

УДК 621.787.4

Лебедев А.Р. к.т.н., доцент каф. «ИОАТК», ФГБОУ ВО ДГТУ;

Кочетова В.С. студент магистрант, ФГБОУ ВО ДГТУ.

МНОГОФАКТОРНЫЕ МОДЕЛИ ДОРНОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Аннотация. Представлены результаты моделирования изготовления многослойного цилиндра дорнованием. Преимущество составного цилиндра по сравнению с монолитным заключается в более высоких допускаемых нагрузках. Выявлены факторы, оказывающие влияние на целевые параметры исследования.

Abstract. The paper presents the results of the simulation of manufacturing a multi-layer cylinder burnishing. The advantage of the composite cylinder as compared with a monolithic is higher allowable loads. The factors influencing the target parameters of the study.

Ключевые слова: дорнование, контактное давление, многослойный

Key words: Burnishing, contact pressure, multilayer.

Дорнование позволяет достаточно экономно и производительно изготовить многослойный цилиндр, отдельные слои которого выполнены из обычного трубного проката. После деформирования за счет сил упругой разгрузки на контактной поверхности соединяемых заготовок образуется напряжение (контактное давление), соответствующее условиям образования соединения с достаточно большим натягом. Сборка составного цилиндра дорнованием не требует высокой исходной точности сопрягаемых поверхностей. Повышенная прочность корпуса обеспечивается дополнительными внутренними силами упругости, поэтому при одинаковых поперечных сечениях составной цилиндр допускает более высокие нагрузки по сравнению с монолитным.

Известные аналитические методы определения напряжений, сил и деформаций обрабатываемого дорнованием цилиндра построены в предположении, что направления главных напряжений и деформаций совпадают с его координатными осями, что позволяет не учитывать касательные напряжения и существенно упростить способ решения задачи. Естественно, что аналитические зависимости недостаточно полно отражают

особенности процесса формирования составного цилиндра, их практическое использование не всегда эффективно. В этой связи применение методов математического моделирования процесса дорнования отверстий на ЭВМ путем приближенного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих состояние материала под воздействием локальной кольцевой нагрузки, позволяют существенно сократить материальные затраты на проведение экспериментальных исследований.

Модель процесса состоит из жесткой конусной оболочки вращения, перемещающейся вдоль оси вращения по всей длине многослойного соединения, представляющем собой две цилиндрические оболочки «втулка-обойма», сопряженные с некоторым зазором. В сборке участвуют три твердотельных модели – «Обойма», «Втулка», «Дорн». Все три компонента имеют одну ось вращения (свойство концентричности). Дорн в данной сборке может свободно перемещаться вдоль оси вращения многослойного соединения. Построение модели процесса приведено в [1].

Моделирование дает возможность исследовать напряженно-деформированное состояние многослойного соединения как во время проведения процесса дорнования, так и после прохода инструмента. При снятии нагрузки, то есть при выходе дорна из отверстия многослойного соединения, регистрируются параметры остаточных напряжений и деформаций.

Анализ получаемых результатов позволяет определять важные технологические параметры процесса дорнования, которые аналитически и экспериментально трудно или невозможно установить. К ним относятся: длина контакта дорна со втулкой (мм); радиус изгиба продольного сечения втулки (мм); высота волны внеконтактной деформации (мм); рабочее давление в зоне контакта дорна и втулки (МПа); рабочее и остаточное давление в зоне контакта втулки и обоймы (МПа).

Целью исследования процесса дорнования многослойного соединения «дорн-втулка-обойма» является изучение контактных давлений в сопряжении и геометрических параметров очага деформации в зависимости от конструктивно-технологических параметров процесса дорнования.

Целевыми параметрами исследований являются:

1. P_1 (МПа) – контактное давление в сопряжении дорн-втулка в очаге деформации при проходе дорна

2. P2 (МПа) - контактное давление в сопряжении втулка-обойма в очаге деформации при проходе дорна
3. P3 (МПа) – остаточное контактное давление в сопряжении втулка обойма после прохода дорна
4. P4 (мм) - длина контактной зоны рабочей поверхности дорна со втулкой
5. P5 (мм) – размер отверстия втулки после прохода дорна.

Постоянные факторы (условия) эксперимента:

- зазор в соединении перед началом процесса $Z=0,1$ мм;
- угол рабочего конуса дорна 7° ;
- длина деталей соединения $L=50$ мм;
- графики зависимостей «Напряжение-деформация» построены для углеродистой стали 45[1].

Варьированию подлежат следующие факторы:

1. Относительная толщина стенки втулки:

$$m_v = \frac{D_v}{d_v};$$

где D_v и d_v – наружный и внутренний диаметры втулки. Уровни фактора $m_v=1,05; 1,1; 1,2$.

2. Относительная толщина стенки обоймы:

$$m_o = \frac{D_o}{d_o};$$

где D_o и d_o – наружный и внутренний диаметры обоймы. Уровни фактора $m_o=1,2; 1,4; 1,6$.

3. Относительный натяг дорнования:

$$\lambda = \frac{i}{d_v};$$

где i – натяг дорнования, мм,

$$i = D_d - d_e$$

где D_d – диаметр дорна. Уровни фактора $\lambda=0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.1$.

