

В.Ф. Макаров, А.В. Виноградов

Пермский государственный технический университет

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ СКРУГЛЕННЫХ КРОМОК ОБРАЗЦОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОБРАБОТКИ КРОМОК ДИСКОВ ГТД АБРАЗИВНО-ПОЛИМЕРНЫМИ ЩЕТКАМИ

Обозначена проблема обработки кромок елочных пазов дисков турбин. Представлена конструкция стенда, применяемого для экспериментальной обработки кромок специальных образцов, имитирующих кромки дисков турбин. Проанализированы методы определения профиля (в поперечном сечении) скругленной кромки деталей машиностроения. Объяснен принцип действия и устройство приспособления, предназначенного для измерения радиуса небольшой величины (0–3 мм) скругления кромки образца. Приведена методика измерения профиля скругленной кромки образца с использованием разработанного приспособления.

Одной из технологических проблем при изготовлении дисков ГТД является проблема эффективной и качественной обработки кромок елочных пазов, расположенных на периферии дисков с целью крепления лопаток турбины (рис. 1, 2).



Рис. 1. Диск турбины с елочными пазами

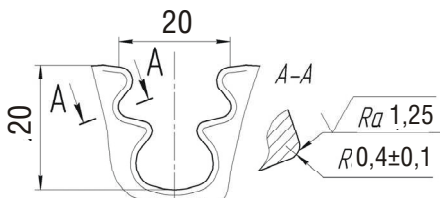


Рис. 2. Елочный паз диска турбины и требования к скругленной кромке паза

Одним из перспективных методов скругления кромок является метод автоматизированной обработки абразивно-полимерными щетками. Ворс щетки состоит из тонких (0,3–1,5 мм в диаметре) нитей из нейлона, в котором присутствуют в определенной концентрации частицы абразива – карбида кремния (рис. 3).



Рис. 3. Абразивно-полимерная щетка

На практике метод реализован при обработке дисков турбины на агрегатном станке несколькими щетками, расположенными так, чтобы обработать пазы по всему периметру кромки (рис. 4).

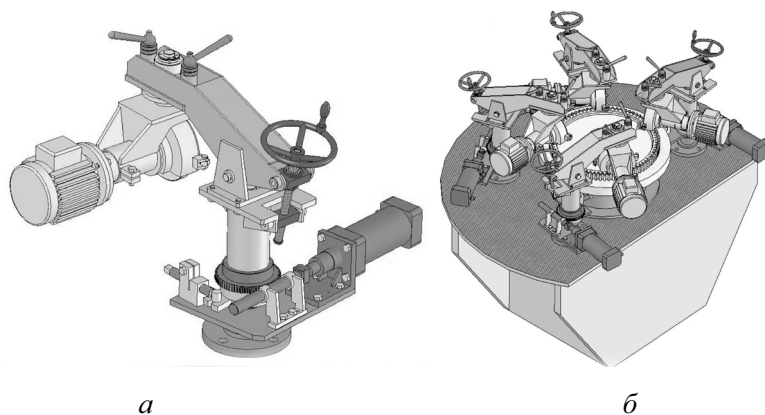


Рис. 4. Агрегатный станок: *а* – отдельный модуль агрегатного станка; *б* – агрегатный станок с четырьмя модулями для обработки дисков турбин абразивно-полимерными щетками

Указанный метод обладает высокой производительностью, позволяет получить требуемые геометрические и физико-механические характеристики в области кромки. Однако на сегодняшний день этот метод малоизучен. Не установлены экспериментальные и теоретические зависимости между выходными параметрами процесса и различными факторами, его определяющими. В частности, неизвестно влияние зернистости абразивного наполнителя ворса щетки, скорости вращения щетки, глубины контакта заготовки

с ворсом на такие выходные параметры, как шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения, геометрию профиля кромки в поперечном сечении.

Для проведения экспериментальных исследований сконструирован лабораторный стенд, позволяющий обрабатывать образцы с целью дальнейшего исследования (рис. 5).

