

постоянном же весе оболочечного элемента величина $\mu_{ст}$ здесь также прямо пропорциональна статическому критическому давлению.

Заключение. Таким образом, при статическом нагружении осевым сжатием, внешним давлением ребристых цилиндрических оболочечных элементов при постоянном весе величина $\mu_{ст}$ прямо пропорциональна статическим критическим нагрузкам, а при постоянной заданной величине нагрузки – обратно пропорциональна их весу, и значит минимуму веса ребристых оболочечных элементов и соответственно их оптимальному подкреплению отвечает максимум коэффициента относительной эффективности подкрепления $\mu_{ст}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амиро, И. Я. Теория ребристых оболочек / И. Я. Амиро, В. А. Заруцкий // Методы расчета оболочек: в 5 т.. – К. : Наук. думка, 1980. – 368 с.
2. Заруцкий, В. А. Устойчивость при действии импульсных нагрузок ортотропных цилиндрических оболочек, предварительно нагруженных статическими нагрузками // В. А. Заруцкий, В. И. Игнатюк // Сопротивление материалов и теория сооружений : респ. межвед. науч.-техн. сб. – К., 1989. – Вып. 54. – С. 124–128.

УДК 620.178.7

МЕХАНИЗМЫ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ЛОПАТОК РОТОРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МАШИН

Крупич Б.¹, Барсуков В.Г.², Хвисевич В.М.³, Илькевич М.А.², Онысько С.Р.³

1) Белостокский политехнический университет;

г. Белосток, Республика Польша;

2) Гродненский государственный университет имени янки Купалы;

г. Гродно, Республика Беларусь

3) Брестский государственный технический университет;

г. Брест, Республика Беларусь

Устройства центробежного типа, называемые также центробежными ускорителями, или турбомашинами, широко распространены в различных областях техники и технологии. Они являются рабочими органами вентиляторов систем пневмотранспорта, центробежных сепараторов и классификаторов, центробежно-ударных измельчителей, оборудования для подачи мелкодисперсного топлива в виде измельченного каменного угля и др. Одной из важнейших проблем при эксплуатации таких машин является газообразное изнашивание деталей ротора, называемое также в ряде стран эрозией. Опыт эксплуатации показывает, что нарастающее во времени разрушение поверхности рабочих (разгонных) лопастей сопровождается изменением основных характеристик оборудования, в том числе заметным уменьшением коэффициента полезного действия, а также увеличением динамических нагрузок на валы и подшипники вследствие развивающегося дисбаланса ротора [1-3]. При этом, несмотря на достигнутый прогресс в конструировании, производстве и использовании таких устройств,

теоретические и конструкторско-технологические вопросы обеспечения их износостойкости изучены недостаточно, что обусловлено сложностью протекающих в рабочей зоне контактных динамических явлений [1,3,4].

Цель работы – с позиций механики микроконтактного взаимодействия частиц с лопастью проанализировать параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) и связанные с ними доминирующие механизмы разрушения поверхностных слоев материала лопасти.

При анализе НДС материала лопасти в зонах ударного и фрикционного скользящего контакта исходили из того, что имеющиеся аналитические решения, основанные на теории Герца, справедливы только для низких скоростей динамического взаимодействия. При средних и высоких скоростях удара необходимо учитывать возможность развития упругопластического процесса контактного нагружения.

Для упрощенных оценочных расчетов примем для частиц абразива форму сферы. Используя энергетическую теорию удара, найдем усилие F , возникающее при столкновении частицы массой m , движущейся со скоростью V , с поверхностью детали, моделируемой упругопластическим полупространством. Кинетическая энергия E_k частицы

$$E_k = \frac{mV^2}{2} \quad (1)$$

преобразуется в работу деформирования A :

$$A = \int_0^{\delta_{\max}} F(\delta) d\delta = \int_0^{F_{\max}} F(\delta) \frac{d\delta}{dF} dF, \quad (2)$$

где: F, F_{\max} – соответственно текущее и максимальное значение усилия, возникающего в зоне контакта;

δ – сближение центров контактирующих тел.

Известно, что между сближением центров контактирующих тел δ и усилием прижатия F существует взаимосвязь вида [5]:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9F^2}{16RE^2}}, \quad (3)$$

где: R – приведенный радиус кривизны контактирующих тел, численно равный для контакта сферы с плоскостью радиусу сферы;

E – эффективный модуль упругости.

