

АДЕКВАТНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТРУЖКИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ

Нечепаяев В. Г., Мышов М.С. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

В [1, 2, 3] разработаны математические модели деформирования стружки при повторном её взаимодействии с режущим инструментом в процессе фрезерования профильных пазов. Модели ориентированы на установление силы повторного взаимодействия режущего инструмента с элементом стружки, представленного в виде тонкостенной цилиндрической круговой оболочки. Сила повторного взаимодействия определяет деформацию режущего инструмента, которая, в свою очередь, обуславливает погрешность обработки профильных пазов.

Для подтверждения достоверности выполненных теоретических исследований проведены экспериментальные исследования в условиях специального полноразмерного стенда для определения указанных силовых факторов для случаев сосредоточенного и распределённого нагружений элемента стружки.

Целью работы является оценка адекватности и погрешности разработанных математических моделей деформирования стружки инструментом при фрезеровании профильных пазов для случаев сосредоточенного и распределённого нагружений на основе полученных экспериментальных данных.

Адекватность математических моделей деформирования стружки при повторном её взаимодействии с режущим инструментом в процессе фрезерования профильных пазов. Подтверждение гипотезы об уровне адекватности математической модели опытным данным осуществляется путём оценки отклонения предсказанной теоретически значения отклика \hat{y}^i от результатов наблюдений \tilde{y}^i в x^i точках факторного пространства [4].

Рассеяние результатов наблюдений относительно теоретической кривой, оценивающей истинную функцию отклика, характеризуется с помощью дисперсии адекватности [5, 6]

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tilde{y}^i - \hat{y}^i)^2, \quad (1)$$

где N - число точек факторного пространства, в которых проводится эксперимент.

Проверка гипотезы об адекватности состоит в определении соотношения между дисперсией адекватности S_{ad}^2 и дисперсией воспроизводи-

мости отклика $S_{вос}^2$

$$S_{вос}^2 = \frac{1}{N(v-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^v (\bar{y}^{ij} - \bar{y}^i)^2, \quad (2)$$

где v - число параллельных опытов в каждой из N точек;

\bar{y}^{ij} - результат наблюдения в отдельном параллельном опыте.

Если дисперсии однородны, то математическое описание адекватно представляет результаты эксперимента. Если дисперсии неоднородны, то описание считается неадекватным.

Проверка гипотезы об адекватности модели производится с использованием F -критерия Фишера. Модель считается адекватной в случае выполнения условия

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{вос}^2} \leq F(\alpha, f_{ад}; f_{вос}), \quad (3)$$

где $F(\alpha, f_{ад}, f_{вос})$ - критерий Фишера при заданном уровне значимости α ;

$f_{ад}$ - число степеней свободы $S_{ад}^2$

$$f_{ад} = N - 1; \quad (4)$$

$f_{вос}$ - число степеней свободы $S_{вос}^2$

$$f_{вос} = N(v - 1). \quad (5)$$

В табл. 1 приведены данные для оценки уровня адекватности математических моделей деформирования стружки, представленной в виде замкнутой тонкостенной цилиндрической круговой оболочки, режущим инструментом при фрезеровании профильных пазов. Диапазон изменения параметров оболочки: внешний диаметр $D=5; 7; 9$ мм и толщина оболочки $\delta=0.1; 0.2; 0.3; 0.4$ мм.

Аппроксимация полученных экспериментальных данных осуществлялась с целью визуальной оценки соответствия характера зависимостей исследуемого параметра P (силы, деформирующей оболочку) от параметров δ (толщины оболочки) и D (внешний диаметр оболочки), полученных теоретически и экспериментально. Аппроксимация выполнялась методом полиномиальной регрессии, реализованном средствами стандартной MathCAD - программы.

На рис. 1 приведены теоретические и аппроксимирующие экспериментальные данные кривые для схем сосредоточенного и распределённого нагружений элемента стружки (аппроксимирующие кривые представлены набором полиномов второго порядка).

Таблица 1. К оценке уровня адекватности математической модели деформирования стружки

| Параметры | Сосредоточенное нагружение | | | Распределённое нагружение | | |
|--|-------------------------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------|-------------|
| | $D=5$ мм | $D=7$ мм | $D=9$ мм | $D=5$ мм | $D=7$ мм | $D=9$ мм |
| Дисперсия адекватности S_{ad}^2 | 2602.0 | 220.1 | 511.5 | 2235.9 | 277.1 | 128.0 |
| Число степеней свободы f_{ad} | 3 | | | | | |
| Дисперсия воспроизводимости S_{ϵ}^2 | 648.4 | 122.2 | 193.1 | 650.3 | 220.4 | 41.8 |
| Число степеней свободы f_{ϵ} | 8 | | | | | |
| Расчетное значение F - критерия Фишера | 4.01 | 1.8 | 2.65 | 3.44 | 1.26 | 3.06 |
| Табличное значение F - критерия Фишера (при уровне значимости $q=0,05$) | 4.07 | | | | | |