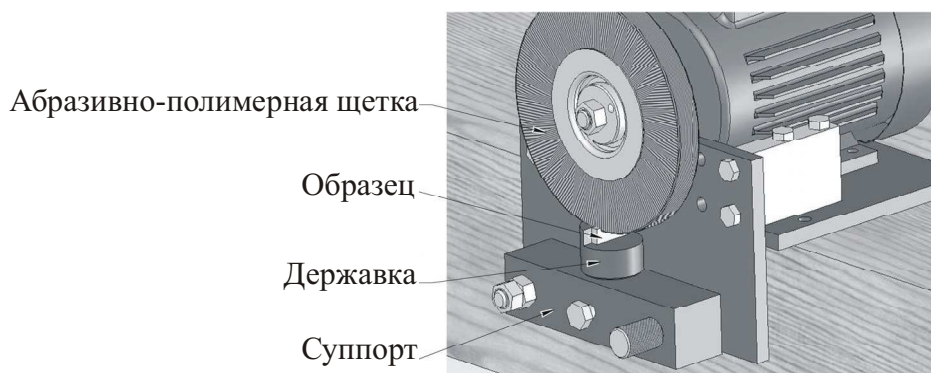


Рис. 5. Лабораторный стенд для обработки образцов

Образец (рис. 6) выполняется в форме пластинки толщиной 2–5 мм, имеющей четыре острые кромки.

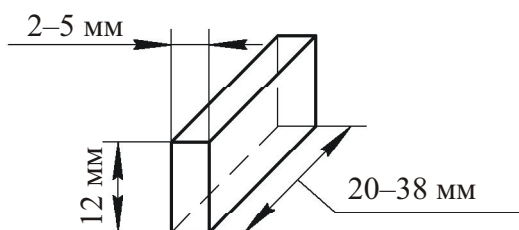


Рис. 6. Образец

Один образец может использоваться в экспериментах как минимум четыре раза. Образцы могут быть изготовлены из различных материалов, применяемых для изготовления дисков. Образец закрепляется в специальной державке, позволяющей регулировать глубину контакта образца с ворсом щетки, разворачивать кромку образца относительно ворса вокруг вертикальной оси на заданный угол. Массивное крепление державки обеспечивает отвод тепла из зоны резания.

Одной из практических проблем исследования является проблема определения профиля скругленной кромки образца в поперечном сечении без его разрушения. Необходимо отметить, что неразрушающий метод обладает тем преимуществом, что позволяет исследовать динамику формообразования, так как мы получаем возможность периодически измерять радиус скругляе-

мой кромки образца во время экспериментальной обработки абразивно-полимерной щеткой.

Существует несколько способов получения наглядного представления о форме кромки в поперечном сечении.

Способ проверки приложением шаблона кромки [1, 2, 3]. В этом способе рабочий (контролер) прикладывает ряд шаблонов к обработанной кромке, в результате чего определяет соответствие размера скругленной кромки размеру того или иного шаблона. Недостатком данного способа является субъективность получаемого результата, а также невозможность точной оценки скругления кромки с переменной кривизной. Математическое описание также является очень грубым и состоит из одного параметра – величины радиуса шаблона. Еще одним недостатком является дискретность измерения, обусловленная наличием определенного конечного количества шаблонов на конкретные значения радиуса скругления.

Другой группой методов определения формы скругленной кромки являются методы, предполагающие *сопоставление профиля кромки и координатной сетки*. Сюда относятся способы измерения с помощью микроскопа или проектора поперечного разреза кромки либо специально подготовленного слепка с кромки. В случае измерения поперечного разреза кромки кромка разрезается поперек и проецируется на координатную сетку при помощи микроскопа или проектора [4, 5, 6]. Математическим описанием в данном случае является массив координат точек, отмеченных на координатной сетке с определенным интервалом по длине профиля кромки. Недостатком данного способа является необходимость получения поперечного сечения кромки и, как следствие, разрушение измеряемой детали.

В случае измерения с помощью микроскопа или проектора специально подготовленного слепка измерению подвергается слепок, т.е. масса из специального материала, нанесенная на кромку, отвержденная, снятая с кромки и разрезанная в поперечном сечении¹. Недостатком данного способа являются определенные трудности в приготовлении слепка, искажение профиля вследствие усыхания слепка в процессе отверждения.

Другой группой методов являются методы, предполагающие *использование оптических датчиков и основанные на явлениях интерференции, дифракции, отражения и преломления света*. Такие системы обладают высокой степенью точности, позволяют получать описание форм поверхностей в различных электронных форматах. Недостатком этих систем является относительно высокая стоимость.

¹ ТУ 2243-015-00482134–2001. Слепочный материал Компар-СТ; Методика измерения геометрических параметров изделий с помощью слепков из полимерных материалов (ОАО «НИИИзмерения»).

