

Д. т. н. В. В. Кузин (✉), к. т. н. М. Ю. Фёдоров, к. т. н. М. А. Волосова

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

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

## ТРАНСФОРМАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОЛЩИНЫ TiC-ПОКРЫТИЯ. ВАРИАНТ НАГРУЖЕНИЯ — ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Изучено влияние толщины покрытия из карбида титана на трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамики под действием теплового потока. В результате численных экспериментов установлено, что увеличение толщины TiC-покрытия с 5 до 15 мкм, нанесенного на нитридную керамику, приводит к уменьшению температуры керамики, возрастанию  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  и показателей их структурной неоднородности в поверхностном слое керамики.

**Ключевые слова:** нитридная керамика, покрытие, структурная неоднородность напряжений, тепловой поток, поверхностный слой.

### ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в сфере изделий для высокотемпературного применения во многом зависит от успехов в создании новых керамических материалов многофункционального назначения [1–3]. Комплекс свойств керамики на основе нитрида кремния обеспечивает ее эффективное применение в горячих зонах двигателей и энергоустановок, а также соплах, горелках и инструментах [4–6]. При этом не только уменьшается износ этих конструктивных элементов и инструментов, но и интенсифицируются условия их эксплуатации [7–10]. Дополнительные преимущества нитридной керамики предоставляют покрытия со специальными свойствами, наносимые на рабочие поверхности деталей и инструментов [11, 12]. Эти преимущества базируются на совокупности физических эффектов, которые подробно проанализированы в работе [13].

Однако интуитивное понимание этих положительных эффектов оказывается недостаточным при создании инновационных керамических деталей и инструментов. Разработчикам новой техники необходимы более глубокие знания о сложных процессах, протекающих в нитридной керамике с покрытием при высоких температурах [14]. Особенно актуальны сведения о тепловом и напряженном состоянии поверхностного слоя керамики системы керамика

– покрытие [15–17]. Однако выявление взаимосвязей в этой системе довольно сложная задача из-за существенного влияния многочисленных факторов на ее состояние [18, 19]. Частично задача решена в работах [20, 21]. Однако за рамками этих исследований остался вопрос влияния толщины покрытия на напряженное состояние керамики.

В данной работе поставлена цель — исследовать трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя керамики на основе нитрида кремния, находящейся под действием теплового потока, при изменении толщины TiC-покрытия. Настоящая статья является продолжением работ [22, 23].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении численных экспериментов использовали расчетную схему и методику, приведенные в работе [22]. Исследовали керамику системы  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$  с покрытием TiC толщиной 5, 10 и 15 мкм. К поверхности покрытия прикладывали тепловой поток  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, а с поверхности, свободной от теплового потока, осуществляли теплоотвод с коэффициентом  $h = 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Определяли напряжения  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$ , и интенсивность напряжений  $\sigma_i$  в поверхностном слое основных структурных элементов керамики — зерна (З), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (МФЗ), межзеренной фазы, примыкающей к матрице (МФМ), и поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (М). Использовали метод контрольных точек (КТ), которые были расположены на этих поверхностях [24]. Структурную неоднородность напряжений в поверхностном слое элементов



В. В. Кузин  
E-mail: kyzena@post.ru

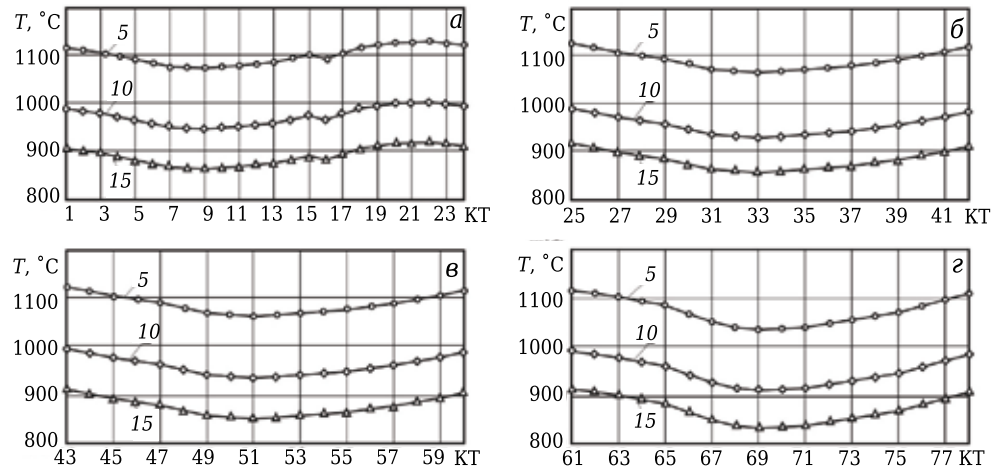
керамики характеризовали следующими показателями: наибольшее  $\sigma_{\max}$ , наименьшее  $\sigma_{\min}$  и среднее  $\sigma_{\text{ср}}$  значения, диапазон изменения  $\Sigma$ , стандартное отклонение  $s$  и число  $N$  изменений знака для  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$ .