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \quad (4)$$

где: ν_1, ν_2, E_1, E_2 – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости контактирующих тел.

Найдя из (3) $\frac{d\delta}{dF}$ и подставив его значение в (2), после интегрирования с учетом (1) получаем

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{2}{5} \sqrt[3]{\frac{9F_{\max}^5}{16RE^2}},$$

откуда значение максимального усилия в зоне контакта, возникающего в результате ударного взаимодействия частицы с деталью

$$F_{\max} = \sqrt[5]{\left(\frac{5mV^2}{4}\right)^3 \frac{16RE^2}{9}} \quad (5)$$

Масса частицы m может быть вычислена как произведение плотности материала частицы γ на объем сферы радиуса R

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \gamma$$

Максимальное значение контактных напряжений p_0 можно определить по формуле Герца [5]

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{6F_{\max} E^2}{R^2}} \quad (6)$$

Эквивалентные напряжения в наиболее опасной точке приповерхностного слоя составляют приблизительно 0,62 от величины наибольших контактных давлений [5].

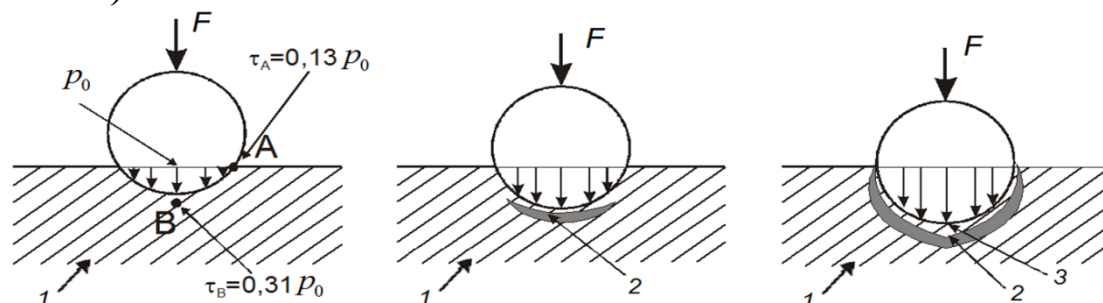
Подставив значения F_{\max} и m в (6), найдем максимальные контактные напряжения, возникающие при ударе:

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{6F_{\max} E^2}{R^2}} = 0,837 \sqrt[5]{E^4 \gamma V^2} \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), в области упругого деформирования контактные напряжения не зависят от радиуса, но зависят от модулей упругости контактирующих тел и скорости соударения, а также плотности γ материала частицы. Из формулы (7) можно получить выражение для определения скорости V частицы, обеспечивающей создание давления p_0 :

$$V = \sqrt{\frac{p_0^5}{(0,837)^5 E^4 \gamma}} = 1,56 \sqrt{\frac{p_0^5}{E^4 \gamma}} \quad (8)$$

Выполненные ранее исследования показали [4], что при статическом и динамическом взаимодействии твердых частиц с поверхностью детали возможны три следующих вида деформирования (рисунок 1): идеально упругое (рисунок 1а); стесненное упругопластическое (рисунок 1б); свободное упругопластическое (рисунок 1в).



а) б) в)

1 – упругая зона; 2 – пластическая зона; 3 – ядро (зона затрудненной деформации).
Рисунок 1 – Стадии деформирования материала при контактном взаимодействии со сферической частицей

После выхода зоны текучести на поверхность дальнейшее повышение скорости взаимодействия частицы с деталью будет сопровождаться ростом размеров лунки подобно опытам Бринелля.

Теоретически вопрос упругопластического деформирования при ударном нагружении и фрикционном скользящем контакте исследован недостаточно и основным способом изучения повреждения поверхности является эксперимент.

Для зоны фрикционного скользящего контакта в формулу (6) в качестве прижимающей силы необходимо подставить силу Кориолиса F_C , зависящую от угловой скорости вращения ротора, массы частицы и скорости скольжения относительно лопасти ротора.

Рассмотрим динамику движения частицы под действием разгоняющей центробежной силы инерции F_u и тормозящей силы трения F_{mp} . Центробежная сила инерции F_u направлена вдоль радиуса от центра вращения и вызывает ускоренное движение частицы. Ее величина равна произведению массы частицы m на центростремительное ускорение

$$F_{mp} = m\omega^2 r, \quad (9)$$

где: ω – угловая скорость вращения ротора;
 r – расстояние от центра ротора до частицы.