Предлагается устройство, позволяющее определять форму (в поперечном сечении) профиля переменной кривизны скругленной кромки. В данном случае профиль кромки аппроксимируется конечным множеством касательных, построенных к профилю кромки под различными углами (рис. 7).

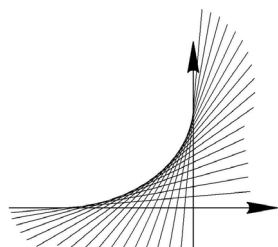


Рис. 7. Профиль скругленной кромки
визуально выделен множеством касательных

Каждая касательная описывается математически длиной нормали δ_α , проведенной к ней из центра системы координат XOY (рис. 8) и углом α между касательной и осью абсцисс. Центр системы координат находится на пересечении смежных кромке поверхностей. Ось Y системы координат лежит на одной из поверхностей, смежных кромке, ось X лежит на другой поверхности, смежной кромке. Смежные поверхности, образующие кромку, должны быть взаимно перпендикулярны, это требование оговаривается при изготовлении образцов. В конечном итоге, профиль кромки представляется массивом данных, содержащих углы α и соответствующие длины нормалей δ_α к касательным.

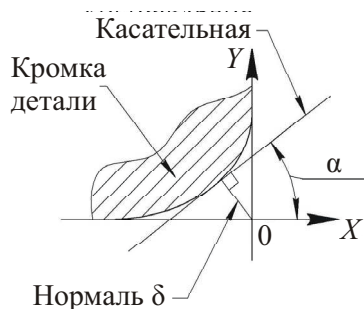


Рис. 8. Касательная к кромке и ее математическое описание
в системе координат, оси которой совпадают с проекциями
смежных кромке взаимно перпендикулярных поверхностей

Предложена принципиальная схема устройства (рис. 9), позволяющего для заданного угла α в диапазоне $0-90^\circ$ определить длину нормали к касательной δ_α .

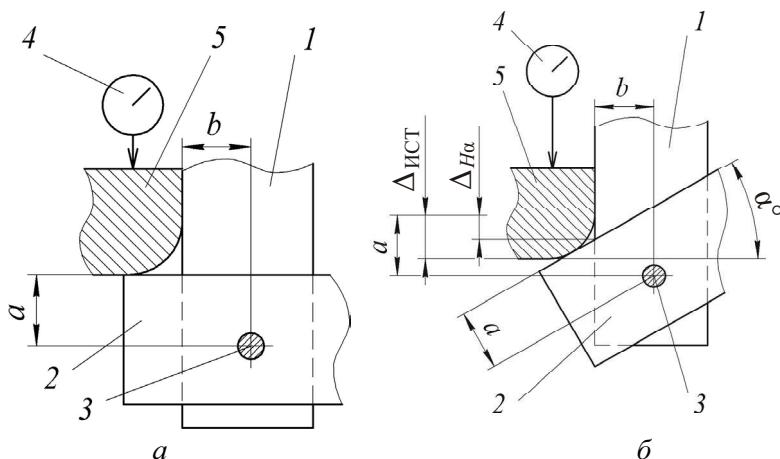


Рис. 9. Принципиальная схема устройства: *а* – рычаг находится в номинальном положении ($\alpha = 0^\circ$); *б* – рычаг расположен под произвольным углом α

Устройство состоит из четырех основных элементов: рычага 2, перемещающего деталь 5 вдоль базовой поверхности 1, оси 3, скрепляющей базовую поверхность и рычаг, и микрометрического индикатора 4.

Принцип работы:

Если кромка детали не имеет скругления и, соответственно, проекцией ее в поперечном сечении является точка, то разница между показанием индикатора 4 при угле расположения рычага $\alpha = 0^\circ$ (рис. 9, *а*) и при заданном угле α (рис. 9, *б*) может быть вычислена по формуле:

$$\Delta_{Ha} = a - \frac{a - b \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)}, \quad (1)$$

где a – расстояние от оси 3 до рабочей поверхности рычага 2;
 b – расстояние от базовой поверхности 1 до оси 3.

