

На графике (рис. 8) по оси абсцисс отложены расстояния по оси симметрии зуба от центра колеса (координата X на рис. 1), определяющие положение точки на галтели, на оси ординат – напряжения от единичной силы на единицу ширины зубчатого венца, определенные с помощью метода неплоских сечений.

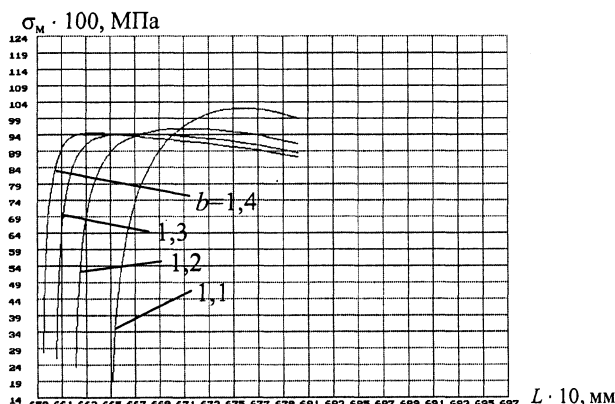


Рис. 8. Напряжения изгиба в галтели, очерченной по эллипсу, при различных параметрах b

Известно, что большую роль в снижении шума и вибраций, а также в распределении нагрузки между зубьями играет увеличение податливости зубьев, которое можно получить, увеличивая их высоту. Поэтому полезными

представляются полученные результаты, показывающие уменьшение изгибных напряжений с ростом глубины впадины галтели (до некоторого предела). Расчеты, проведенные автором при исследовании различных переходных кривых (закругление зуба инструмента окружностью, эллипсом, параболой, синусоидой), при проектировании «от кривой закругления зуба инструмента к галтели» (обычная методология, описанная, например, в [1, 4]), как правило, не дают подобного сочетания. Кроме того, получаемое снижение изгибных напряжений меньше, чем в предлагаемом методе.

Предложенная методика в настоящее время экспериментально не апробирована.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вулгаков Э. Б. Зубчатые передачи с улучшенными свойствами. – М.: Машиностроение, 1974. – 263 с.
2. Вулгаков Э. Б., Васина Л. М. Эвольвентные зубчатые передачи в обобщающих параметрах: Справ. по геометрическому расчету. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
3. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справ. / Под ред. Э. Б. Вулгакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.
4. Гавриленко В. А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи. – М.: Машгиз, 1969. – 431 с.

УДК 669.018.95

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ

Кандидаты техн. наук ГОЛУБЦОВА Е. С., КАЛЕДИН Б. А.

Белорусский национальный технический университет

Известно [1, 2], что механические характеристики горячепрессованных материалов на основе нитрида кремния из ультрадисперсных порошков выше, чем у материалов из более крупных порошков. Цель настоящей ра-

боты – изучить твердость и вязкость разрушения конструкционной керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3) - \text{TiN}$ в зависимости от состава и прилагаемой нагрузки, а также получить математические модели, устанавливаю-

щие количественную связь между этими характеристиками, маркой материала, содержанием TiN, оксидов и нагрузкой. Ставилась также задача определить вид разрушения.

Ультрадисперсные порошки нитрида кремния, оксидов натрия и алюминия, нитрида титана смешивали в атриторе в среде ацетона в течение 20...30 мин. Прессование проводили при температуре 1800...1830 °С и одноосном приложении давления 30 МПа.

Твердость определяли по методу Виккерса при нагрузке на индикатор 50...300 Н и комнатной температуре. Коэффициент вязкости разрушения K_{Ic} определяли путем измерения диагонали отпечатка при вдавливании индентора и длине трещин по методике [3]. Все опыты проводили с применением методов статистического планирования эксперимента [4].