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Влияние толщины TiC-покрытия на температуры, формирующиеся в КТ поверхностей 3, МФЗ, МФМ и М под действием теплового потока  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, показано на рис. 1. Видно, что с увеличением толщины покрытия от 5 до 15 мкм температура в поверхностном слое керамики заметно уменьшается. Например, ее максимальные значения  $T_{\max}$  в поверхностном слое 3 (рис. 1, а), МФЗ (рис. 1, б), МФМ (рис. 1, в) и М (рис. 1, г) уменьшаются с 1125 до 921 °С, с 1116 до 914 °С, 1115 до 912 °С и 1113 до 911 °С соответственно при увеличении толщины покрытия  $\Delta_n$  от 5 до 15 мкм.

Результаты расчетов  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхностном слое 3 под действием теплового потока  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> показаны на рис. 2. Установлено, что напряжения  $\sigma_{11}$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяются в диапазоне 252 МПа — от 3 (КТ24) до -249 МПа (КТ13) при  $\sigma_{\text{ср}} = -146$  МПа,  $s = 91$  МПа и  $N = 1$  (рис. 2, а). При  $\Delta_n = 10$  мкм образуются  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 268 МПа — от -16 (КТ23) до -284 МПа (КТ16) при  $\sigma_{\text{ср}} = -162$  МПа,  $s = 95$  МПа и  $N = 0$ . При  $\Delta_n = 15$  мкм формируются  $\sigma_{11}$  с диапазоном изменения 276 МПа — от -3 (КТ23) до -279 МПа (КТ16) при  $\sigma_{\text{ср}} = -152$  МПа,  $s = 98$  МПа и  $N = 0$ .

Напряжения  $\sigma_{22}$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяются в диапазоне 260 МПа — от 26 (КТ19) до -234 МПа (КТ4) при  $\sigma_{\text{ср}} = -87$  МПа,  $s = 82$  МПа и  $N = 2$  (рис. 2, б). При  $\Delta_n = 10$  мкм в поверхностном слое зерна формируются  $\sigma_{22}$  с диапазоном изменения 290 МПа — от 21 (КТ17) до -269 МПа (КТ4) при

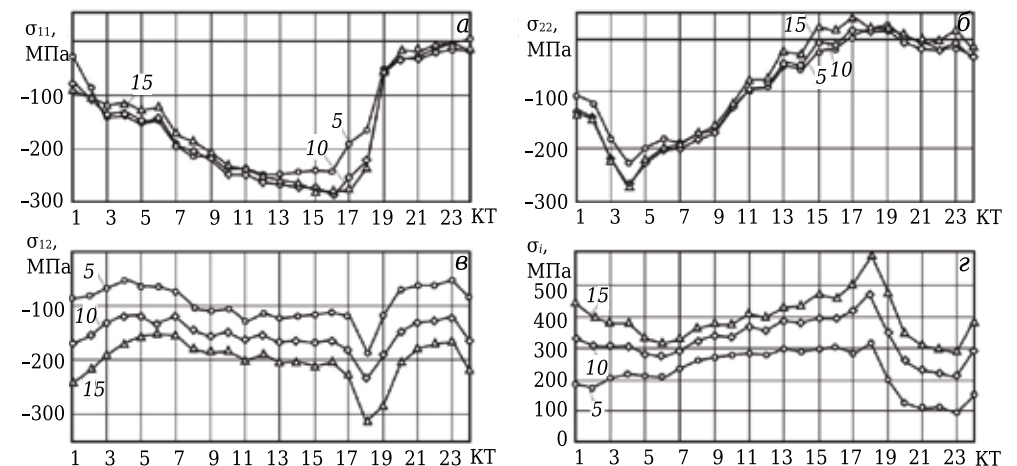


**Рис. 1.** Влияние толщины TiC-покрытия на температуру  $T$  в поверхностных слоях 3 (а), МФЗ (б), МФМ (в) и М (г) в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiC- $\text{Y}_2\text{O}_3$ -керамике;  $\Delta_n$  указана на кривых, мкм

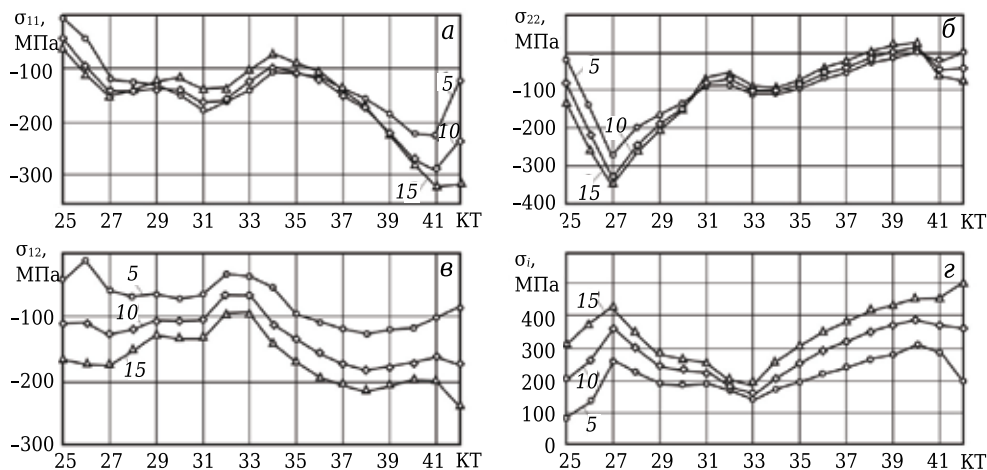
$\sigma_{\text{ср}} = -91$  МПа,  $s = 92$  МПа и  $N = 2$ . При  $\Delta_n = 15$  мкм образуются  $\sigma_{22}$ , изменяющиеся в диапазоне 316 МПа — от 43 (КТ17) до -273 МПа (КТ4) при  $\sigma_{\text{ср}} = -80$  МПа,  $s = 99$  МПа и  $N = 3$ .