При постановке на устройство детали 5 со скругленной кромкой разница $\Delta_{ИСТ}$ между показанием индикатора 4 при угле расположения рычага $\alpha = 0^\circ$ и при заданном угле α будет больше «идеального» значения разницы (Δ_{Ha}), вычисленного по (1), на величину ординаты точки пересечения касательной с осью ординат Y (рис. 8; рис. 9, *б*). Поэтому длину нормали, проведенной к касательной (рис. 8) можно вычислить по формуле:

$$\delta_\alpha = (\Delta_{ИСТ} - \Delta_{Ha}) \cos(\alpha), \quad (2)$$

или, с учетом формулы (1), перепишем в виде:

$$\delta_\alpha = \Delta_{ИСТ} \cos(\alpha) + a(1 - \cos(\alpha)) - b \sin(\alpha). \quad (3)$$

В выражении (2) величина $\Delta_{\text{ист}}$ измеряется индикатором 4 для заданного в диапазоне $0-90^\circ$ угла α как разность между показаниями индикатора в положении $\alpha = 0^\circ$ и при заданном угле α , параметры a и b известны, они зависят от конструктивного исполнения измерительного устройства.

Соответственно, инструментальная погрешность измерения нормали $d\delta_\alpha$ будет зависеть от точности измерения микрометрического индикатора 4 ($d\Delta_{\text{ист}}$), погрешности, с которой были измерены величины a и b (da и db соответственно), точности установки заданного угла ($d\alpha$) и может быть вычислена по формуле

$$d\delta_\alpha = d\Delta_{\text{ист}} \cos(\alpha + d\alpha) + da(1 - \cos(\alpha + d\alpha)) - db \sin(\alpha + d\alpha). \quad (4)$$

Имея массив данных α, δ_α для углов α через определенный интервал в диапазоне от 0 до 90° , переходим к линейной форме записи касательных в системе координат XOY в виде

$$y = k_\alpha x + c_\alpha, \quad (5)$$

где $k_\alpha = \text{tg}(\alpha), \quad c_\alpha = \frac{\delta_\alpha}{\cos(\alpha)}.$

При совместном рассмотрении выражений типа (5) по известным математическим законам и зависимостям можно легко определить центры дуг, образующих профиль скругления с переменным радиусом кривизны, а также величины радиусов дуг. Так, известно, что точка пересечения двух биссектрис, проведенных через точки пересечения касательных и, соответственно, делящих углы между ними, совпадает с центром дуги (рис. 10). Используя это свойство, профиль скругленной кромки можно представить сопряженными дугами с известными координатами точек центров и величинами радиусов.

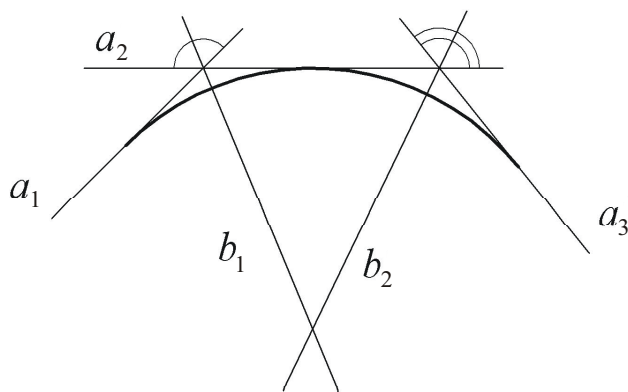


Рис. 10. Определение центра дуги как точки пересечения биссектрис углов пересечения трех касательных (a_1, a_2, a_3 – касательные; b_1, b_2 – биссектрисы)

Также по известным математическим зависимостям, используя выражения (5), можно осуществить сплайн-интерполяцию, аппроксимировав профиль скругления сплайнами.

На рис. 11 представлена конструктивная реализация устройства для измерения радиуса.