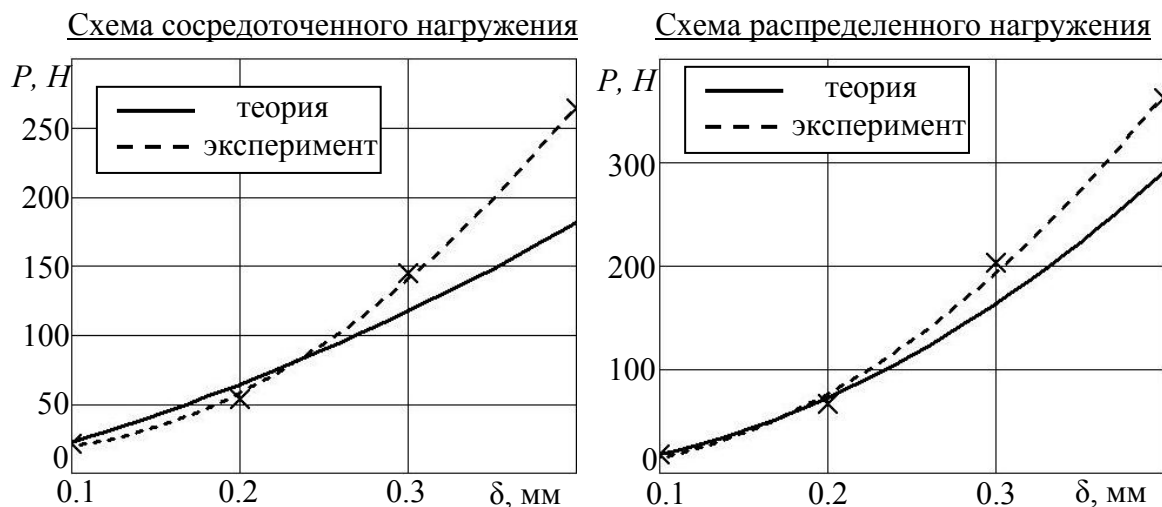
Оценка погрешности моделирования осуществлялась путем вычисления абсолютной и относительной погрешностей рассогласования теоретической кривой и экспериментально полученными данными (табл. 2).

В результате сравнительного анализа полученных экспериментальных данных и соответствующих теоретических оценок установлено:

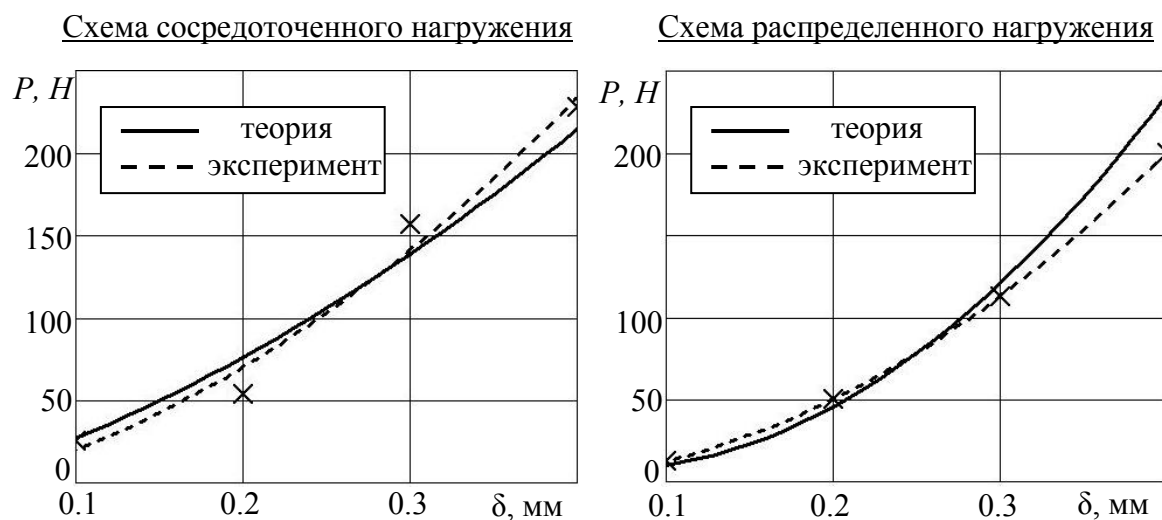
- экспериментально полученные зависимости изменения силы деформирования оболочки в исследуемом диапазоне изменения параметров являются нелинейными функциями толщины оболочки (возрастающими при увеличении толщины). Такой характер изменения силы качественно соответствует результатам модельного эксперимента;

- модели деформирования стружки при повторном её взаимодействии с режущим инструментом в процессе фрезерования профильных пазов (модели деформирования оболочки) отвечают требованиям адекватности по F -критерию Фишера при 5% уровне значимости как для сосредоточенного, так и для распределённого нагружений элемента стружки;

