

К. т. н. Т. В. Мосина (✉)

Институт проблем материаловедения НАН Украины им. И. Н. Францевича,
г. Киев, Украина

УДК 661.882+661.862]:[661.8.41.017:620.17

КОНТАКТНАЯ ПРОЧНОСТЬ, ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ TiN–AlN

Исследованы зависимости контактной прочности и трещиностойкости от нагрузки на индентор и проверены основные соотношения статистической механики контактного разрушения, полученные в работе [1], на примере композиционной керамики системы TiN–AlN, а также установлены зависимости между абразивным износом и механическими характеристиками материалов.

Ключевые слова: контактная прочность, трещиностойкость, растягивающие напряжения, индентирование, абразивный износ.

Исследуемые механические характеристики (пределы прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ и сжатии $\sigma_{сж}$, твердость HV и трещиностойкость K_{1c}), которыми руководствуются при выборе композиционного материала для конкретных условий работы, не всегда позволяют сделать оптимальный выбор и гарантировать надежность эксплуатации готового изделия. Попытки связать абразивную износостойкость композиционных материалов только с твердостью или $\sigma_{изг}$ не объясняют в полной мере весь спектр явлений, которые наблюдаются при изнашивании.

В связи с этим можно предположить, что введенная в работе [1] новая прочностная характеристика хрупких материалов, рассчитываемая по значению приповерхностных растягивающих напряжений в точке остановки радиальных трещин в области индентирования, — контактная прочность на растяжение $\sigma_{конт}$ имеет важное самостоятельное значение и может быть применена для оценки композитов. Предлагаемый метод контактных испытаний обладает технической простотой и позволяет получать статистически значимые экспериментальные данные.

Цель работы — исследование зависимости контактной прочности и трещиностойкости от нагрузки на индентор и проверка основных соотношений статистической механики контактного разрушения, полученных в работе [1], на примере композиционной керамики TiN–AlN, а также установление зависимости между абразивным износом и механическими характеристиками материалов.

КОНТАКТНАЯ ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Исследования были проведены на композиционных материалах системы TiN–AlN, основные характеристики которых приведены в таблице.

Были измерены распределения длин трещин и соответствующие им распределения контактной прочности для отпечатков твердости, нанесенных на поверхности образцов при нагрузке на индентор в интервале 2–500 Н. В каждом случае измеряли длину ста трещин и определяли соответствующие им контактную прочность и трещиностойкость.

Контактную прочность при растяжении σ_f определяли по величине растягивающих напряжений в точке остановки $r = c$ радиальных трещин:

$$\sigma_f = \sigma_\theta(r = c), \quad (1)$$

где c — средняя длина трещины, считая от центра отпечатка; σ_θ — приповерхностные растягивающие напряжения, которые в соответствии с [2] определяются как

$$\sigma_\theta(r) = \frac{HM}{\sqrt{3}} \left(\frac{a}{r} \right)^2, \quad r > a, \quad (2)$$

Физико-механические характеристики горяче-прессованной керамики системы TiN–AlN

Состав, мас. %		Плотность, г/см ³	Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа	Твердость* HV , ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Трещиностойкость K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
TiN	AlN					
100	—	5,35	400	10,6	440	3
25	75	4,75	760	16,1	410	3,8
50	50	4,13	700	14,5	355	4,2
75	25	3,58	670	15,7	325	3,1
—	100	3,00	380	10,1	275	2,2

* Нагрузка 50 Н.



Т. В. Мосина
E-mail: mosinatv@ukr.net

где HM — твердость по Мейеру, a — радиус области контакта.