Напряжения  $\sigma_{12}$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяются в диапазоне 129 МПа — от -55 (КТ4) до -184 МПа (КТ18) при  $\sigma_{\text{ср}} = -96$  МПа,  $s = 31$  МПа и  $N = 0$  (рис. 2, в). При  $\Delta_n = 10$  мкм образуются  $\sigma_{12}$ , изменяющиеся в диапазоне 123 МПа — от -118 (КТ5) до -241 МПа (КТ18) при  $\sigma_{\text{ср}} = -156$  МПа,  $s = 28$  МПа и  $N = 0$ . При  $\Delta_n = 15$  мкм формируются  $\sigma_{12}$ , которые изменяются в диапазоне 161 МПа — от -147 (КТ6) до -308 МПа (КТ18) при  $\sigma_{\text{ср}} = -198$  МПа,  $s = 38$  МПа и  $N = 0$ .

Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяется в диапазоне 219 МПа — от 96 (КТ23) до 315 МПа (КТ18) при  $\sigma_{\text{ср}} = 226$  МПа,  $s = 69$  МПа (рис. 2, г). При  $\Delta_n = 10$  мкм диапазон изменения  $\sigma_i$  составляет 264 МПа — от 209 (КТ23) до 473 МПа (КТ18) при  $\sigma_{\text{ср}} = 327$  МПа,  $s = 65$  МПа. При  $\Delta_n = 15$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в ди-



**Рис. 2.** Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя 3 в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiC- $\text{Y}_2\text{O}_3$ -керамике;  $\Delta_n$  указана на кривых, мкм



**Рис. 3.** Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя МФЗ в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-керамике; Δ<sub>п</sub> указана на кривых, мкм

апазоне 301 МПа — от 286 (КТ23) до 587 МПа (КТ18) при σ<sub>ср</sub> = 392 МПа, s = 73 МПа.

Результаты расчетов σ<sub>11</sub>, σ<sub>22</sub>, σ<sub>12</sub> и σ<sub>i</sub> в поверхностном слое МФЗ показаны на рис. 3. Установлено, что напряжения σ<sub>11</sub> при Δ<sub>п</sub> = 5 мкм изменяются в диапазоне 216 МПа — от -4 (КТ25) до -220 МПа (КТ41) при σ<sub>ср</sub> = -133 МПа, s = 53 МПа и N = 0 (рис. 3, а). При Δ<sub>п</sub> = 10 мкм формируются σ<sub>11</sub>, изменяющиеся в диапазоне 242 МПа — от -43 (КТ25) до -285 МПа (КТ41) при σ<sub>ср</sub> = -153 МПа, s = 62 МПа и N = 0. При Δ<sub>п</sub> = 15 мкм формируются σ<sub>11</sub> с диапазоном изменения 254 МПа — от -64 (КТ25) до -318 МПа (КТ41) при σ<sub>ср</sub> = -155 МПа, s = 77 МПа и N = 0.

Напряжения σ<sub>22</sub> при Δ<sub>п</sub> = 5 мкм изменяются в диапазоне 280 МПа — от 5 (КТ40) до -275 МПа (КТ27) при σ<sub>ср</sub> = -87 МПа, s = 75 МПа и N = 3 (рис. 3, б). При Δ<sub>п</sub> = 10 мкм формируются σ<sub>22</sub> с диапазоном изменения 347 МПа — от 17 (КТ40) до -330 МПа (КТ27) при σ<sub>ср</sub> = -100 МПа, s = 92 МПа и N = 2. При Δ<sub>п</sub> = 15 мкм образуются σ<sub>22</sub>, изменяющиеся в диапазоне 381 МПа — от 33