Для расчета контактных напряжений необходимо знать силу Кориолиса F_C , которая равна произведению массы частицы m на Кориолисово ускорение (удвоенное произведение угловой скорости ω вращения ротора на скорость V_r скольжения частицы относительно лопасти)

$$F_C = m \cdot 2\omega r V_r = 2m\omega r \dot{r} \quad (10)$$

Сила трения F_{mp} от прижатия частицы к лопасти силой Кориолиса может быть вычислена с использованием закона трения Амонтона - Кулона

$$F_{mp} = fF_C = 2mf\omega r \dot{r} \quad (11)$$

где: f – коэффициент трения частицы о лопасть ротора.

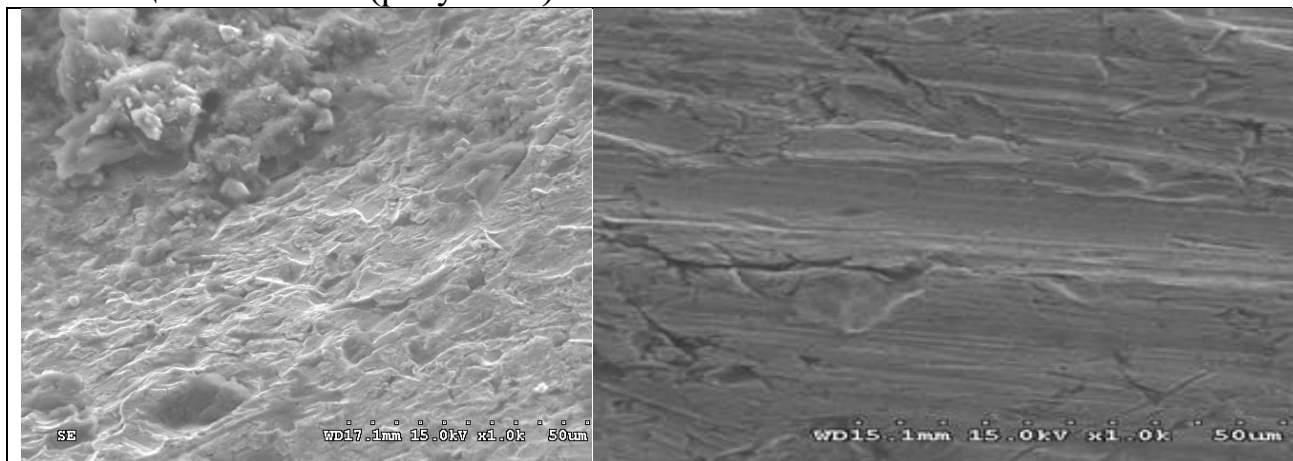
В результате выполненных теоретических исследований получены аналитические зависимости, позволяющие определять скорость движения частицы в любой точке лопасти ротора и действующую силу Кориолиса, а также осуществлять численное моделирование влияния физико - механических свойств контактирующих тел (модули упругости, коэффициенты Пуассона), коэффициента трения и угловой скорости вращения ротора на величину контактных напряжений, возникающих в срединной и концевой частях лопасти ротора при скольжении относительно ее частиц сферической формы.

В качестве модельного абразивного материала при оценочных расчетах принят кварц со следующими показателями механических свойств: модуль упругости $E_q = 50,3$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_q = 0,23$, плотность $\gamma_q = 2650$ кг/м³. Выбор кварца обусловлен тем, что он широко применяется в виде измельчаемого сырья на предприятиях стекольной промышленности. Кроме того, в виде абразивных примесей он может присутствовать в дисперсных материалах, перемещаемых с использованием систем технологического пневмотранспорта. Для стальной лопасти модуль упругости принят $E_s = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_s = 0,3$. Эффективный модуль упругости для такого сочетания материалов, рассчитанный по формуле (4), составляет $E_s = 42773$ МПа.

Результаты выполненных расчетов показали, что при ударном взаимодействии, а также при фрикционном скользящем контакте для удаленных от оси вращения точек лопасти такие эквивалентные напряжения, рассчитываемые по энергетической теории прочности, во многих случаях составляют сотни мегапаскалей. Например, для напорных вентиляторов систем пневмотранспорта при вращении ротора диаметром $D = 2000$ мм с угловой скоростью $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ максимальные значения контактных напряжений, обусловленные действием силы Кориолиса на частицу примеси кварца диаметром $d = 1$ мм, составляют в середине радиальной лопасти $p_0 = 500,1$ МПа, а на конце – $p_0 = 629,9$ МПа. При этом эквивалентные напряжения в подповерхностном слое в точке B (рисунок 1а), рассчитанные по энергетической теории прочности, составляют $\sigma_{эВ} = 310$ МПа, а на конце лопасти – $\sigma_э = 390,6$ МПа.

