

УДК 621.791

В.Г. Лебедев, Т.В. Чумаченко

Одесский национальный политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ КЕРАМИЧЕСКОГО СЛОЯ НАПЫЛЕННОГО НА ВАЛЫ ТУРБИН ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ ИЗ КНБ

Рассматриваются вопросы аналитического и экспериментального определения условий образования трещин при шлифовании напыленного керамического слоя кругами из КНБ. Рассматриваются закономерности формирования текстуры поверхностного слоя шлифуемой детали.

Ключевые слова: *шлифование, керамический слой, трещины.*

Введение. Современное развитие многих областей техники связано с использованием газотурбинных установок (ГТУ). Одной из главных деталей ГТУ является вал с крыльчаткой, особенностью работы которого являются жесткие эксплуатационные условия: частота вращения 50...80 000 об/мин, высокая рабочая температура (до 600 °С), агрессивная среда, интенсивное трение шеек валов роторов. Надежность и ресурс газотурбинных установок в значительной мере зависят от эксплуатационных характеристик шеек вала. В связи с этим на практике необходимо применять упрочнение шеек валов роторов ГТУ таким образом, чтобы они надежно противостояли тяжелым условиям эксплуатации. Одним из наиболее эффективных способов упрочнения может быть напыление на поверхности шеек износостойчивого поверхностного минералокерамического слоя.

Исследования и опыт эксплуатации керамических пар трения, которыми занимаются фирмы FIAT, Деста, Аспект модификатор, Универсальный модификатор, СУРМ, Гретерин, Римет, Fenom, ER, Хадо, FORSAN, Супротек и др., свидетельствуют о возможности получения аномально низких коэффициентов трения (0,003...0,007) и обеспечения долговечности рабочего состояния при высоких эксплуатационных температурах и агрессивных средах.

Необходимая точность (6 квалитет) и шероховатость поверхности шеек валов Ra = 0,63...0,32 (8в - 9а класс) достигается при шлифовании напыленной минералокерамики кругами из кубического нитрида бора (КНБ). Однако даже при малопроизводительных режимах обработки напыленный минералокерамический слой склонен к образованию трещин.

Цель исследования – используя аналитические и экспериментальные возможности, создать модель или математическое описание механизма образования и развития трещины в напыленном поверхностном слое шлифуемой детали.

Задачи исследования:

1. Проанализировать термомеханическое взаимодействие напыленного керамического слоя с металлом основания при шлифовании, значения возникающих напряжений в поверхностном слое и возможность образования трещин.

2. Проанализировать механизмы образования структуры напыленного слоя на поверхности детали и влияние этой структуры на трещинообразование.

Исследования. При шлифовании напыленного керамического слоя на каждое зерно круга действуют реакции сил резания, а также силы трения о зерно сходящего напыленного материала. В результате возникновения сил различной природы образования в напыленном керамическом слое к существующим напряжениям структуры (пористости) могут присоединяться как силовые напряжения, так и температурные:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_T + \sigma_P + \sigma_{стр} \quad (1)$$

где $\sigma_T, \sigma_P, \sigma_{стр}$, МПа – соответственно температурные, силовые, структурные напряжения.

Анализируя каждую из составляющих суммарного напряжения, необходимо прийти к численным результатам составляющих суммарного напряжения. При шлифовании керамики не происходят фазово-структурные превращения, поэтому составляющая $\sigma_{стр}$ из анализа сразу исключается.

Теплофизические характеристики, в частности коэффициенты теплопроводности керамики и основного металла, резко отличаются друг от друга, поэтому существует угроза отслаивания керамического слоя от металла основания при шлифовании. Поэтому необходимо провести исследование термомеханического взаимодействия слоя и основного металла, так как степень этого взаимодействия может служить причиной шлифовочного брака. Следует отметить, что образование трещин поверхностного слоя и отслаивание может вызываться действием как сил резания, так и термическим фактором шлифования.

Термический фактор, который является следствием возникающего теплового потока, может приводить к образованию трещин на поверхности, по глубине напыленного слоя и на границе напыленного слоя и металла детали. В этом случае, если напряжения достаточно велики, также возможно отслаивание напыленного слоя.