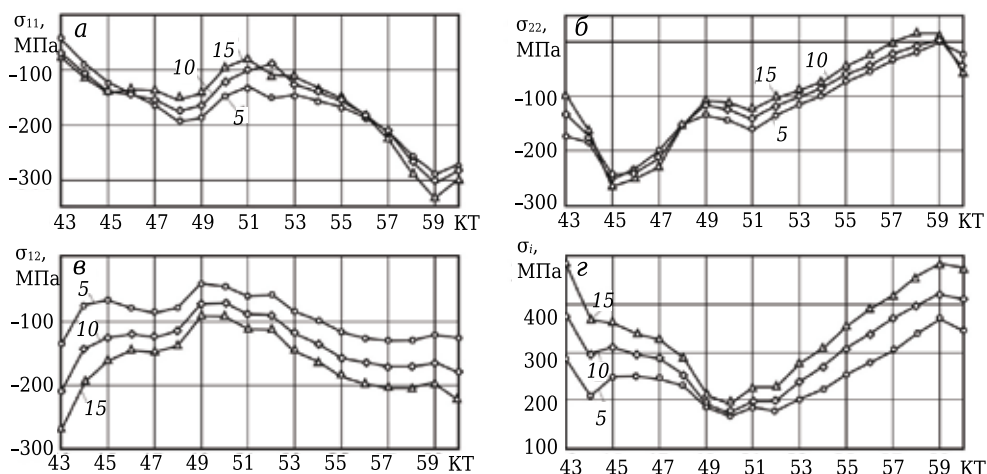
s = 37 МПа и N = 0. При Δ<sub>п</sub> = 15 мкм формируются напряжения с диапазоном изменения 147 МПа — от -92 (КТ32) до -239 МПа (КТ42) при σ<sub>ср</sub> = -168 МПа, s = 41 МПа и N = 0.

Интенсивность напряжений σ<sub>i</sub> в этом поверхностном слое при Δ<sub>п</sub> = 5 мкм изменяется в диапазоне 221 МПа — от 84 (КТ25) до 305 МПа (КТ40) при σ<sub>ср</sub> = 204 МПа, s = 58 МПа (рис. 3, г). При Δ<sub>п</sub> = 10 мкм диапазон изменения σ<sub>i</sub> составляет 232 МПа — от 162 (КТ33) до 394 МПа (КТ40) при σ<sub>ср</sub> = 287 МПа, s = 75 МПа. При Δ<sub>п</sub> = 15 мкм σ<sub>i</sub> изменяется в диапазоне 319 МПа — от 184 (КТ33) до 503 МПа (КТ42) при σ<sub>ср</sub> = 344 МПа, s = 93 МПа.

Результаты расчетов σ<sub>11</sub>, σ<sub>22</sub>, σ<sub>12</sub> и σ<sub>i</sub> в поверхностном слое МФМ показаны на рис. 4. При Δ<sub>п</sub> = 5 мкм в этом слое формируются напряжения σ<sub>11</sub>, изменяющиеся в диапазоне 243 МПа — от -46 (КТ43) до -289 МПа (КТ59) при σ<sub>ср</sub> = -170 МПа, s = 61 МПа и N = 0 (рис. 4, а). При Δ<sub>п</sub> = 10 мкм образуются σ<sub>11</sub>, изменяющиеся в диапазоне Σ = 235 МПа от -75 (КТ43) до -310 МПа (КТ59)

при σ<sub>ср</sub> = -166 МПа, s = 66 МПа и N = 0. При Δ<sub>п</sub> = 15 мкм формируются σ<sub>11</sub> с диапазоном изменения 253 МПа от -79 (КТ43) до -332 МПа (КТ59) при σ<sub>ср</sub> = -162 МПа, s = 75 МПа и N = 0.

Напряжения σ<sub>22</sub> при Δ<sub>п</sub> = 5 мкм изменяются в диапазоне 246 МПа — от -2 (КТ59) до -248 МПа (КТ45) при σ<sub>ср</sub> = -122 МПа, s = 74 МПа и N = 0 (рис. 4, б). При Δ<sub>п</sub> = 10 мкм формируются σ<sub>22</sub> с



**Рис. 4.** Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя МФМ в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-керамике; Δ<sub>п</sub> указана на кривых, мкм

диапазоном изменения 251 МПа — от 5 (КТ59) до -246 МПа (КТ45) при  $\sigma_{cp} = -111$  МПа,  $s = 75$  МПа и  $N = 2$ . При  $\Delta_n = 15$  мкм образуются  $\sigma_{22}$ , изменяющиеся в диапазоне 276 МПа — от 18 (КТ59) до -258 МПа (КТ45) при  $\sigma_{cp} = -102$  МПа,  $s = 84$  МПа и  $N = 2$ .

Напряжения  $\sigma_{12}$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяются в диапазоне 93 МПа — от -43 (КТ49) до -136 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = -93$  МПа,  $s = 31$  МПа и  $N = 0$  (рис. 4, в). При  $\Delta_n = 10$  мкм образуются  $\sigma_{12}$ , изменяющиеся в диапазоне 137 МПа — от -73 (КТ49) до -210 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = -136$  МПа,  $s = 39$  МПа и  $N = 0$ . При  $\Delta_n = 15$  мкм формируются  $\sigma_{12}$  с диапазоном изменения 178 МПа — от -96 (КТ49) до -274 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = -170$  МПа,  $s = 96$  МПа и  $N = 0$ .

Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяется в диапазоне 201 МПа — от 164 (КТ50) до 365 МПа (КТ59) при  $\sigma_{cp} = 246$  МПа,  $s = 61$  МПа (рис. 4, г). При  $\Delta_n = 10$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 246 МПа — от 176 (КТ50) до 422 МПа (КТ59) при  $\sigma_{cp} = 298$  МПа,  $s = 78$  МПа. При  $\Delta_n = 15$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 292 МПа — от 196 (КТ50) до 488 МПа (КТ59) при  $\sigma_{cp} = 346$  МПа,  $s = 96$  МПа.