Внешний диаметр оболочки $D=5$ мм



Внешний диаметр оболочки $D=7$ мм



Внешний диаметр оболочки $D=9$ мм

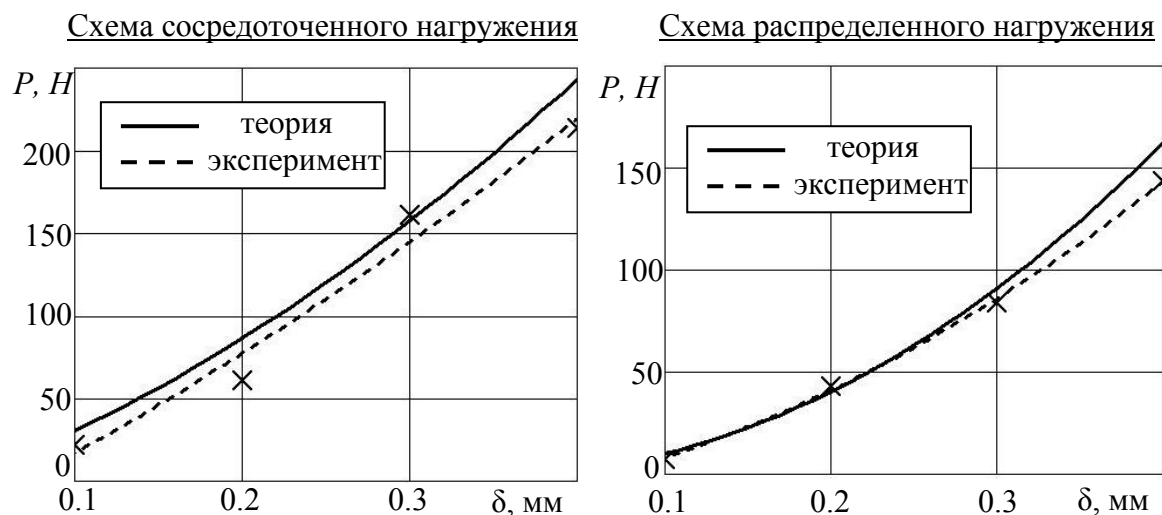


Рис. 1 - Графики зависимости силы, деформирующей стальную оболочку как функция толщины оболочки

- средняя погрешность моделей составляет 12.1...23.4%. При этом наибольшая погрешность наблюдается при наибольшем значении внешнего диаметра оболочки $D=9$ мм (диаметр фрезы $D_{\phi}=60$ мм) для сосредоточенной схемы нагружения. Среднее значение погрешности для схемы сосредоточенного нагружения элемента стружки составляет 18.5%, а для схемы распределённого нагружения – 13.6%. Средневзвешенное значение погрешности для обеих схем нагружения составляет 16.1%;

- уровень адекватности и погрешности разработанных моделей процесса повторного взаимодействия режущего элемента с отделённой стружкой при фрезеровании профильных пазов с учётом их особенностей (аналитический характер; универсальный характер - отсутствие ограничений по изменению экспериментальных параметров для всего возможного диапазона профильных фрез, регламентированных соответствующими стандартами; и отсутствие поправочных экспериментальных коэффициентов) является достаточным для решения поставленных задач.

Выводы.

1. Выполнена оценка адекватности и погрешности математических моделей процесса повторного взаимодействия режущего элемента с отделённой стружкой при фрезеровании профильных пазов для рассматриваемых расчётных схем сосредоточенного и распределённого нагружений элемента стружки.

2. Достаточный уровень адекватности и точности разработанных математических моделей деформирования стружки при повторном её взаимодействии с режущим инструментом в процессе фрезерования профильных пазов для сосредоточенного и распределённого схем нагружений является достаточным для решения поставленных задач.

Список литературы: 1. Нечепаяев В.Г. Моделирование повторного деформирования элемента стружки при фрезеровании профильных пазов для случая распределённого его нагружения/ В.Г. Нечепаяев, М.С. Мышов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сборник научных трудов. – Краматорск, вып. №32, 2013. – С. 43-48. 2. Нечепаяев В.Г. Модель деформирования стружки инструментом при фрезеровании профильных пазов/ В.Г. Нечепаяев, М.С. Мышов // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. В. 140/2013. Серія: Машинобудування та транспорт. – Севастополь, 2013. – С.84-89. 3. Нечепаяев В.Г. Моделирование процесса деформирования стружки инструментом при фрезеровании профильных пазов/ В.Г. Нечепаяев, М.С. Мышов // Наукові праці Донецького національного університету. Серія «Машинобудування і машинознавство». – 2013. – Вип. 1 (10). – С. 54-61. 4. Нечепаяев В.Г. Методика оценки адекватности моде-

лей функционирования устройств удаления стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов/ В.Г. Нечепав, А.Н. Гнисько// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірник наукових праць. – Краматорськ – Київ, Донбас. держ. машино буд. акад., 2006. – Вип. 19. – С. 255-261. **5.** Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. - М., Мир, 1977, - 552 С. **6.** Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум): Учеб. пособие / Бородюк В.П., Воцинин А.П., Иванов А.З. и др.; Под ред. Г.К. Круга. – М.: Высш. школа. 1983. - 216 С.