Вначале исследовали изменение твердости образцов из $Si_3N_4 - (Al_2O_3 + Y_2O_3)$ и $Si_3N_4 - (Al_2O_3 + Y_2O_3) - TiN$ в зависимости от содержания в них оксидов и нитрида титана при нагрузке $P = 300$ Н, обеспечивающей меньший разброс значений твердости.

Для этого был использован двухфакторный план 2×3 , где «2» показывает уровни материала; «3» – уровни содержания TiN (0; 30 и 60 % объема). В качестве параметра оптимизации y_1 была выбрана твердость HV ГПа, а в качестве факторов – указанные материалы x_1 и содержание TiN (x_2). Ошибка воспроизводимости $S_1 = 0,52$ ГПа (~4 % среднего значения) определялась по результатам трех параллельных опытов, когда оба фактора находились на верхних уровнях ($x_1 = +1$ и $x_2 = +1$).

Матрица плана и результаты опытов приведены в табл. 1, где x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов [$x_1 = -1$; $Si_3N_4 - (Al_2O_3 + Y_2O_3)$], [$x_2 = +1$; $Si_3N_4 - (Al_2O_3 + Y_2O_3) - TiN$]; y_1 – опытное значение твердости; y_p – расчетное значение HV .

Таблица 1

Матрица плана 2×3

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y_1	y_p
1	–	–	+	+	+	16,52	17,25
2	–	0	0	+	0	14,05	13,50
3	–	+	–	+	+	9,00	9,73
4	+	–	–	+	+	15,86	16,03
5	+	0	0	+	0	14,33	14,89
6	+	+	+	+	+	13,57	13,75

После статистической обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель

$$y_1 = HV = 14,19 + 0,7x_1 - 2,45x_2 + 1,31x_1x_2, \quad (1)$$

из которой видно, что наибольшее влияние на твердость оказывает содержание TiN (x_2). Максимальное значение $y_1 = 16,52$ ГПа получено при $x_1 = -1$ и $x_2 = -1$, т. е. при у материала $Si_3N_4 - (Al_2O_3 + Y_2O_3)$ без TiN. С добавкой TiN в этот материал твердость снижается до $y_1 = 9$ ГПа при $x_1 = -1$ и $x_2 = +1$ (60 % TiN).

В следующей серии опытов проводили исследования зависимости твердости HV от нагрузки на индентор x_1 и содержания TiN (x_2) для материала $Si_3N_4 - (Al_2O_3 + Y_2O_3) - TiN$. Для проведения эксперимента был выбран план 3×3 , где «3» – уровни нагрузки (50; 150 и 250 Н) и содержания нитрида титана (10; 40; 70 %). Ошибка воспроизводимости опытов S_2 составила 0,2 ГПа (~4 % среднего значения).

Матрица плана и результаты измерения твердости приведены в табл. 2, где x_1 , x_2 – кодированные уровни нагрузки и содержания TiN; y_2 – твердость HV .

Таблица 2

Матрица плана 3×3

N	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
1	–	–	+	+	+	16,3	16,01	6,23	7,09	6,40
2	–	0	0	+	0	15,4	14,54	7,23	12,92	6,26
3	–	+	–	+	+	14,5	9,92	6,96	12,61	5,06
4	0	–	0	0	+	15,4	14,72	6,23	6,91	6,66
5	0	0	0	0	0	14,8	13,62	6,96	8,91	6,40
6	0	+	0	0	+	12,9	9,28	6,68	8,55	5,46
7	+	–	–	+	+	14,7	14,72	6,50	7,46	7,33
8	+	0	0	+	0	14,1	13,62	6,64	8,37	6,93
9	+	+	+	+	+	12,7	9,28	7,00	8,18	5,86

После обработки результатов этого эксперимента по методике [4] и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель

$$y_2 = HV = 14,64 - 0,72x_1 - 1,12x_2 - 0,42x_2^2, \quad (2)$$

из которой видно, что и в этом случае наибольшее влияние на твердость оказывает содержание TiN (x_2): чем оно выше, тем ниже твердость. Максимальная величина твердости

($y_2 = 16,3$ ГПа) получена при $x_1 = -1$ и $x_2 = -1$, т. е. при нагрузке 50 Н и 10 % TiN.