Результаты расчетов  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхностном слое М показаны на рис. 5. Установлено, что при  $\Delta_n = 5$  мкм в этом поверхностном слое формируются  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 411 МПа — от -99 (КТ67) до 312 МПа (КТ61) при  $\sigma_{cp} = 124$  МПа,  $s = 124$  МПа и  $N = 3$  (рис. 5, а). При  $\Delta_n = 10$  мкм образуются  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 435 МПа — от -78 (КТ67) до 357 МПа (КТ61) при  $\sigma_{cp} = 164$  МПа,  $s = 145$  МПа и  $N = 3$ . При  $\Delta_n = 15$  мкм формируются  $\sigma_{11}$  с диапазоном изменения 474 МПа — от -96 (КТ78) до 378 МПа (КТ61) при  $\sigma_{cp} = 190$  МПа,  $s = 153$  МПа и  $N = 2$ .

Напряжения  $\sigma_{22}$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяются в диа-

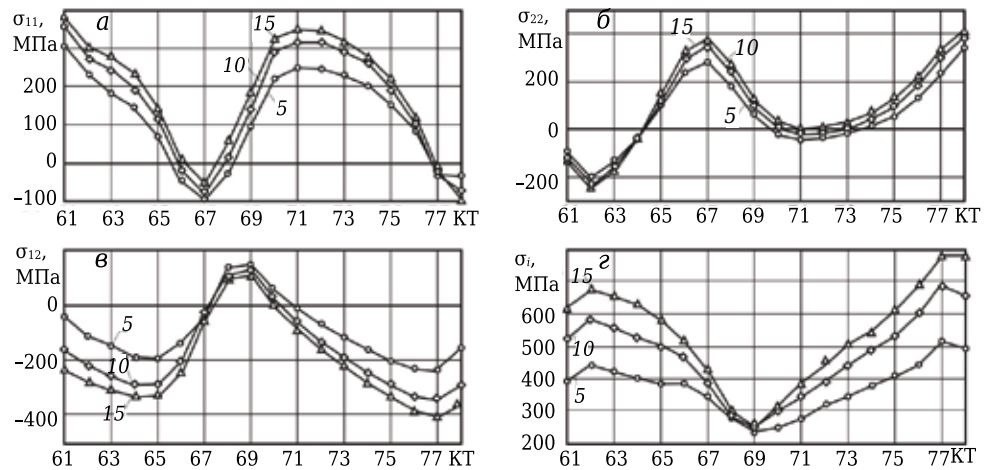


Рис. 5. Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя М в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-керамике; Δ<sub>п</sub> указана на кривых, мкм

пазоне 545 МПа — от -202 (КТ62) до 343 МПа (КТ78) при  $\sigma_{cp} = 66$  МПа,  $s = 151$  МПа и  $N = 3$  (рис. 5, б). При  $\Delta_n = 10$  мкм формируются  $\sigma_{22}$  с диапазоном изменения 634 МПа — от -236 (КТ62) до 398 МПа (КТ78) при  $\sigma_{cp} = 84$  МПа,  $s = 181$  МПа и  $N = 3$ . При  $\Delta_n = 15$  мкм образуются  $\sigma_{22}$ , изменяющиеся в диапазоне 657 МПа — от -244 (КТ62) до 413 МПа (КТ78) при  $\sigma_{cp} = 102$  МПа,  $s = 192$  МПа и  $N = 2$ .

Напряжения  $\sigma_{12}$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяются в диапазоне 385 МПа — от 123 (КТ69) до -262 МПа (КТ77) при  $\sigma_{cp} = -118$  МПа,  $s = 116$  МПа и  $N = 2$  (рис. 5, в). При  $\Delta_n = 10$  мкм образуются  $\sigma_{12}$ , изменяющиеся в диапазоне 475 МПа — от 119 (КТ69) до -356 МПа (КТ77) при  $\sigma_{cp} = -175$  МПа,  $s = 147$  МПа и  $N = 2$ . При  $\Delta_n = 15$  мкм формируются  $\sigma_{12}$  с диапазоном изменения 519 МПа — от 107 (КТ69) до -412 МПа (КТ77) при  $\sigma_{cp} = -215$  МПа,  $s = 162$  МПа и  $N = 2$ .

Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяется в диапазоне 282 МПа — от 229 (КТ69) до 511 МПа (КТ77) при  $\sigma_{cp} = 369$  МПа,  $s =$