Трещиностойкость K_{1c} определяли в соответствии с соотношениями:

$$K_{1c} = \frac{\alpha}{\pi\sqrt{6\pi}} \left(\frac{\sqrt{1-(a/c)}}{a/c} - \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{1-(a/c)} - 1}{\sqrt{1-(a/c)} + 1} \right| \right) \frac{P}{c^{3/2}} = \beta \frac{P}{c^{3/2}}, \quad (3)$$

$$K_{1c} = \frac{2 \alpha_{\text{конт}} \sqrt{a}}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{c}{a} \right)^2 (T(L))^{-1}, \quad (4)$$

где L — относительный размер трещины, $L = \frac{c-a}{a}$; T — безразмерный параметр,

$$T = \frac{2\alpha HM \sqrt{a}}{\sqrt{6\pi} K_{1c}} = \frac{2\alpha HM^{3/4} P^{1/4}}{\sqrt{6\pi}^{3/4} K_{1c}}; \quad (5)$$

P — нагрузка на индентор; β — коэффициент.

Безразмерный параметр T условно можно назвать коэффициентом интенсивности напряжений (нормированным на трещиностойкость материала K_{1c}), который зависит от воздействия индентора на трещину размером a и возрастает с увеличением a или нагрузки на индентор.

Результаты вычислений средних значений контактной прочности — длины радиальных трещин в зависимости от нагрузки — для исследуемых материалов представлены на рис. 1. Как правило, контактная прочность увеличивается с уменьшением нагрузки на индентор. При высоких значениях нагрузки контактная прочность меняется слабо и может практически совпадать с пределом прочности при изгибе или существенно превышать его. Высокая контактная прочность композита прямо указывает на повышенное сопротивление разрушению при контактных взаимодействиях и перспективность его использования в конструкциях, которые претерпевают абразивный износ или удар.

Анализ зависимости длины радиальных трещин от нагрузки показал, что для материалов всех составов достаточно хорошо выполняется зависимость $c^{3/2}/P = \text{const}$, т. е. выполняется соотношение (3).

Коэффициент β в уравнении (3) для удобства представим в виде

$$\beta = \alpha \frac{2}{\pi\sqrt{6\pi}} \left(\frac{\sqrt{1-(a/c)}}{a/c} - \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{1-(a/c)} - 1}{\sqrt{1-(a/c)} + 1} \right| \right) = \alpha \gamma. \quad (6)$$

При известной трещиностойкости керамики коэффициент β можно определить экспериментально по тангенсу наклона соответствующих кривых на рис. 1, равному β/K_{1c} . После расчета значений параметра γ из уравнения (6) получаем параметр α . Параметр α определяли на образцах гетерофазной керамики TiN-AlN, для которой значения трещиностойкости были предварительно измерены методом SEVNB (см. табл. 1). Измерения, выполненные при нагрузках на индентор в интервале 2–500 Н и относительной длине трещин c/a в интервале 2–4 (рис. 2), позволили получить величину $\beta = 0,051 \pm 0,007$ при коэффициенте вариации 14 %.