План эксперимента включает проведение 45 опытов при полном переборе всех указанных уровней факторов. Опыты проводились на параметрической модели, выполненной с помощью САЕ- системы «Ansys»[1]. По каждому численному опыту проведены замеры целевых параметров эксперимента по следующей методике.

Переходим в раздел «General/Postproc/Results_Viewer». Выбираем в окне «Results item for viewing» задание показать результаты для радиальных напряжений «Nodal Solution\Stress\Y component of stress». Выбираем шаг нагружения №50, что соответствует срединному положению дорна в отверстии многослойного соединения.

С помощью инструмента «Zoom In» максимально увеличиваем зону очага деформации. В режиме «Query Results» отмечаем характерные точки для определения интересующих значений радиальных напряжений:

1. Точку максимальных сжимающих радиальных напряжений в зоне контакта дорна и втулки – параметр P1.

2. Точку максимальных сжимающих радиальных напряжений в зоне контакта втулки и обоймы – параметр P2.

3. Для определения целевого параметра P3 необходимо на 99 шаге нагружения (снятие нагрузки) определить радиальные давления по оси Y в шести точках на образующей линии контакта втулки и обоймы. Данные по шести точкам усредняются.

4. Для фиксации параметра P4 максимально увеличиваем контактную зону очага деформации, отмечаем две точки начала и конца зоны контакта, фиксируем их глобальные координаты и вычисляем расстояние между двумя точками.

5. Для определения целевого параметра P5 необходимо на 99 шаге нагружения (снятие нагрузки) определить координаты Y пяти точек на образующей линии отверстия втулки. Данные по пяти точкам усредняются.

Качественный анализ полученной графической информации показал следующее.

Рабочие давления P_1 в контактной зоне «Инструмент-втулка» интенсивно возрастают в зоне небольших натягов дорнования и при возрастании натяга стабилизируются. Уровень стабилизированного рабочего давления прямо пропорционально зависит от относительной толщины стенки обоймы. Влияние относительной толщины стенки втулки является незначительным.

На рабочие давления P_2 в контактной зоне «Втулка-обойма» наиболее существенное прямо пропорциональное влияние оказывают параметры относительного натяга и относительной толщины стенки обоймы. При относительных натягах дорнования более 0,06 отмечается стабилизация рабочего давления на уровнях, зависящих от относительной толщины стенки втулки и обоймы.

Остаточные давления P_3 в соединении «Втулка-обойма» повышаются с ростом натяга и стабилизируются при относительной деформации 0,06. Уровень остаточных давлений в среднем в 5-10 раз меньше уровня рабочих контактных давлений.

Длина контакта P_4 интенсивно и прямо пропорционально растет с увеличением натяга. Примерно до уровня относительной деформации 0,05 длина линии контакта увеличивается незначительно. Следует отметить, что при малых значениях относительной толщины стенки обоймы длина фактического контакта всегда примерно на треть меньше геометрической длины контакта. Однако с ростом толщины стенки обоймы наблюдается сближение этих двух величин.

Остаточный диаметр отверстия втулки P_5 интенсивно растет с увеличением натяга. Целевой параметр стабилизируется после относительного натяга 0,06. Наблюдается тенденция обратного влияния толщины стенки обоймы на параметр P_5 .

Полученные данные были использованы для проведения многофакторного регрессионного анализа с целью выявления математических моделей параметров контактных давлений и определения наиболее значимо влияющих на них факторов.

Сводный анализ полученных регрессионных моделей проведен в таблице 1.

Таблица 1. Результаты вычисления

Коэффициенты модели	Целевые параметры исследований									
	P1		P2		P3		P4		P5	
	Коэф.	Значимость	Коэф.	Значимость	Коэф.	Значимость	Коэф.	Значимость	Коэф.	Значимость
B0	657,4	Да	468	Да	31,6	Да	5,96	Да	33,7	Да
B1 λ	-191	Да	-105,6	Да	13,8	Да	5,12	Да	1,12	Да
B2 m_b	-4,81	Нет	-36,9	Да	5,34	Да	0,17	Нет	0,06	Нет
B3 $m_{об}$	-4,48	Нет	91,3	Да	3,95	Да	0,52	Да	0,08	Да
B4 λm_{BT}	7,39	Нет	-4,1	Нет	2,82	Нет	-0,58	Да	0,048	Нет
B5 $\lambda m_{об}$	-28,2	Нет	-33,6	Да	1,7	Нет	-0,41	Нет	0,042	Нет
B6 $m_{BT} m_{об}$	18,8	Да	50,1	Да	-6	Да	-0,46	Нет	-0,196	Да
B7 $\lambda m_b m_{об}$	2,88	Да	10,4	Нет	-5,85	Да	-0,53	Нет	-0,13	Да
Адекватность $F_t=1,67$	Fr= 4,1 Адекватна		Fr= 9,1 Адекватна		Fr= 3,92 Адекватна		Fr= 6,9 Адекватна		Fr= 14,3 Адекватна	

Как видно из таблицы, все полученные зависимости признаются адекватными. Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на целевые параметры исследования, являются натяг дорнования, относительная толщина стенки обоймы и их совместное влияние.

Список литературы

- Исаев А.Н., Лебедев А.Р. Параметрическая модель процесса дорнования многослойного соединения/ Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы междунар. науч.-практ. конф. 28 февр.-3 марта. В рамках 15-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2012».- Ростов н/Д, 2012, С. 225-229.