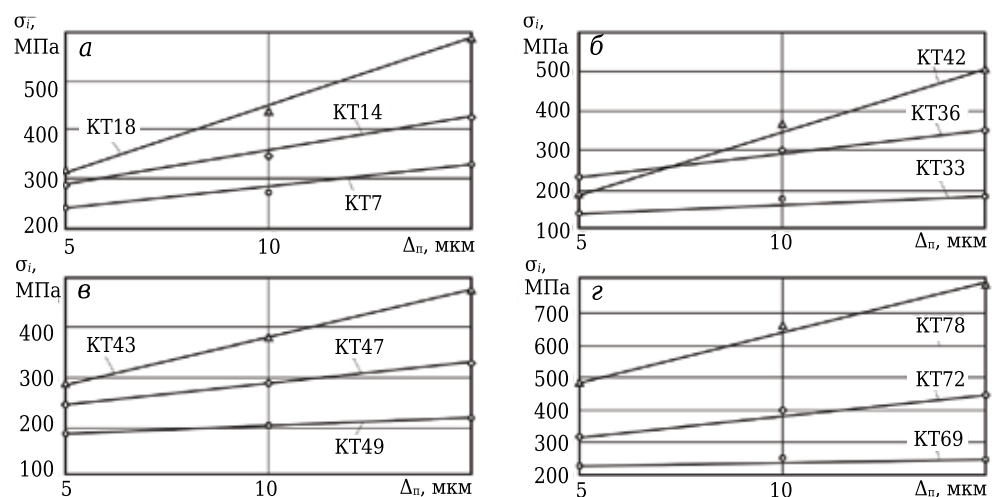


Рис. 6. Влияние толщины TiC-покрытия на  $\sigma_i$  в КТ поверхностных слоев 3 (а), МФЗ (б), МФМ (в) и М (г)

Показатели	$\sigma_{11}$			$\sigma_{22}$			$\sigma_{12}$			$\sigma_i$		
	при толщине покрытия $\Delta_n$ , мкм											
	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
<i>Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе</i>												
$\Sigma$	252	268	276	260	290	316	129	123	161	219	264	301
$\sigma_{\text{макс}}$	-249	-284	-279	-234	-269	-273	-184	-241	-308	315	473	587
$\sigma_{\text{мин}}$	3	-16	-3	26	21	43	-55	-118	-147	96	209	286
$\sigma_{\text{ср}}$	-146	-162	-152	-87	-91	-80	-96	-156	-198	226	327	392
$N$	1	0	0	2	2	3	0	0	0	-	-	-
$s$	91	95	98	82	92	99	31	28	38	69	65	73
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну</i>												
$\Sigma$	216	242	254	280	347	381	112	118	147	221	232	319
$\sigma_{\text{макс}}$	-220	-285	-318	-275	-330	-348	-126	-184	-239	305	394	503
$\sigma_{\text{мин}}$	-4	-43	-64	5	17	33	-14	-66	-92	84	162	184
$\sigma_{\text{ср}}$	-133	-153	-155	-87	-100	-99	-78	-132	-168	204	287	344
$N$	0	0	0	3	2	2	0	0	0	-	-	-
$s$	53	62	77	75	92	105	33	37	41	58	75	93
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице</i>												
$\Sigma$	243	235	253	246	251	276	93	137	178	201	246	292
$\sigma_{\text{макс}}$	-289	-310	-332	-248	-246	-258	-136	-210	-274	365	422	488
$\sigma_{\text{мин}}$	-46	-75	-79	-2	5	18	-43	-73	-96	164	176	196
$\sigma_{\text{ср}}$	-160	-162	-166	-122	-111	-102	-93	-136	-170	246	298	346
$N$	0	0	0	0	2	2	0	0	0	-	-	-
$s$	61	66	75	74	75	84	31	39	96	61	78	96
<i>Поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе</i>												
$\Sigma$	411	435	474	545	634	657	385	475	519	282	446	535
$\sigma_{\text{макс}}$	312	357	378	343	398	423	-262	-356	-412	511	697	787
$\sigma_{\text{мин}}$	-99	-78	-96	-202	-236	-244	123	119	107	229	251	252
$\sigma_{\text{ср}}$	124	164	190	66	84	102	-118	-175	-215	369	477	543
$N$	3	3	2	3	3	2	2	2	2	-	-	-
$s$	124	145	153	151	181	192	116	147	162	79	128	160

= 79 МПа (рис. 5, з). При  $\Delta_n = 10$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 446 МПа — от 251 (КТ69) до 697 МПа (КТ77) при  $\sigma_{\text{ср}} = 477$  МПа,  $s = 128$  МПа. При  $\Delta_n = 15$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 535 МПа — от 252 (КТ69) до 787 МПа (КТ78) при  $\sigma_{\text{ср}} = 543$  МПа,  $s = 160$  МПа.

Анализ полученных данных показывает, что увеличение толщины TiC-покрытия приводит к однозначному возрастанию  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхностных слоях структурных элементов нитридной керамики, причем степень этого влияния существенно зависит от двух факторов. Во-первых, от структурного элемента керамики и, во-вторых, от расположения КТ в его поверхностном слое. В качестве примера на рис. 6 показаны зависимости изменения  $\sigma_i$  в КТ разных поверхностей. Видно, что с увеличением  $\Delta_n$  с 5 до 15 мкм значения  $\sigma_i$  возрастают в поверхностных слоях: 3 (рис. 6, а) в 1,4, 1,5 и 1,8 раза в КТ7, КТ14 и КТ18 соответственно (расположение этих КТ см. на рис. 1 в статье [22]); МФ3 (рис. 6, б) в 1,4, 1,6 и 2,7 раза в КТ33, КТ36 и КТ42 соответственно; МФМ (рис. 6, в) в 1,2, 1,4 и 1,7 раза в КТ49, КТ47 и КТ43 соответственно; М (рис. 6, з) в 1,1, 1,4 и 1,6 раза в КТ69, КТ72 и КТ78 соответственно.