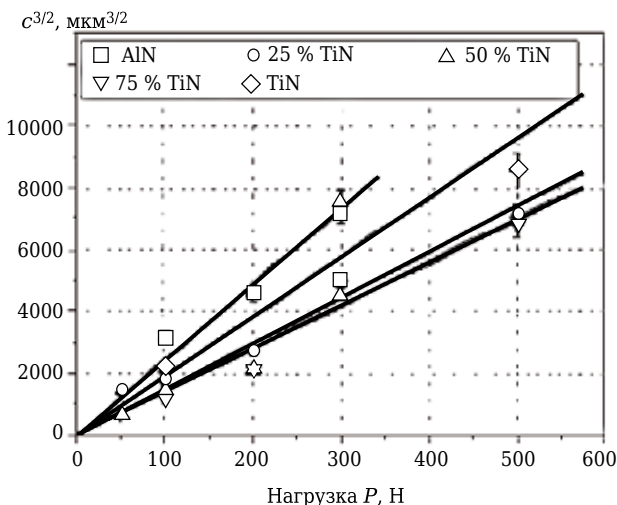


Рис. 1. Зависимость длины радиальных трещин от нагрузки на индентор

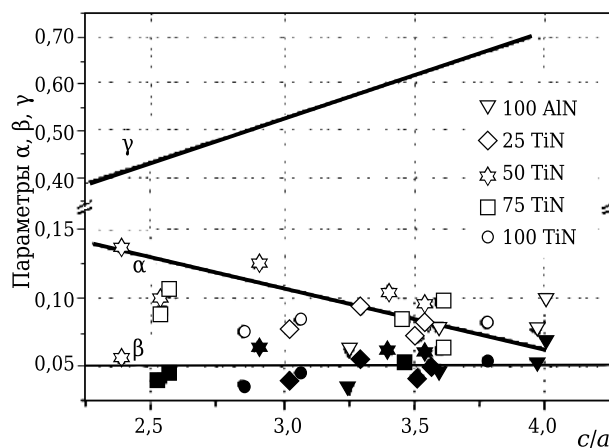


Рис. 2. Зависимость коэффициентов α , β и γ от относительной длины c/a для керамики TiN-AlN

На рис. 2 показаны значения параметров α и γ . Известно, что при повышении нагрузки на индентор в интервале относительных длин трещин $2 < c/a < 3$ обычно имеет место переход от приповерхностных радиальных трещин Палмквиста к полностью развитым полудисковым трещинам. Этому изменению геометрии трещин должно соответствовать систематическое уменьшение величины α — от $\sim 0,15$ до $\sim 0,1$ (см. кривую наклона для α). Однако в силу значительного рассеяния экспериментальных результатов, нами использована не функциональная зависимость $\alpha = f(c/a)$, а среднее значение параметра $\alpha = 0,093 \pm 0,015$ (коэффициент вариации 16 %). Полученные значения α были использованы для определения трещиностойкости по величине контактной прочности при растяжении согласно соотношению (4). Результаты проведенных измерений представлены на рис. 3, их сравнивали со значениями, полученными по формулам Ниихара и Хасельмана [3].

Как видно из рис. 3, трещиностойкость керамики, которая была определена традиционным IF-методом, зависит от нагрузки при испытаниях, имеет явно завышенные значения и значительный разброс результатов измерений. При использовании соотношений (3) или (4) и обработке статистически достаточных массивов измерений, полученные значения трещиностойкости хорошо согласуются с результатами традиционных «макроскопических» методов, слабо зависят от нагрузки и имеют незначительное рассеяние. Отметим, что параметры α и γ , которые определяют структуру безразмерного коэффициента β , позволяют, на наш взгляд, более корректно находить величину трещиностойкости K_{1c} с помощью соотношения (4) без построения зависимостей $c^{3/2} - P$.

АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС

Исследование износостойкости материалов в условиях абразивного износа проводили на установке типа недвижимое кольцо (НК) конструкции ГосНИИ машиноведения на специальных образцах [4]. Метод испытаний основан на износе поверхности образца по абразивному слою из кварцевого песка (размер абразива от 0,1 до 0,5 мм, HV 9–11 ГПа) при давлении 150 кПа и скорости скольжения 0,7 м/с, путь трения 1200 м.

Износостойкость рассчитывали по потере массы образца и эталона (горячепрессованного карбида бора) в результате испытаний. Относительную износостойкость рассчитывали по формуле

$$\varepsilon = \Delta P_{\varepsilon} \gamma_{\varepsilon} / \Delta P_{\mu} \gamma_{\mu}, \quad (7)$$

где ΔP_{ε} , ΔP_{μ} — потеря массы эталона и образца; γ_{ε} , γ_{μ} — плотность образца и эталона.