Формирование структуры поверхностного слоя при напылении. Структура минералокерамического слоя, напыленного на шейки вала ротора газовой турбины [12, 14], отличается от обычной керамики. Это отличие вызвано самой сущностью процесса напыления и требованиями, которые предъявляются к напыленному слою. С одной стороны, необходимо обеспечить максимальную прочность сцепления слоя с основой, а с другой – необходимо обеспечить достаточную пористость слоя для хорошего удержания смазки. Получить такие свойства, используя один режим напыления, невозможно. Поэтому керамический слой напыляется в три прохода. Первый проход осуществляется при достаточно высокой силе тока (320 А), в результате чего происходит напыление с оплавлением. У такого керамического слоя пористость незначительна или приближается к нулю. Этот слой обеспечивает повышенную прочность сцепления (50 МПа) напыленной керамики с основой и служит подслоем. Второй слой напыляется при более низких значениях силы тока (280 А). При этом образуется умеренная пористость напыленного слоя (7 - 10%). Третий слой – при достаточно низких значениях силы тока (260 А), что обеспечивает повышенную пористость (15% - 18%).

Такая технология напыления, с одной стороны, обеспечивает достаточно прочное сцепление напыленного слоя с основой, а с другой – максимально уменьшает его хрупкость и увеличивает способность удерживать смазку. Поэтому напыленный керамический слой имеет переменный коэффициент теплопроводности от поверхности в глубину, причем на поверхности напыленного слоя коэффициент теплопроводности имеет минимальные значения, а в нижней части – максимальные.

Таким образом, структура напыленного слоя обладает разной пористостью по глубине и соответственно, разной теплопроводностью, теплоемкостью и плотностью. Это обстоятельство следует учитывать при аналитических исследованиях, необходимых для определения остаточных напряжений в напыленном слое, которые могут приводить к трещинам.

Следует отметить, что как для оценки механического воздействия зерен абразивного круга на шлифуемый слой, так и для разработки тепловой математической модели, необходимо знать силы резания P_u и P_z . Первая нужна для сравнения напряжений сжатия, которые вызывает эта сила с допустимыми напряжениями на сжатие керамического слоя. Вторая сила P_z необходима для сравнения напряжений, вызываемых ею с пределом прочности на отрыв керамического слоя от основы. Кроме того, составляющая P_z необходима для определения мощности резания в [Н·м/с] = [Вт] [1]:

$$Q = P_z \cdot V_k, \quad (2)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; V_k – скорость круга, м/с.

При плазменном напылении поверхностный слой формируется не как единое целое, когда жидкая керамика превращается в твердую и одновременно идут процессы стеклования и кристаллизации, а из мельчайших капель жидкой керамики. В нашем случае образуется структура, похожая на зернистую структуру металла. На рис.1 представлена растрово электронно-микроскопическая (РЭМ) фотография поверхности пористого керамического слоя, полученная с помощью программно-аппаратного комплекса, состоящего из РЭМ «Hitachi S-800», соединенного через интерфейсный блок с IBM современным персональным компьютером [3].

Аналитическая оценка сил резания и временных напряжений при шлифовании кругами из КНБ. Теоретический расчет сил резания при шлифовании керамики в значительной степени затруднен, поскольку законы стружкообразования при резании керамики зерном из КНБ практически не изучены.

Е.Н. Маслов, С.Г. Редько, В.Г. Лебедев [7,10,5] в своих работах аналитически исследовали режущую часть зерна, которая может быть представлена в виде пирамидки, поверхности конуса или в виде поверхности шара. Эти модели дают возможность определять силу P_y по глубине вдавливания зерна, а затем по известным соотношениям между силами P_y и P_z с достаточной степенью точности определяется P_z .

Если взять модель зерна в виде пирамидки, то сила P_y определяется по формуле

$$P_y = \frac{H \cdot M}{2}, \quad (3)$$

где M – площадь поверхности пирамидки, вдавленной в металл; H – микротвердость H/m^2 .

Если принять модель режущей части зерна в виде поверхности шара, то можно значение силы вдавливания P_y получить исходя из следующих соотношений:

$$P_y = H \cdot \pi (h^2 + 2h(2R - h)), \quad (4)$$

где h – толщина снимаемой стружки или глубина вдавливания зерна в керамику; R – радиус закругления режущей части зерна.