Приведенные в таблице систематизированные результаты расчетов свидетельствуют о

сложном характере трансформации напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики под действием теплового потока. Последовательно анализируем влияние толщины TiC-покрытия на показатели структурной неоднородности  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхностных слоях разных элементов  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамики.

Установлено, что с увеличением  $\Delta_n$  с 5 до 15 мкм в поверхностных слоях 3, МФ3, МФМ и М максимальные значения  $\sigma_{11}$  увеличиваются в 1,1, 1,4, 1,1 и 1,2 раза; диапазон изменения  $\sigma_{11}$  в 1,1, 1,2, 1,05 и 1,2 раза, среднее значение  $\sigma_{11}$  в 1,05, 1,2, 1,05 и 1,5 раза соответственно и стандартное отклонение в 1,1, 1,5, 1,2 и 1,2 раза соответственно. Также уменьшается число смен знака  $\sigma_{11}$  в поверхностных слоях 3 и М, в поверхностных слоях МФ3 и МФМ этот показатель не изменяется.

С изменением толщины покрытия максимальные значения  $\sigma_{22}$  в поверхностных слоях 3, МФ3, МФМ и М увеличиваются в 1,2, 1,3, 1,05 и 1,2 раза; диапазон изменения в 1,2, 1,4, 1,1 и 1,2 раза и стандартное отклонение в 1,2, 1,4, 1,1 и 1,3 раза соответственно. Среднее значение  $\sigma_{22}$  увеличивается в поверхностных слоях МФ3 и М в 1,1 и 1,5 раза, а в 3 и МФМ уменьшается в 1,1 и 1,2 раза соответственно. Изменение  $\Delta_n$  приводит

к уменьшению числа смен знака для напряжений  $\sigma_{22}$  в поверхностных слоях МФЗ и М с 3 до 2. В поверхностных слоях З и МФМ с увеличением  $\Delta_n$  этот показатель возрастает с 2 до 3 и с 0 до 2 соответственно.

С увеличением толщины покрытия максимальные значения  $\sigma_{12}$  в поверхностных слоях З, МФЗ, МФМ и М увеличиваются в 1,7, 1,9, 2,0 и 1,6 раза; диапазон изменения в 1,2, 1,3, 1,9 и 1,3 раза, стандартное отклонение в 1,2, 1,2, 3,0 и 1,4 раза и среднее значение в 2,0, 2,1, 1,8 и 1,8 раза соответственно. Число смен знака напряжений  $\sigma_{12}$  с увеличением  $\Delta_n$  не изменяется.

С увеличением толщины покрытия максимальные значения  $\sigma_i$  в поверхностных слоях З, МФЗ, МФМ и М увеличиваются в 1,9, 1,6, 1,3 и 1,5 раза; диапазон изменения в 1,4, 1,4, 1,5 и 1,9 раза, стандартное отклонение в 1,1, 1,6, 1,6 и 2,0 раза и среднее значение в 1,7, 1,7, 1,4 и 1,5 раза соответственно.

#### Библиографический список

1. **Soboyejo, W. O.** Review of high temperature ceramics for aerospace applications / *W. O. Soboyejo, J. D. Obayemi, E. Anpan* [et al.] // *Advanced Materials Research*. — 2016. — Vol. 1132. — P. 385–407.
2. **Кузин, В. В.** Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / *В. В. Кузин, С. И. Досько, В. Ф. Попов* [и др.] // *Вестник машиностроения*. — 2005. — № 9. — С. 46–50.
3. **Kuzin, V. V.** Tooling for high-speed cutting / *V. V. Kuzin, S. I. Dos'ko, V. F. Popov* [et al.] // *Russian Engineering Research*. — 2005. — Vol. 25, № 9. — P. 20–25.
3. **De, U.** Ferroelectric materials for high temperature piezoelectric applications / *U. De* // *Solid State Phenomena*. — 2015. — Vol. 232. — P. 235–278.
4. **MohdNor, A.** Review on ceramic application in automotive turbocharged engine / *A. MohdNor, M. R. Abbas, S. Rajoo* [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. — 2014. — Vol. 660. — P. 219–228.
5. **Кузин, В. В.** Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов / *В. В. Кузин* // *Вестник машиностроения*. — 2004. — № 5. — С. 39–43.
6. **Kuzin, V. V.** Effectiveness of the nitride ceramic cutting tools in machining the gray irons / *V. V. Kuzin* // *Russian Engineering Research*. — 2004. — Vol. 24, № 5. — P. 21–27.
6. **Кузин, В. В.** Тепловое состояние керамических режущих инструментов при высокоскоростной обработке резанием / *В. В. Кузин* // *Вестник машиностроения*. — 2004. — № 9. — С. 47–52.
7. **Kuzin, V. V.** Thermal state of ceramic cutting tools in high-speed cutting / *V. V. Kuzin* // *Russian Engineering Research*. — 2004. — Vol. 24, № 9. — P. 32–40.
7. **Кузин, В. В.** Изнашивание режущих пластин из нитридной керамики при обработке отливок из серых чугунов / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Фёдоров* // *Вестник машиностроения*. — 2013. — № 3. — С. 58–62.
8. **Kuzin, V. V.** Wear of nitride ceramic inserts in machining gray cast iron castings / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, S. Yu. Fedorov* // *Russian Engineering Research*. — 2013. — Vol. 33, № 6. — P. 343–347.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных численных экспериментов установлено, что изменение толщины TiC-покрытия, нанесенного на керамику системы  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ , приводит под действием теплового потока к уменьшению ее температуры и увеличению напряжений в поверхностном слое. При увеличении толщины TiC-покрытия с 5 до 15 мкм зафиксирована существенная трансформация напряженного состояния поверхностного слоя этой керамики. Выявлено, что увеличение толщины TiC-покрытия приводит к повышению показателей неоднородности  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  (исключением являются средние значения  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  в поверхностных слоях З и МФМ).