Исследование износостойкости керамических материалов показало, что введенные нами новые прочностные характеристики хрупких материалов — контактные прочности при растяжении и сжатии — в некоторых случаях напрямую определяют их абразивную износостойкость [5, 6]. Как следует из полученных результатов, величина абразивного износа сложным образом зависит от твердости, трещиностойкости или прочности при изгибе испытываемых образцов. При этом часто увеличение жесткости или трещиностойкости образцов сопровождается уменьшением их износостойкости (рис. 4). В то же время наблюдается четкая функциональная зависимость между обратной величиной контактной прочности при растяжении и абразивной износостойкостью материалов (рис. 5).

Действительно, в элементарном процессе разрушения вследствие развития приповерхностных (lateral) трещин длиной $l \sim c$ удаляется объем материала $V_i \approx \delta F$, где δ — глубина области разрушения; F — площадь разрушения в

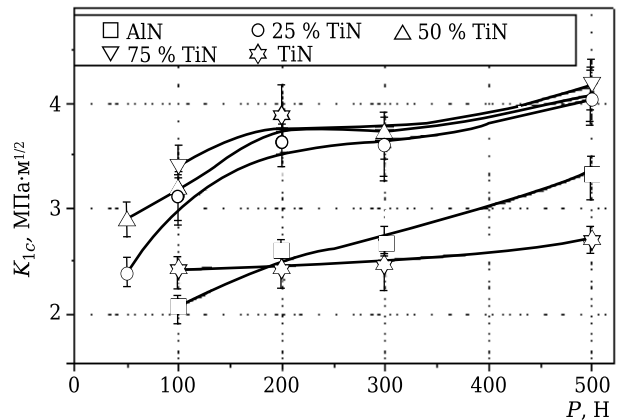


Рис. 3. Зависимость трещиностойкости K_{1c} от нагрузки P (вычисления на основе соотношения 4)

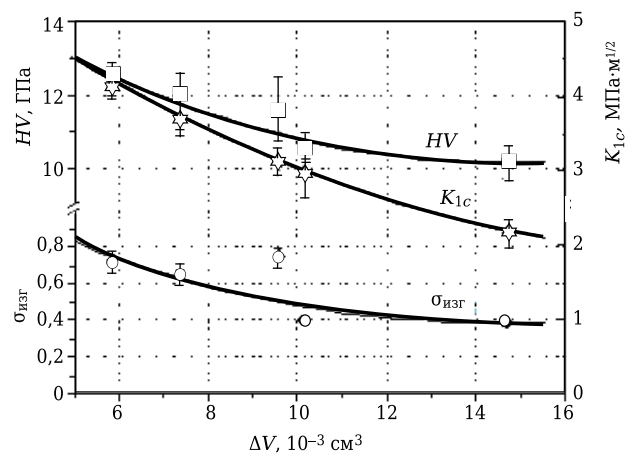


Рис. 4. Абразивная износостойкость ΔV и некоторые физико-механические свойства композитов при трении по абразивному слою из кварцевого песка

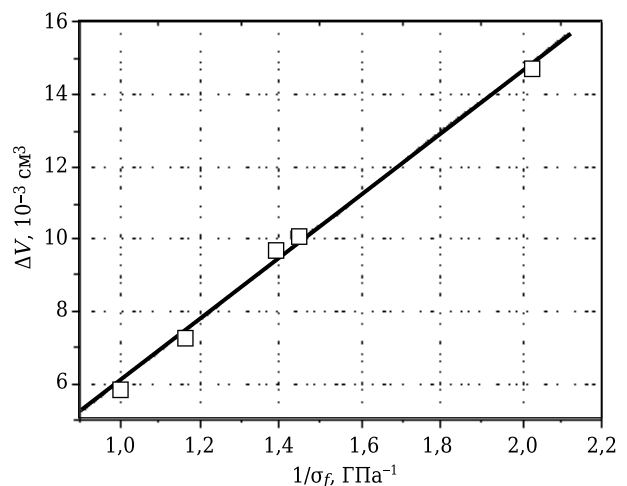


Рис. 5. Абразивная износостойкость ΔV в зависимости от контактной прочности при растяжении для композитов при трении по абразивному слою из кварцевого песка

приконтактной области. Следовательно, величина износа $W \sim V_i = F$. Легко показать, что между контактной прочностью, микроструктурной прочностью и величиной абразивного износа должна существовать зависимость типа

$$W = \eta F = k \frac{1}{\sigma_f} = k \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{Y} \right), \quad (8)$$

где η , k — коэффициенты пропорциональности.

