

УДК 531.66

А.Г. ПОПОВИЧ, Н.В. ГОНЧАР, Д.Н. СТЕПАНОВ

Запорожский национальный технический университет, Украина

РАСЧЕТ СИЛ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛАСТИЧНОГО ВОЛОКНА НА ДЕТАЛЬ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ

Представлен силовой анализ в зоне обработки полимерно-абразивным инструментом плоского образца в момент первого удара. В задаче взято одно полимерно-абразивное волокно, закрепленное в ступице. Полученные уравнения использовали для расчета конкретной задачи отделочной обработки образца из титанового сплава BT8-M. Предложены некоторые упрощения и обобщения. Установлено, что уровень сил удара стандартного дискового инструмента на основе полимерно-абразивных волокон невысок, что дает возможность применять такие инструменты для финишной обработки тонкостенных деталей.

Ключевые слова: финишная обработка, образец, полимерно-абразивный инструмент, упругое волокно, сила удара.

Введение

К ответственным деталям авиадвигателей предъявляются повышенные требования к качеству поверхности, что заставляет применять к ним отделочные методы обработки. А так как большинство таких деталей являются сложнопрофильными, необходимо применять инструменты с упругими элементами, способными обеспечивать равномерную обработку фасонных поверхностей и труднодоступных мест деталей. К тому же, эти детали изготавливают из труднообрабатываемых материалов, таких как никелевые и титановые жаропрочные сплавы.

Хорошо проявили себя для такого вида обработки инструменты на основе полимерно-абразивных волокон (рис. 1), которые представляют собой щеточный инструмент вращательного действия. Упругие волокна (полиамид с равномерно распределенными в нем абразивными частицами определенной зернистости) закреплены в ступице.

Еще одной проблемой является то, что авиационные детали являются тонкостенными и требуют при обработке минимального силового воздействия.

Целью данной работы было рассчитать уровень силового воздействия полимерно-абразивного волокна на поверхность детали.

1. Методика расчета сил

Оценку силы ударного воздействия полимерно-абразивного инструмента (ПАИ) дискового типа на плоский образец проводили для единичного волокна без учета его взаимодействия с соседними полимерно-абразивными волокнами.

Инженерный метод расчета на удар основан на предположении, что вся кинетическая энергия, которой обладало ударяющее тело до столкновения с ударяемым, полностью переходит в потенциальную энергию системы в момент ее наибольшей деформации при ударе.

Кинетическую энергию одного полимерно-абразивного волокна определяем как кинетическую энергию стержня T , вращающегося вокруг неподвижной оси [1] – оси вращения полимерно-абразивного инструмента (рис. 1):

$$T = \frac{1}{2} \cdot I_0 \cdot \omega^2, \quad (1)$$

где I_0 – момент инерции стержня относительно оси вращения щетки,

ω – угловая скорость вращения щетки.

Момент инерции I_0 находим по формуле:

$$I_0 = I_c + m \cdot OC^2, \quad (2)$$

где I_c – момент инерции стержня относительно оси, проходящей через его центр масс (середину) параллельно оси вращения щетки;

m – масса стержня;

OC – расстояние между двумя упомянутыми осями (рис. 1).

Момент инерции стержня I_c определяем следующим образом [1]:

$$I_c = \frac{1}{12} \cdot m \cdot L^2, \quad (3)$$

где L – вылет волокна.

Расстояние между двумя упомянутыми осями можно определить так:

$$\sigma_c = \frac{D}{2} - \frac{L}{2}, \quad (4)$$

где D – диаметр щетки.

Угловая скорость вращения щетки:

$$\omega = \frac{2 \cdot v_{\text{окр}}}{D}, \quad (5)$$

где $v_{\text{окр}}$ – окружная скорость точек полимерно-абразивного волокна, находящихся на расстоянии $\frac{D}{2}$ от оси вращения щетки.