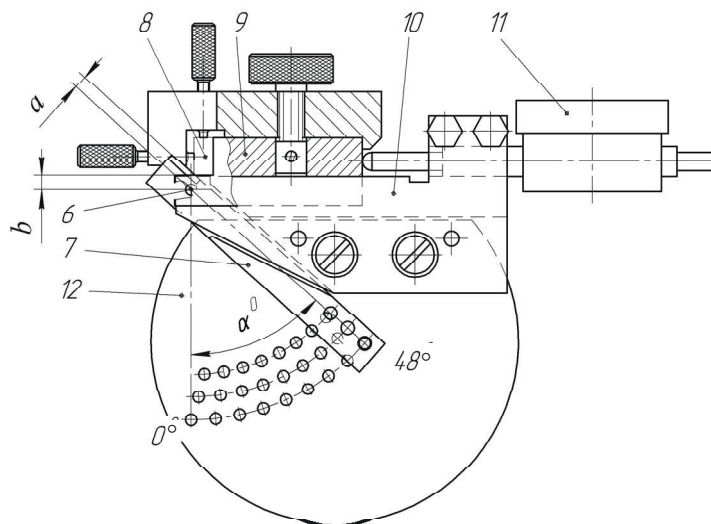


Рис. 11. Конструкция радиусомера. Схема измерения 1

При повороте вокруг оси 6 рычаг 7 давит на образец 8, заставляя таким образом ползун 9 двигаться вдоль корпуса 10, перемещая шток микрометрической головки 11, закрепленной в цанговом зажиме корпуса.

Отсчет угла поворота рычага α дискретный, осуществляется совмещением отверстий рычага и плиты 12 с периодом в 2° в диапазоне углов $0-48^\circ$.

По конструктивным причинам в предлагаемом устройстве не удастся измерить профиль скругления в диапазоне углов $0-90^\circ$. Для того чтобы осуществить измерение целиком, необходимо после осуществления измерения по схеме 1 (рис. 11) перевернуть образец и закрепить в направляющем ползуне 9 по схеме 2 (рис. 12), после чего провести замеры в диапазоне углов $0-48^\circ$ и выполнить расчеты по (3) с заменой в этой формуле угла α на угол α' .

Данные по нормальям к касательным по схеме измерения 1 и 2 можно объединить в единую группу данных. Обозначим угол касательной к кромке по схеме измерения 2 как α' , тогда преобразование углов из α' в α производится по формуле

$$\alpha = 90^\circ - \alpha'.$$

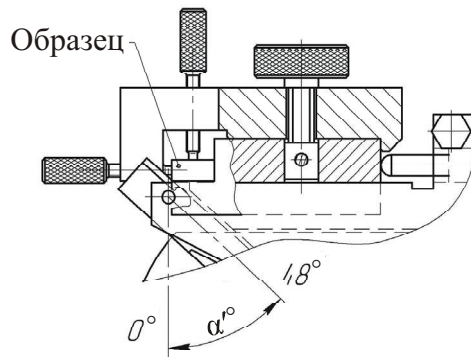


Рис. 12. Фрагмент конструкции радиусомера.
Схема измерения 2

Данные по нормальям δ_a и $\delta_{a'}$ для углов 44° и 46° должны перекрестно совпадать, также должны перекрестно совпадать данные для углов 42° и 48° по двум схемам измерения.

Необходимо отметить, что определенная трудность в изготовлении устройства, изображенного на рис. 11, заключается в нахождении фактических параметров a и b . Эти параметры должны быть измерены с максимальной точностью непосредственно перед операцией сборки устройства. Также эти параметры могут быть определены после измерения эталонного образца с известным радиусом скругленной кромки (r) по следующим формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{i_1 - i_2}{j_2 - j_1} - r \\ b = \frac{i_1 - i_2}{j_2 - j_1} j_2 + i_2 - r \\ i_1 = (\operatorname{tg}(\alpha_2) - \operatorname{tg}(\alpha_1))^{-1} \Delta_{12} \\ j_1 = \sin\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) / \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right), \\ i_2 = (\operatorname{tg}(\alpha_3) - \operatorname{tg}(\alpha_1))^{-1} \Delta_{13} \\ j_2 = \sin\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_3}{2}\right) / \cos\left(\frac{\alpha_3 - \alpha_1}{2}\right) \\ \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 \end{array} \right.$$

где Δ_{12} и Δ_{13} – отклонения индикатора при повороте рычага 7 (рис. 11) из положения α_2 в α_1 и из положения α_3 в α_1 соответственно.

Список литературы

1. Шаблоны радиусные ГОСТ 4126–82.
2. Frane J.T. Craftsman's Illustrated Dictionary of Construction Terms, Craftsman Book Company, 1994.
3. Kennedy C.W., Hoffman E.G., Bond S.D. Inspection and Gaging, Industrial Press Inc., 1987.
4. Микроскопы УИМ-21; УИМ-23. Описание и руководство к пользованию.
5. Иванов А.Г. Измерительные приборы в машиностроении. – М.: Изд-во стандартов, 1981.
6. ТУЗ–3.2091–88; ТУЗ–3.2259–91. Проектор измерительный ПИ.

Получено 7.04.2010