Если принять модель режущей части в виде конуса, то значение силы вдавливания P_y возможно получить исходя из таких соотношений:

$$P_y = H \cdot \pi \cdot h \cdot \operatorname{tg} 60^\circ (h \cdot \operatorname{tg} 60^\circ + \frac{h}{\sin 60^\circ}). \quad (5)$$

Анализ моделей, выполненный путем расчета сил вдавливания P_y , показал, что изменение расчетных значений сил при разной глубине шлифования достаточно близки друг к другу (рис.2).

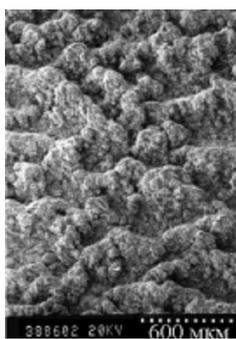


Рис. 1. Структура поверхности керамики, $\times 500$

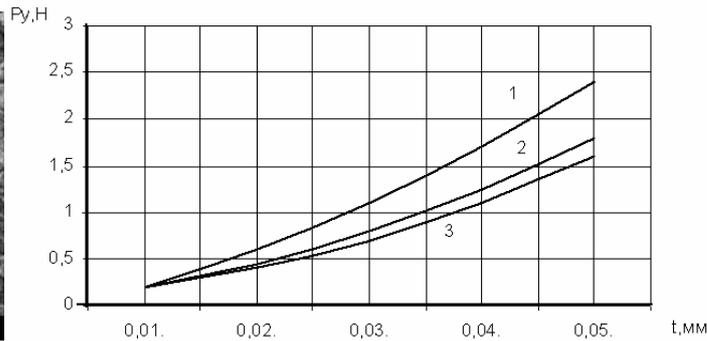


Рис. 2. Изменение расчетных значений силы P_y от глубины шлифования в зависимости от принятой модели формы режущей части зерна: 1- конус, 2 – шар, 3- пирамида

Модель режущей части зерна в виде шара более адекватно отражает происходящий процесс, поскольку включает в себя радиус закругления режущей части зерна.

Если принять по данным источников [8, 6],

$$P_z = 0,55 P_y, \quad (6)$$

то можно сказать, что

$$P_z = 0,55 \cdot H \cdot \pi (h^2 + 2h(2R - h)). \quad (7)$$

Следовательно, величину силы резания P_z можно определить, зная радиус закругления зерна, зависящий от зернистости, и глубину вдавливания абразивного зерна или среднее сечение стружки, снимаемое этим зерном.

Толщина среза одним зерном или величина углубления зерна в металл выражается формулой

$$h = \frac{t}{n_{pz}} = \frac{20 \cdot t \cdot v_d \cdot I_{\phi}}{v_{kp} \cdot \sqrt{D \cdot t}}. \quad (8)$$

Соответственно сила резания единичным зерном и временные напряжения сжатия – формулами (9) и (10)

$$P_{yed} = 3H\sqrt{2h^3R_z} ; \tag{9}$$

$$\sigma_{ed} = \frac{P_{yed}}{2\pi R_z h} , \tag{10}$$

где Vd – скорость детали, м/с; $l\phi$ – фактическое расстояние между режущими зёрнами, м [13]; $V_{кр}$ – скорость шлифовального круга, м/с; D – диаметр круга, м; P_y – составляющая силы резания (сила вдавливания), Н; H – микротвердость слоя, Н/м²; h – толщина стружки, снимаемая зёрном, м; t – глубина резания, м; R_z – радиус закругления режущей части зёрна, м.

Графики изменения единичных сил P_{yed} и временных напряжений сжатия σ_{ed} показаны на рис.3 и 4.