Подставив выражения (3) и (4) в формулу (2), а затем полученное выражение I_0 и ω из формулы (5) – в формулу (1), получим:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot m \cdot L^2 + m \cdot \left(\frac{D}{2} - \frac{L}{2} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot v_{\text{окр}}}{D} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\text{окр}}^2 \cdot \left(\left(1 - \frac{L}{D} \right)^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^2 \right). \end{aligned}$$

Материал полимерно-абразивного волокна – это смесь полиамида плотностью $\rho_{\text{пам}}$ и абразивных частиц плотностью $\rho_{\text{абр}}$. Тогда усредненная плотность полимерно-абразивного волокна:

$$\rho = \rho_{\text{абр}} \cdot c_{\text{абр}} + \rho_{\text{пам}} \cdot c_{\text{пам}}, \quad (6)$$

где $c_{\text{абр}}$ и $c_{\text{пам}}$ – объемные концентрации соответственно абразива и полиамида в материале полимерно-абразивного волокна.

Масса одного полимерно-абразивного волокна:

$$m = \rho \cdot S \cdot L, \quad (7)$$

где S – площадь круглого поперечного сечения волокна ($S = \pi d^2/4$, где d – диаметр полимерно-абразивного волокна).

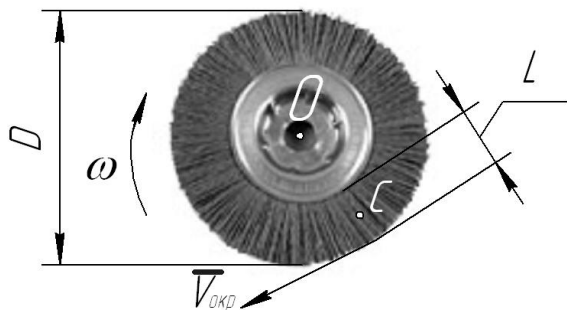


Рис. 1. Общий вид дискового полимерно-абразивного инструмента с основными характеристиками

Потенциальная энергия деформации системы состоит из потенциальной энергии деформации изо-

гнутого стержня (волокна) и потенциальной энергии соприкасающихся абразивного зерна и материала обрабатываемой заготовки.

Потенциальную энергию деформированного волокна ищем, рассматривая это волокно как стержень, жестко зашпеленный одним концом (в ступице ПАИ), а другим концом ударяющийся о неподвижную опору (поверхность детали). В момент удара ускорение зашпеленного конца стержня равно нулю, а ускорение конца стержня, ударяющегося о деталь, имеет максимальное значение. Тогда в момент удара стержень (рис. 2) будет нагружен:

- силами инерции, интенсивность которых линейно меняется от нуля в месте зашпеленения до значения q_{max} на свободном конце;
- силой реакции P со стороны материала детали.

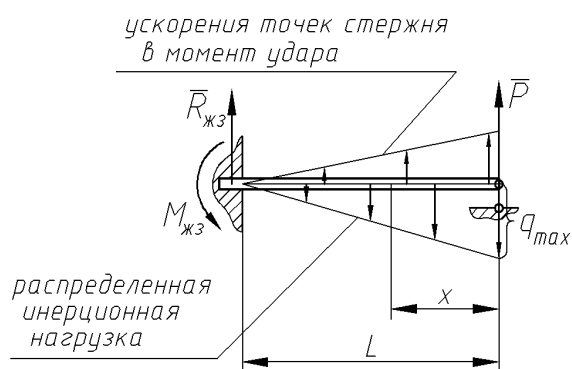


Рис. 2. Схема нагружения стержня в момент удара

Такая система является один раз статически неопределимой. Раскрывая статическую неопределимость этой системы, можно установить связь между силой P и величинами q_{max} и L [3]:

$$P = \frac{11}{40} \cdot q_{\text{max}} \cdot L. \quad (8)$$

Тогда изгибающий момент в поперечном сечении стержня на расстоянии x от его незашпеленного конца определится выражением [3]:

$$M(x) = \frac{1}{2} \cdot q_{\text{max}} \cdot L \cdot x \cdot \left(\frac{11}{20} - \frac{x}{L} + \frac{1}{3} \cdot \frac{x^2}{L^2} \right). \quad (9)$$

