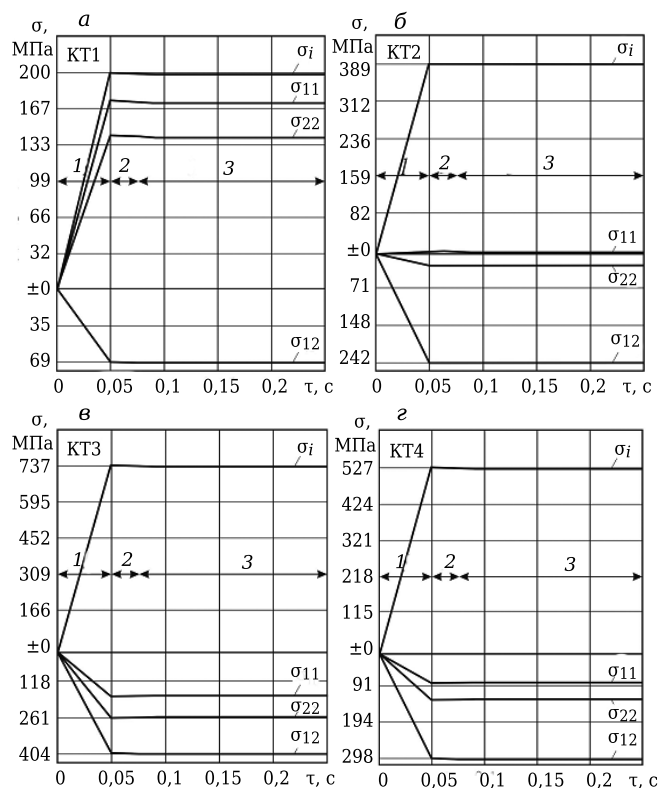


Рис. 5. Влияние времени нагрева τ на напряжения σ в КТ1–КТ4 конструкции системы TiC – MgO – Al₂O₃ – ЭП741НП при $Q = 4 \cdot 10^8$ Вт/м², $h = 10^5$ Вт/(м²·град)

ответственно в характеристическом диапазоне 1 (рис. 5, б). По этой причине происходит увеличение интенсивности напряжений σ_i до 389 МПа. В диапазоне 2 показатели σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} уменьшаются до 2, -23 и -218 МПа соответственно, в диапазоне 3 они выходят на стационарный режим на этом же уровне. Интенсивность напряжений σ_i в КТ2 через 0,09 с после начала нагрева достигает значения 382 МПа и на этом уровне стабилизируется.

В КТ3 зафиксированы наибольшие напряжения по сравнению с достигнутыми в других КТ. В характеристическом диапазоне 1 напряжения σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} уменьшаются от 0 до -176, -263 и -404 МПа соответственно (рис. 5, в). В результате происходит увеличение интенсивности напряжений σ_i до 737 МПа. В диапазоне 2 показатели σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} имеют значения -170, -255 и -396 МПа соответственно, в диапазоне 3 они выходят на стационарный режим на этом же уровне. Интенсивность напряжений σ_i в КТ2 через 0,09 с после начала нагрева уменьшается до 715 МПа и стабилизируется на этом уровне.

Наименее чувствительна к нагреву наиболее удаленная КТ4, стабилизация напряжений происходит уже через 0,05 с в характеристическом диапазоне 2. В этой КТ в характеристическом диапазоне 1 напряжения σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} уменьшаются от 0 до -81, -128 и -298 МПа соответственно (рис. 5, г). Вследствие этого σ_i в КТ4 увеличивается до 527 МПа и на этом уровне стабилизируется.

На третьем этапе работы моделировали напряженно-деформированное состояние конструкции системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП для случая детали Д1, запрессованной в деталь Д2. Конструкция характеризуется исходной деформацией и напряжениями, которые сформировались под действием силовых нагрузок технологического характера. Основные закономерности влияния силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние керамики достаточно подробно рассмотрены в работах [14–16]. Под действием комбинированного нагружения напряженно-деформированное состояние керамики претерпевает существенные и очень часто непредсказуемые изменения [17]. В этой связи детально проанализируем результаты численных экспериментов.

Под действием симметричной силовой нагрузки происходит деформация конструкции в виде уменьшения диаметра детали Д1 за счет «вдавливания» зерна. Значения напряжений σ'_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i , сформировавшихся в этом случае, приведены в табл. 3. В результате существенной деформации исходной конструкции принципиально изменяется ее напряженное состояние при нагреве по сравнению со случаем свободной установки детали Д1 в детали Д2.

Общим признаком изменения формы всех кривых при совместном действии силовых и тепловых нагрузок является то, что нагрев при-

водит к существенному изменению значений напряжений σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} в первом характеристическом диапазоне 1 (рис. 6). Однако значения напряжений в разных КТ конструкции системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП изменяются неодинаково, поэтому проанализируем в характеристических диапазонах характер изменения напряжений последовательно в каждой КТ.