В третьей серии опытов по тому же плану эксперимента провели исследования влияния нагрузки на индентор x_1 и содержание оксидов x_2 на твердость y_3 для материала $\text{Si}_3\text{N}_4 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3)$. Для нагрузки были выбраны три уровня (50; 150; 250 Н), для содержания оксидов – также три уровня (10; 35 и 60 %). Результаты опытов приведены в табл. 2 (y_3).

После обработки результатов опытов получена адекватная модель (3) при ошибке воспроизводимости $S_3 = 0,38$

$$y_3 = HV = 13,61 - 0,48x_1 - 2,83x_2 - 1,61x_2^2, \quad (3)$$

из которой видно, что наибольшее влияние на твердость оказывает содержание оксидов x_2 : чем оно выше, тем ниже твердость.

Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение содержания добавок TiN и оксидов ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3$) в нитридной керамике снижает ее твердость. Влияние величины нагрузки на индентор x_1 меньше, хотя характер влияния тот же: с ростом нагрузки твердость также снижается.

Зависимость трещиностойкости K_{Ic} от нагрузки на индентор x_1 и содержания TiN (x_2) в материалах состава $\text{Si}_3\text{N}_4 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3) - \text{TiN}$ изучали с помощью того же плана эксперимента 3×3 , но учитывали место измерений: на гранях параллельной и перпендикулярной направлению прессования. Уровни факторов были выбраны следующие: x_1 (50; 150 и 250 Н) и x_2 (10; 40; 70 %). В качестве параметра оптимизации был выбран коэффициент вязкости разрушения K_{Ic} , МПа $\cdot\text{м}^{0,5}$. Результаты измерений K_{Ic} на параллельных и перпендикулярных гранях приведены табл. 2 (y_4, y_5).

Ошибки воспроизводимости S_4 и S_5 соответственно составили 0,13 и 0,16 МПа $\cdot\text{м}^{0,5}$.

После обработки результатов эксперимента получены адекватные модели для обеих граней:

$$y_4 = 6,28 + 0,28x_2 - 0,34x_2^2; \quad (4)$$

$$y_5 = 9,26 - 1,34x_1 + 1,21x_2 - 1,05x_1x_2 + 1,22x_1^2 - 1,7x_2^2. \quad (5)$$

Как видно, здесь наибольшее влияние на K_{Ic} оказывает содержание TiN: чем оно больше, тем выше трещиностойкость, т. е. характер

влияния этого фактора на K_{Ic} иной, нежели на твердость HV .

Из уравнения (4) также следует, что нагрузка x_1 не оказывает влияние на K_{Ic} в выбранных интервалах варьирования (50...250 Н) при измерении этого параметра на параллельной грани.

На грани, перпендикулярной направлению прессования, влияние обоих факторов примерно одинаково, но величина K_{Ic} намного больше, чем на параллельной грани.

Зависимость вязкости разрушения от нагрузки x_1 и содержания оксидов x_2 в материалах $\text{Si}_3\text{N}_4 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3)$ определяли с помощью того же плана 3×3 (табл. 2). Уровни нагрузки были выбраны: 100; 200 и 300 Н и содержания MeO: 10, 30 и 50 %. Ошибка воспроизводимости составляла $S_6 = 0,11$ (1,8 % от среднего).

После обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнения получили адекватную модель (6)

$$y_6 = K_{Ic} = 6,44 + 0,40x_1 - 0,67x_2 - 0,41x_2^2. \quad (6)$$

Здесь наблюдается уменьшение K_{Ic} с ростом содержания оксидов x_2 .