Потенциальную энергию деформированного стержня $U_{\text{изг}}$ определяем следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} U_{\text{изг}} &= \int_0^L \frac{(M(x))^2}{2 \cdot E_{\text{корд}} \cdot I_z} dx = \frac{11 \cdot q_{\text{max}}^2 \cdot L^5}{22400 \cdot E_{\text{корд}} \cdot I_z} \approx \\ &\approx 5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{q_{\text{max}}^2 \cdot L^5}{E_{\text{корд}} \cdot I_z}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $E_{корд}$ – модуль Юнга полимерно-абразивного корда,

I_z – момент инерции кругового поперечного сечения полимерно-абразивного волокна относительно оси, проходящей через его диаметр ($I_z = \pi d^4 / 64$).

Потенциальную энергию деформации абразивного зерна и материала детали оцениваем с помощью формулы для потенциальной энергии $U_{конт}$ прижимаемых друг к другу упругих шаров [4]. При этом поверхность детали считаем плоской, т.е. $R_{дет} \rightarrow \infty$, тогда:

$$U_{конт} = \frac{8}{15} \cdot h^{5/2} \cdot \frac{\sqrt{R_{абр}}}{\frac{1-v_{абр}^2}{E_{абр}} + \frac{1-v_{дет}^2}{E_{дет}}}, \quad (11)$$

где $E_{абр}$, $E_{дет}$ и $v_{абр}$, $v_{дет}$ – модули Юнга и коэффициенты Пуассона абразива и материала детали соответственно;

$R_{абр}$ – радиус абразивного зерна;

h – величина упругого сближения абразивного зерна и детали.

Теперь мы можем записать уравнение энергетического баланса:

$$U_{изг} + U_{конт} = T. \quad (12)$$

Для определения двух неизвестных величины q_{max} и h получим еще одно уравнение, приравняв выражение (8) для силы P к силе сжатия абразивного зерна и детали [4] в момент их наибольшей деформации при ударе:

$$\frac{11}{40} \cdot q_{max} \cdot L = \frac{4}{3} \cdot h^{3/2} \cdot \frac{\sqrt{R_{абр}}}{\frac{1-v_{абр}^2}{E_{абр}} + \frac{1-v_{дет}^2}{E_{дет}}}. \quad (13)$$

Решая это уравнение совместно с уравнением энергетического баланса, можно определить величины q_{max} и h , а затем величину P найти по формуле (8).

2. Результаты расчетов

Рассчитаем силу ударного воздействия полимерно-абразивного волокна на плоский образец из титанового сплава ВТ8-М.

Исходные данные:

$\rho_{абр} = 3750 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{пам} = 1140 \text{ кг/м}^3$ – плотность абразивных частиц и полиамида, соответственно;

$c_{абр} = 0,4$, $c_{пам} = 0,6$ – объемная концентрация абразива и полиамида, соответственно;

$d = 1 \text{ мм}$, $L = 12 \text{ мм}$ – диаметр и вылет полимерно-абразивного волокна, соответственно;

$D = 75 \text{ мм}$ – диаметр дискового ПАИ;

$v_{окр} = 4 \text{ м/с}$ – окружная скорость;

$R_{абр} = 0,1 \text{ мм}$ – радиус абразивного зерна;

$E_{корд} = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$ – модуль упругости полимерно-абразивного корда;

$E_{абр} = 1 \cdot 10^{12} \text{ Па}$, $v_{абр} = 0,1$ – модуль упругости и коэффициент Пуассона абразива, соответственно;

$E_{дет} = 1,12 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $v_{дет} = 0,32$ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала детали, соответственно.

Проведя расчеты по вышеприведенной методике, получили значения: $P = 1,12 \text{ Н}$, $h = 0,83 \text{ мкм}$.