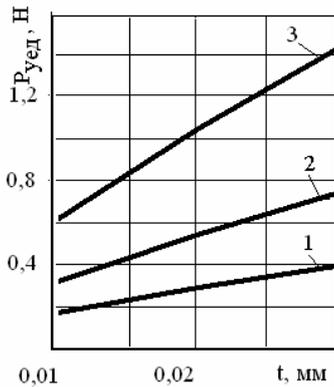


Рис. 3. Зависимость силы резания P_{yed} от глубины шлифования t кругами с зернистостью: 1 – 160/100; 2 – 50/160; 3 – 400/250

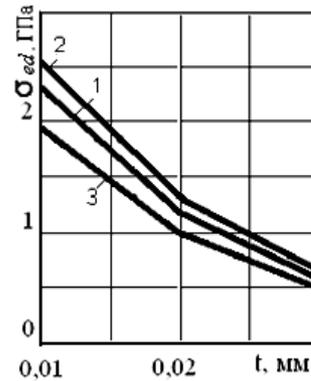


Рис. 4. Зависимость напряжений σ_{ed} от глубины шлифования t кругами с зернистостью: 1 – 160/100; 2 – 50/160; 3 – 400/250

В [7, 10, 2] отмечено, что при резании в процессе шлифования принимают участие порядка 11 % зёрен из тех, что находятся на поверхности круга. Однако приведенные данные охватывают только абразивные круги. Для кругов из синтетических сверхтвёрдых материалов таких данных нет, хотя они весьма важны для аналитического исследования процесса шлифования. Знание этих величин позволило рассчитать производительность процесса шлифования, суммарные силы резания и контактные температуры. В настоящей работе для определения указанных величин использовался метод регистрации тепловых импульсов от каждого режущего зёрна с помощью полупроводниковой микротермопары,[11].

Значения суммарных временных напряжений сжатия σ (МПа) от режимов обработки при шлифовании керамики Al_2O_3 кругом ЛО20100 % СМ1К7 представлены на рис. 5.

Временные напряжения сжатия от единичных сил резания P_y определяются по формуле [9]

$$\sigma = \frac{P_{yed}}{F_{зерна}} , \tag{11}$$

где P_{yed} – составляющая силы резания, Н; $F_{зерна}$ – площадь поверхности зёрна, находящаяся в контакте с материалом.

Временные напряжения сжатия, полученные от суммарных сил резания P_y , определяются по формуле [9]

$$\sigma = \frac{P_y}{F} = \frac{P_y}{S_{non}\sqrt{D_k \cdot t}} , \tag{12}$$

где P_y – составляющая силы резания, Н; S_{non} – поперечная подача, м/ход; D_k – диаметр круга, м; t – глубина шлифования, м.

Величины временных напряжений сжатия от суммарных сил P_y , определенные аналитически, показаны на рис.5.

Сопоставляя полученное значение теоретического напряжения сжатия σ (ГПа) с пределом прочности керамического слоя на сжатие, можно сделать вывод, что временные напряжения под действием силы P_{yed} не могут вызвать трещин керамического слоя, так как их максимальные расчетные значения в 1,3...1,5 раза меньше предела прочности керамики на сжатие ($\sigma_{дон} = 3$ ГПа).

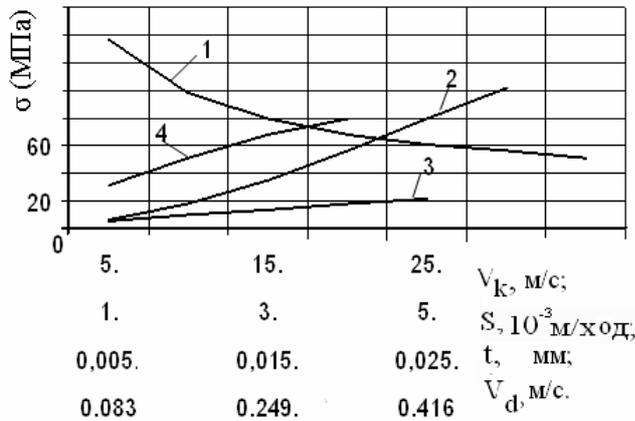


Рис. 5. Расчетные зависимости значений напряжений сжатия σ (МПа) от суммарных сил P_y при шлифовании керамики Al_2O_3 кругом из КНБ марки ЛО20100 % СМ1К7. 1 – $P_y = f(V_k)$, 2 – $P_y = f(S_{non})$, 3 – $P_y = f(t)$, 4 – $P_y = f(V_d)$, режимы шлифования:
 $V_k = 30 \text{ м/с}$, $S = 10^{-3} \text{ м/ход}$,
 $t = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $V_d = 0,166 \text{ м/с}$

Как видно из приведенных расчетов, максимальное напряжение составляет величину порядка 2 ГПа (рис. 4). Прослеживается увеличение значений напряжений с уменьшением зернистости круга и глубины резания. Однако эти напряжения являются меньшими, чем допустимые на сжатие керамики, которые по данным работ Н.А. Малининой, С.Н. Кулькова, С.П. Буйкова [4] составляют 3 ГПа. Временные напряжения вызываемые суммарными силами резания составляют величину порядка 150 МПа, т.е. на несколько порядков ниже предела прочности керамики на сжатие. Следовательно, при шлифовании разрушений керамического слоя под действием временных сжимающих напряжений произойти не может.