Установлено, что в КТ1 в характеристическом диапазоне 1 нормальные напряжения σ_{11} и σ_{22} увеличиваются от 64 до 230 и от 34 до 160 МПа соответственно, а касательные напряжения σ_{12} уменьшаются от 334 до 237 МПа (см. рис. 6, а). В результате значение интенсивности напряжений σ_i уменьшается от 581 до 468 МПа. В диапазоне 2 значения σ_{11} , σ_{22} и σ_i уменьшаются до 221, 153 и 457 МПа соответственно, а значение σ_{12} не изменяется и стабилизируется на уровне 237 МПа. В характеристическом диапазоне 3 показатели σ_{11} и σ_{22} также выходят на

Таблица 3. Значения напряжений под действием симметричной силовой нагрузки

КТ	σ'_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_i
1	64	34	334	581
2	-17	-21	208	360
3	-56	-50	178	312
4	-41	-49	169	297

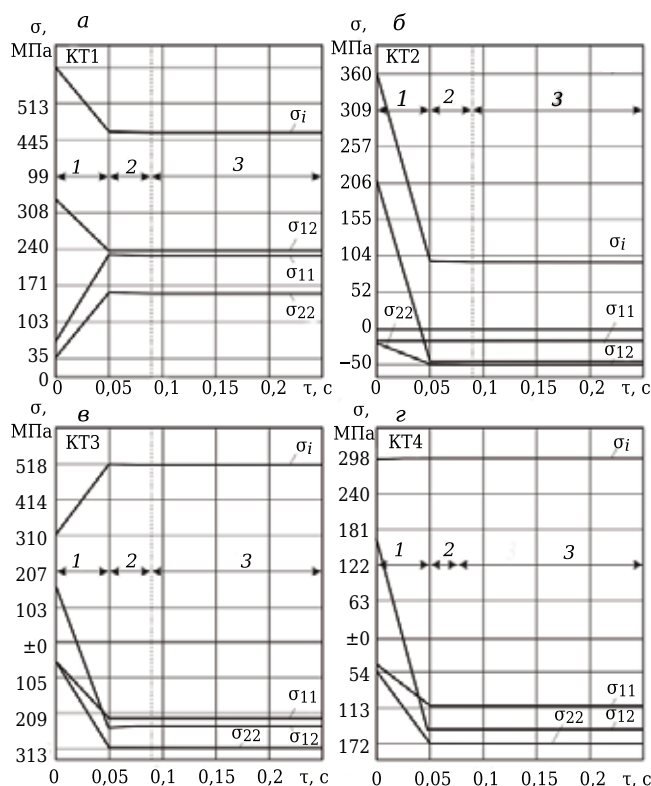


Рис. 6. Влияние времени нагрева t на напряжения σ в КТ1—КТ4 конструкции системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП при $P = 2 \cdot 10^8$ Па, $Q = 4 \cdot 10^8$ Вт/м², $h = 10^5$ Вт/(м²·град)

стационарный режим. Интенсивность напряжений σ_i в КТ1 через 0,09 с после начала нагрева достигает значения 457 МПа и стабилизируется на этом уровне.

В результате численных экспериментов установлено, что нагрев не влияет на нормальные напряжения σ_{11} в КТ2. Нормальные напряжения σ_{22} уменьшаются от -21 до -49 МПа в характеристическом диапазоне 1, а касательные напряжения σ_{12} уменьшаются от 208 до -48 МПа и стабилизируются на этом уровне (см. рис. 6, б). В результате значение интенсивности напряжений σ_i уменьшается от 360 до 101 МПа. В диапазоне 2 значения σ_{22} и σ_i достигают значений -50 и 94 МПа соответственно, а значение σ_{12} не изменяется и стабилизируется на уровне -48 МПа. В характеристическом диапазоне 3 показатель σ_{22} также выходит на стационарный режим. Интенсивность напряжений σ_i в КТ1 конструкции системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП через 0,09 с после начала нагрева достигает значения 94 МПа и стабилизируется на этом уровне.

В КТ3 зафиксированы наибольшие напряжения по сравнению с этими показателями других КТ. В характеристическом диапазоне 1 напряжения σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} уменьшаются от -56 до -227, от -50 до -313 МПа и от 178 до -252 соответственно (рис. 6, в). В результате происходит увеличение σ_i от 312 до 518 МПа. В диапазоне 2 показатели σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} увеличиваются до -218, -305 и -240 МПа соответственно, в диапазоне 3 они выходят на стационарный режим на этом же уровне. Интенсивность напряжений σ_i в КТ3 через 0,09 с после начала нагрева уменьшается до 509 МПа и стабилизируется на этом уровне.

Установлено, что в КТ4 время нагрева не изменяет σ_i , которое фиксируется на уровне 297-298 МПа. В характеристическом диапазоне 1 напряжения σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} уменьшаются от -41 до -116, от -49 до -172 МПа и от 169 до -149 соответственно, причем σ_{22} и σ_{12} стабилизируются на этом уровне в диапазоне 2 (см. рис. 6, г). В диапазоне 2 напряжения σ_{11} увеличиваются до 118 МПа, в диапазоне 3 они выходят на стационарный режим на этом же уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение поставленной задачи обеспечила созданная оригинальная методика, в основе которой находятся микроструктурная модель, расчетная схема и математическая модель контактирующих деталей.