Применительно к центробежно-ударным измельчителям при вращении роторов диаметром $D = 1000$ мм с угловой скоростью $\omega = 450 \text{ с}^{-1}$ при скольжении такой же частицы кварца диаметром $d = 1$ мм вдоль разгонной лопасти расчетные значения контактных и эквивалентных напряжений составляют: – в середине лопасти $p_0 = 825,2$ МПа, $\sigma_{эВ} = 511,6$ МПа; на конце лопасти $p_0 = 1039,5$ МПа, $\sigma_э = 644,5$ МПа. С увеличением диаметра частиц контактные и эквивалентные напряжения возрастают.

Как видно из этих данных, эквивалентные напряжения в зоне контакта превышают пределы текучести конструкционных сталей и неизбежно вызывают эрозионное разрушение поверхностных слоев лопасти. Причем доминирующими являются два механизма разрушения: многократное пластическое деформирование с наклепом и растрескиванием поверхности в зоне ударного нагружения и пластическое пропахивание поверхностных слоев в зоне фрикционного скользящего контакта (рисунок 3).



а) зона ударного изнашивания б) зона фрикционного изнашивания

Рисунок 3 – Микрофотографии поверхностей лопасти в характерных зонах

Разработана комплексная методика расчетной оценки контактных напряжений, возникающих при ударном и фрикционном скользящем контакте грубодисперсных частиц с рабочими лопастями роторов центробежных машин. Показано, что при ударном взаимодействии, а также при фрикционном скользящем контакте для удаленных от оси вращения точек лопасти эквивалентные напря-

жения, рассчитываемые по энергетической теории прочности, во многих случаях превышают пределы текучести конструкционных сталей и неизбежно вызывают эрозионное разрушение поверхностных слоев лопасти. Доминирующими являются два механизма разрушения: многократное пластическое деформирование с наклепом и растрескиванием поверхности в зоне ударного нагружения и пластическое пропахивание поверхностных слоев в зоне фрикционного скользящего контакта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chmielniak, T. Erozja pyłowa w maszynach przepływowych. Przegląd Zagadnień. / T. Chmielniak // Zagadnienia eksploatacji maszyn. – 1988. (76), № 4, С 339–458.
2. Войтехович, П. Е. Определение основных параметров ударного взаимодействия абразивных частиц с лопастями ротора-ускорителя центробежной мельницы / П. Е. Войтехович, Д. Н. Боровский, А. В. Тоболич, П. С. Гребенчук. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018, № 3, С. 12–15.
3. Крупич, Б. Проблемы обеспечения износостойкости деталей систем пневмотранспорта // Трение и износ. – 2002 (23), № 5, С. 477–482.
4. Крупич, Б. Моделирование микроконтактных взаимодействий при газоабразивном изнашивании сталей с учетом деформационного упрочнения / Б. Крупич, В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко // Трение и износ, 2019, Том 40, № 6, С. 644–653.
5. Свириденко, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта. / А. И. Свириденко, С. А. Чижик, М. И. Петроковец – Минск : Наука и техника, 1990. – 272 с.

УДК 621.7

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ

Мищурок О. М., Нерода М. В., Веремейчик А. И.

Брестский государственный технический университет;

г. Брест, Республика Беларусь

С 70-х годов XIX века сталь является основным конструкционным материалом. Сталь обладает высокими прочностью, вязкостью разрушения, температурой плавления и низкой теплопроводностью. Но самым важным достоинством стали как конструкционного материала является возможность улучшения ее эксплуатационно-технических свойств за счет применения термической обработки.

В настоящее время широкое распространение в промышленном и ремонтном производствах получили упрочняющие технологии, позволяющие повышать эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин и экономить материальные и трудовые ресурсы. Как правило, данные технологии ориентированы на придание повышенных физико-механических характеристик поверхностному слою при сохранении неизменными свойств основного металла детали [1].

Изменить эксплуатационные свойства поверхности в необходимом направлении можно различными способами и эти способы можно разделить на два вида:

- нанесение на поверхность нового материала с необходимыми свойствами;
- изменение состава поверхностного слоя металла, обеспечивающего изменение свойств [2].