Максимальное значение $K_{Ic} = 7,33$ МПа $\cdot\text{м}^{0,5}$ получено при $x_1 = +1$ и $x_2 = -1$, т. е. при нагрузке 300 Н и содержании оксидов 10 %.

Для материалов $\text{Si}_3\text{N}_4 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3)$ наблюдается тесная корреляция между твердостью и трещиностойкостью, поскольку коэффициент парной корреляции $\tau_{3,6} = 0,782$, что больше табличного $\tau_{кр} = 0,7498$ (при $\alpha = 0,02$ и $f = 9 - 2 = 7$).

Эта зависимость может быть выражена корреляционным уравнением

$$y_6 = K_{Ic} = 3,55 + 0,21y_3. \quad (7)$$

Таким образом, как K_{Ic} , так и HV для этих материалов уменьшаются с повышением содержания оксидов.

Для материалов $\text{Si}_3\text{N}_4 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3) - \text{TiN}$ такой тесной корреляции не наблюдается ($r_{2,5} = 0,66 < r_{кр} = 0,666$ при $\alpha = 0,05$ и $f = 9 - 2 = 7$), но обращает на себя внимание, что с ростом твердости y_2 коэффициент вязкости разрушения K_{Ic} уменьшается.

Близость расчетного и табличного коэффициентов парной корреляции позволяет и в этом

случае выразить зависимость трещиностойкости $K_{Ic} = y_5$ от величины твердости HV в виде линейного корреляционного уравнения

$$y_5 = 13,31 - 0,373y_2. \quad (8)$$

Следовательно, введение TiN увеличивает трещиностойкость материала, но не меняет характер зависимости между твердостью и трещиностойкостью, ибо с ростом твердости K_{Ic} уменьшается.

Это можно объяснить повышением упругопластических свойств данного материала.

Уровень трещиностойкости композитов на основе нитридов кремния и титана зависит от механизма распространения трещины, который в свою очередь зависит от объемного соотношения основных фаз в широком диапазоне размеров (от дисперсного распределения TiN в матрице Si_3N_4 до включенной Si_3N_4 в TiN), а также от знака остаточных напряжений, вызванных горячим прессованием.

Последние отличаются друг от друга распределением и интенсивностью во взаимно перпендикулярных гранях относительно направления прессования.

Трещина при взаимодействии с зонами сжимающих напряжений замедляет свое продвижение, что приводит к увеличению вязкости разрушения материала. Вот почему материал $Si_3N_4 - (Al_2O_3 + Y_2O_3) - TiN$ обладает более высокой трещиностойкостью по сравнению с материалом $Si_3N_4 - (Al_2O_3 + Y_2O_3)$.

Можно сделать вывод, что на вид зависимости твердости от состава и нагрузки горяче-прессованной керамики на основе нитрида кремния и оксидов доминирующее влияние оказывает хрупкое разрушение, а для материалов на основе нитридов кремния и титана – упругопластические деформации. Значительный вклад в изменение K_{Ic} в зависимости от состава композита оказывает распределение остаточных напряжений в материале, возникшее в результате горячего прессования.

Таким образом, статистические исследования указанных материалов позволили не только установить количественные зависимости твердости и K_{Ic} от нагрузки и состава, но и выявить характер их влияния, установить связь между твердостью и трещиностойкостью в виде корреляционных уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гнесин Г. Г., Осипова Н. И., Сартинская Л. Л. Свойства материалов на основе ультрадисперсных порошков нитридов // Порошковая металлургия. – 1990. – № 8. – С. 91–95.
2. Гнесин Г. Г., Осипова Н. И., Сартинская Л. Л. Инструментальные керамические материалы на основе ультрадисперсных порошков нитридов // Порошковая металлургия. – 1990. – № 12. – С. 78–82.
3. Evans A. G., Charles E. A. Fracture Toughness Determinations Hardness Indentation // J. Amer. Ceram. Soc. – 1977. – Vol. 59, № 7/8. – P. 371–372.
4. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.