Результаты расчетов показали, что $U_{изг} \gg U_{конт}$. Несмотря на то, что деформация материала детали в контакте с абразивным зерном является не полностью упругой, а само абразивное зерно не является шаром, малость величины $U_{конт}$ по сравнению с $U_{изг}$ дает основание определять величину q_{max} из более простого уравнения $U_{изг} = T$, которое в развернутом виде запишется так:

$$5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{q_{max}^2 \cdot L^5}{E_{корд} \cdot I_z} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{окр}^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{L}{D}\right)^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^2 \right]. \quad (14)$$

Заключение

Таким образом, при обработке жаропрочного сплава ВТ8-М дисковым полимерно-абразивным инструментом с диаметром волокна $d = 1 \text{ мм}$, вылетом $L = 12 \text{ мм}$, при диаметре ПАИ $D = 75 \text{ мм}$, максимальная сила, возникающая во время первого удара единичного упругого волокна о плоскую поверхность детали, составила немногим более 1 Н. Это обеспечивает невысокий уровень силовой нагрузки на поверхность, что позволяет применять этот инструмент для тонкостенных деталей.

Литература

1. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики [Текст]: в 2 т. / Н.В. Бутенин, Я.Л. Луиц, Д.Р. Меркин. – 3-е изд., исправленное. – М.: Наука, 1985. – Т.2: Динамика. – 1985. – 496 с.
2. Сопротивление материалов [Текст] / Г.С. Писаренко, В.А. Агарев, А.Л. Квитка и др.;

под ред. Г.С. Писаренко. – 4-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1979. – 696 с.

3. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.

4. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика [Текст]: в 9 т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – 3-е изд., исправленное и дополненное. – М.: Наука, 1965. – Т.7: Теория упругости. – 204 с.

Поступила в редакцию 01.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проректор по НР Ю.Н. Внуков, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

РОЗРАХУНОК СИЛ УДАРНОЇ ДІЇ ЕЛАСТИЧНОГО ВОЛОКНА НА ДЕТАЛЬ ПРІ ФІНІШНІЙ ОБРОБЦІ

О.Г. Попович, Н.В. Гончар, Д.М. Степанов

Представлено силовий аналіз в зоні обробки полімерно-абразивним інструментом плоского зразка в момент першого удару. У задачі взято одне полімерно-абразивне волокно, закріплене в маточині. Отримані рівняння використовували для розрахунку конкретної задачі оздоблювальної обробки зразка з титанового сплаву ВТ8-М. Запропоновано деякі спрощення та узагальнення. Встановлено, що рівень сил удару стандартного дискового інструменту на основі полімерно-абразивних волокон невисокий, що дає можливість застосовувати такі інструменти для фінішної обробки тонкостінних деталей.

Ключові слова: фінішна обробка, зразок, полімерно-абразивний інструмент, пружне волокно, сила удару.

CALCULATION OF THE FORCE OF ELASTIC FIBERS IMPACT ON A PART AT FINISHING

A.G. Popovich, N.V. Gonchar, D.N. Stepanov

The article presents a force analysis in the area of processing a flat sample with a polymer-abrasive tool at the time of the first impact. The problem takes one polymer-abrasive fiber fixed in the hub. The resulting equations are used to calculate the specific task of finishing processing of the sample made of VT8-M titanium alloy. We have proposed some simplifications and generalizations. It has been set that the level of impact strength of a standard disk tool on the base of polymer-abrasive fibers is low, which makes it possible to use such tools for finishing thin wall parts.

Key words: finishing, sample, polymer-abrasive tools, elastic fiber, the force of impact.

Попович Алексей Геннадьевич – ассистент кафедры «Механика» Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: a_lex_a@zntu.edu.ua.

Гончар Наталья Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: gonchar@zntu.edu.ua.

Степанов Дмитрий Николаевич – аспирант кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: Stepanovzntu@yandex.ua.