Выводы.

1. Учитывая изложенный материал и то, что процесс шлифования происходит без ударов, можно утверждать, что динамика процесса шлифования не оказывает существенного влияния на образование трещин

2. Аналитическое исследование процесса шлифования показало, что под действием единичных сил P_y могут возникать напряжения сжатия, достигающие до 1...2 ГПа. Однако предел прочности керамики на сжатие значительно выше, поэтому под действием этих сил трещины поверхностного слоя образовываться не могут.

3. Пористость напыленного керамического слоя (15%) увеличивает стойкость слоя к образованию трещин, обеспечивая квазивязкую деформацию этого слоя и при вскрытии поры зерном резко (в десятки раз) снижая напряжение, действующее на керамический слой внутри поры.

4. Проведенный анализ возможностей образования трещин под действием единичных и суммарных сил P_y показывает, что появление трещин крайне маловероятно.

1. Евсеев Д.Г. Физические основы процесса шлифования / Д.Г. Евсеев, А. Н. Сальников. – Саратов: изд-ва Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.
2. Жабокрицкий Р.А. Экспериментальное определение температур в зоне шлифования металлов: автореф. дис. на получение ученой степени к.т.н.: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Р.А. Жабокрицкий. – Куйбышев, 1973. – С. 23.
3. Калита В. И. Трехмерные капиллярно-пористые покрытия / В. И. Калита, В. Н. Соколов, В.А. Парамонов // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – № 4. – С. 55 – 61.
4. Кульков С.Н. Негуковское поведение пористого диоксида циркония при активной деформации сжатием / С.Н. Кульков, В.И. Калита, С.П. Буйкова // Журн. техн. физики. – 2002. – Т. 72, № 3. – С. 38 – 42.

5. Лебедев В. Г. Технологические основы управления качеством поверхностного слоя при шлифовании: дис. д.т.н.: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / В.Г. Лебедев. – Одесса., 1991. – 268 с.
6. Лебедев В. Г. Компонентный состав напыленных керамических слоев и его влияние на трещиностойкость при шлифовании / В. Г. Лебедев, Т. В. Чумаченко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2005. – Вып. 2 (42). – С. 82 - 84.
7. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1984. – 320 с.
8. Пат. 13932 Україна, F01M9/00. Спосіб подачі мастильно-охолоджуючої рідини / Чумаченко Т.В., Лебедев В.Г., Зайцев О.М., Уряднікова І. В. – № 10864 ; заявл. 17.11.05 ; опубл. 17.04.06, Бюл. № 4 .
9. Редько С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С.Г. Редько. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1986. – 231 с.
10. Пат. 7676 Україна, В 22 F 7/00 В 05 В 7/20. Склад для газотермічного напилення поверхонь металевих деталей / Чумаченко Т. В., Лебедев В. Г.— № 20040705768 ; заявл. 13.07.04 ; опубл. 15.07.05, Бюл. № 7.
11. Чумаченко Т. В. Технологічне забезпечення якості і продуктивності обробки поверхонь шийок валів роторів газових турбін, напилених мінералокерамікою: дис. к.т.н.: спец.05.02.08 «Технологія машинобудування» / Т.В. Чумаченко. – Одесса., 2011. – 163 с.
12. Хрульков В. А. Механическая обработка деталей из керамики и ситаллов / В. А.Хрульков, В. А. Городеей, А.Я. Головань. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 185 с.
13. Чумаченко Т. В. Фактическое расстояние между режущими зернами в эльборовом круге /Т. В. Чумаченко, В. Г. Лебедев // Проблемы техники. – 2009. – № 2. – С. 124 – 135.
14. Шевченко В. Я. Введение в техническую керамику / В.Я. Шевченко. – М. : Наука, 1993. – 112 с.