Установлено, что кривая, описывающая влияние времени нагрева на изменение температуры в разных КТ конструкции системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП, имеет три характеристических диапазона. В характеристическом диапазоне 1 ($\tau = 0,05$ с) температура резко увеличивается;

в диапазоне 2 ($\tau = 0,025$ с) температура плавно увеличивается и в диапазоне 3 (через $\tau = 0,075$ с после начала нагрева) температура стабилизируется, конструкция выходит на стационарный тепловой режим. Наибольшие температуры и скорость нагрева во всех характеристических диапазонах зафиксированы в КТ1, а наименьшие — в КТ4.

Моделирование напряженно-деформированного состояния этой системы для случая свободной установки детали Д1 в деталь Д2 показало, что резкое повышение температуры в характеристическом диапазоне 1 приводит к значительному увеличению напряжений σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i . Однако в характеристическом диапазоне 2 зафиксирован разнонаправленный характер изменения напряжений. Наименьшие напряжения формируются в КТ1, наибольшие — в КТ3. Наименее продолжительная стабилизация напряжений (через 0,05 с) происходит в наиболее удаленной КТ4.

Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции системы TiC - MgO - Al₂O₃ - ЭП741НП для случая детали Д1, запрессованной в деталь Д2 (действуют силовая нагрузка технологического характера и тепловой поток эксплуатационного характера) показало, что нагрев приводит к существенному и неоднозначному изменению напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в характеристическом диапазоне 1. Например, в КТ1 все напряжения уменьшаются, в КТ3 — увеличиваются, в других КТ выявлено разнонаправленное изменение напряжений. В диапазоне 2 зафиксированы незначительные изменения напряжений. В диапазоне 3 напряжения выходят на стационарный режим. В КТ3 зафиксированы наибольшие напряжения по сравнению с показателями других КТ, в КТ4 время нагрева не изменяет интенсивность напряжений σ_i .

Выявленные особенности тепловых и деформационных процессов в поверхностном слое детали из оксидно-карбидной керамики, имеющей разные условия контакта с деталью из никелевого сплава ЭП741НП, при нагреве необходимо учитывать при проектировании узлов технологического оборудования.

Статья подготовлена при поддержке Минобрнауки России при выполнении научно-исследовательской работы в рамках государственного задания.

Библиографический список

1. **Туголуков, Е. Н.** Математическое моделирование технологического оборудования многоассортиментных химических производств / Е. Н. Туголуков. — М. : Машиностроение-1, 2004. — 100 с.
2. **Полежаев, Ю. В.** Проблемы нестационарного прогрева теплозащитных материалов / Ю. В. Полежаев,

В. Е. Китих, Ю. Г. Нарожный // ИФЖ. — 1975. — Т. 29, № 1. — С. 39–54.

3. **Эванс, А. Г.** Конструкционная керамика / А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон : пер. с англ. — М. : Металлургия, 1980. — 256 с.

4. **Балкевич, В. Л.** Техническая керамика / В. Л. Балкевич. — М. : Стройиздат, 1984. — 256 с.

5. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 52–57.

6. **Писаренко, Г. С.** Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. — Киев : Наукова думка, 1976. — 416 с.

7. **Григорьев, С. Н.** Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 5. — С. 68–71.

8. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 2. Влияние теплового нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 35–39.

9. **Григорьев, С. Н.** Влияние свойств керамики на напряженно-деформированное состояние режущей пластины в условиях установившейся теплопроводности / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 4. — С. 76–80.

10. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.

11. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термомпрочностных расчетов керамических режущих пла-

стин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченков, В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 26–31.

12. **Кузин, В. В.** Математическая модель напряженно-деформированного состояния керамической режущей пластины / В. В. Кузин, В. И. Мяченков // Вестник машиностроения. — 2011. — № 10. — С. 75–80.

13. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigoriev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — pp. 32–35.

14. **Григорьев, С. Н.** Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 1. — С. 67–71.

15. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 1. Влияние сложного механического нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 47–51.

16. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 3. Влияние распределенной силовой нагрузки / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 1. — С. 42–46.

17. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 4. Влияние комбинированного нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 29–34. ■

Получено 14.01.14
© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. А. Волосова, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Место проведения: Россия, Москва,
Центральный выставочный комплекс
«Экспоцентр»

16-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА СТЕКЛОПРОДУКЦИИ, ТЕХНОЛОГИЙ
И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СТЕКЛА

МИР СТЕКЛА

Производство. Архитектура. Декор

4—6 июня 2014

Тематика:

- Производство стекла - Обработка стекла - Области применения стекла - Инструмент, вспомогательное оборудование - Контрольно-измерительное, регулирующее оборудование. Программное обеспечение	- Транспортировка и хранение стекла - Проектные мастерские, научно-исследовательские институты, учебные заведения, отраслевые союзы и ассоциации - Специализированные издания, пресса
--	---

www.mirstekla-expo.ru