Таким образом, из полученных соотношений следует, что повышение износостойкости керамических материалов при абразивном износе напрямую связано с повышением их прочностных характеристик — контактной и микроструктурной прочности. При этом величина износа определяется обратной величиной контактной прочности при растяжении (контактным разрушением материала под действием растягивающих напряжений), которая, в свою очередь, зависит (см. рис. 5) от разрушения материала при сжатии в макро- ($1/Y$) и микрообъемах ($1/S$).

В общем случае износ хрупких материалов является результатом контактного разрушения, которому способствует накопление дефектов в приповерхностном слое с элементами «усталостного» разрушения материала. В материалах с

пониженными величинами контактной и микроструктурной прочности вследствие повреждений в области участков разрушения происходит локализация снятия материала и формирование глубоких следов на поверхностях износа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования условий развития радиальных трещин установлена связь между контактной прочностью σ_f и критическим коэффициентом интенсивности напряжений K_{1c} , что позволяет дать более полную характеристику механического поведения хрупких тел при контактном разрушении и по длине радиальных трещин определить с единой позиции статистически обоснованные значения контактной прочности и трещиностойкости материала.

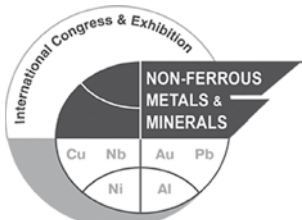
Повышение износостойкости керамических материалов при абразивном износе напрямую связано с повышением их прочностных характеристик — контактной и микроструктурной прочности. При этом величина износа определяется обратной величиной контактной прочности при растяжении, которая, в свою очередь, зависит от разрушения материала при сжатии в макро- и микрообъемах.

Библиографический список

1. **Галанов, Б. А.** Статистические характеристики контактной прочности керамики / Б. А. Галанов, О. Н. Григорьев, Е. Г. Трунова // Электронная микроскопия и прочность материалов. Труды Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Серия Физическое материаловедение, структура и свойства материалов. — 2001. — Вып. 11. — С. 125–135.
2. **Tanaka, K.** Elastic/Plastic indentation hardness and indentation fracture toughness: the inclusion core model / K. Tanaka // J. Mater. Sci. — 1987. — Vol. 22. — P. 1501–1508.
3. **Niihara, K.** Evaluation of K_{1c} of brittle solids by the indentation method with low crack-to-indent rations / K. Niihara, R. Morena, D. P. H. Hasselman // J. Mat. Sci. Let. — 1982. — Vol. 1, № 1. — P. 13–16.
4. **Хрущов, М. М.** Абразивное изнашивание / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. — М.: Наука, 1970. — 252 с.
5. **Григорьев, О. Н.** Структура и некоторые физико-механические свойства твердых сплавов WC-Co, легированных боридом вольфрама / О. Н. Григорьев, Б. А. Галанов, Г. Л. Жунковский [и др.] // Вестник НТУ ХПИ. — 2004. — № 40. — С. 152–163.
6. **Григорьев, О. Н.** Стойкость композитов B_4C-VB_2 при абразивном изнашивании и трении в паре со сталью / О. Н. Григорьев, Б. А. Галанов, В. А. Котенко [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2005. — № 10. — С. 2–8. ■

Получено 07.03.14
© Т. В. Мосина, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



VI международный конгресс и выставка «Цветные металлы-2014»

16–19 сентября 2014 г.

<http://nfmsib.ru/>

г. Красноярск, Россия