\*\*\*

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.*

8. **Кузин, В. В.** Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / *В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Фёдоров* // *Трение и износ*. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265–271.
9. **Kuzin, V. V.** Wear of tools from nitride ceramics when machining nickel-based alloys / *V. V. Kuzin, M. A. Volosova, M. Yu. Fedorov* // *J. Friction and Wear*. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 199–203.
9. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 1. Макроуровень / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // *Трение и износ*. — 2014. — № 6. — С. 728–734.
10. **Kuzin, V. V.** The role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 1. Macrolevel / *V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. A. Volosova* // *J. Friction and Wear*. — 2014. — Vol. 35, № 6. — P. 505–510.
10. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров* // *Трение и износ*. — 2015. — № 1. — С. 50–55.
11. **Kuzin, V. V.** Role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 2. Microlevel / *V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. Yu. Fedorov* // *Journal of Friction and Wear*. — 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 40–44.
11. **Kim, D.W.** TiC and TiN coatings formed on  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$  composite ceramics by chemical vapour deposition / *D. W. Kim, Y. J. Park, J. G. Lee, J. S. Chun* // *Thin Solid Films*. — 1988. — Vol. 165, № 1. — P. 149–161.
12. **Almeida, F. A.** MPCVD diamond coating of  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$  electroconductive composite substrates / *F. A. Almeida, M. Belmonte, A. J. S. Fernandes* [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2007. — Vol. 16, № 4–7. — P. 978–982.
13. **Григорьев, С. Н.** Инженерия поверхности металлорежущего инструмента методом комбинированной вакуумно-плазменной обработки. Часть 1 / *С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // *Ремонт, восстановление, модернизация*. — 2004. — № 7. — С. 2–6.
14. **Kuzin, V.** Tool life and wear mechanism of coated  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic tools in turning grey cast iron / *V. Kuzin*,

S. Grigoriev // Key Engineering Materials. — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.

15. **Grigoriev, S.** The stress-strained state of ceramic tools with coating / S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton, D. Batako // Proceedings of the 37th International Conference MATADOR, 2012. — 2013. — P. 181–184.

16. **Kuzin, V.** Applications of multi-level method of stress-strain state analysis in ceramic tools design / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 173–176.

17. **Kuzin, V.** Designing of details taking into account degradation of structural ceramics at exploitation / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Volosova [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752/753. — P. 268–271.

18. **Григорьев, С. Н.** Напряженно-деформированное состояние инструментов из нитридной керамики с покрытием / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, М. А. Волосова // Вестник машиностроения. — 2012. — № 6. — С. 64–69.

**Grigoriev, S. N.** Stress-strain state of a coated nitride-ceramic tool / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin, M. A. Volosova // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 7/8. — P. 561–566.

19. **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.

**Grigoriev, S. N.** Influence of ceramic properties on the stress-strain state of a plate in steady heat conduction / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin, D. Burton [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012, — Vol. 32, № 4. — P. 374–379.

20. **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.

**Kuzin, V. V.** Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteady thermoelastic conditions / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. A. Volosova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

21. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 4. Действует тепловой поток / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 47–52.

**Volosova, M. A.** Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 4. Action of heat flow / M. A. Volosova, S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 91–96.

22. **Кузин, В. В.** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — действует сосредоточенная силовая нагрузка / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 8. — С. 59–65.

23. **Кузин, В. В.** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — действует распределенная силовая нагрузка / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 58–63.

24. **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. — P. 32–35. ■

Получено 19.09.16

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

15-Й ВСЕМИРНЫЙ КОНГРЕСС

26–29 сентября 2017 г.

г. Сантьяго, Чили

И ОБЪЕДИНЕННАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ОГНЕУПОРАМ



ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ

- Испытания огнеупоров
- Новые установки и оборудование
- Монолитные огнеупоры
- Огнеупоры для сталелитейной промышленности
- Сырьевые материалы и глобальные вопросы
- Огнеупоры для стекольной промышленности
- Огнеупоры для цементной промышленности
- Моделирование огнеупоров
- Нефтехимия
- Огнеупоры для энергетики и переработки отходов
- Экономия энергии за счет применения огнеупоров
- Бескислородные огнеупорные системы
- Огнеупоры для химических процессов
- Разработки основных огнеупоров
- Образование в области огнеупоров
- Огнеупоры для цветной металлургии
- Безопасность, окружающая среда, переработка огнеупоров

<http://www.expoclub.ru/db/exhibition/view/7983/>

<http://unitecr2017.org>