

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

629.735.015.4: 539.219.2

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ. СООБЩЕНИЕ 3. РАЗРАБОТКА «ПРЕДСКАЗЫВАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ»

Канд. техн. наук, проф. Г.М. РЫБАКОВ

Описывается новый алгоритм. Алгоритм моделирует изменение пластической деформации в поверхностном слое детали в течение обработки дробью и обладает возможностью получать заданные параметры кривизны металлических панелей.

This paper describes a new algorithm. This algorithm simulates the change in plastic deformation in the surface layer of a part in the process of shot peening and provides the given parameters of curvature of metal panels. The author is continuously working on perfecting the algorithm.

Актуальность изучения процесса поверхностного пластического деформирования дробеструйной обработкой (ДО) объясняется тем, что, несмотря на многолетнюю практику применения с 30-х годов XX века по настоящее время, в этой области не создано фундаментальной теоретической базы. Кажущаяся простота процесса и легкость, с которой исследователи добиваются повышения выносливости ответственных деталей, порождают обилие эмпирических методик назначения режимов ДО. Недостаток всех эмпирических методик заключается в том, что каждая из них ограничена условиями эксперимента, при которых она создана. Как только меняются условия эксперимента, например, меняется материал или условия работы детали, возникает необходимость повторять эксперименты для создания новых методик.

Основная проблема назначения режимов ДО заключается в отсутствии зависимостей, определяющих энергию, поглощаемую материалом в процессе обработки. Пример эмпирического решения этой проблемы — метод «Almen strips», названный именем его создателя [1]. Метод «Almen strips» используют все современные фирмы. Этим способом можно построить график изменения кривизны пластины в процессе ДО для конкретного материала и режима обработки, как показано на рис. 1 и 2. Однако, если условия эксперимента изменить, например, заменить материал пластины, изменить ее толщину или изменить скорость дроби (т.е. энергетический уровень режима ДО), то потребуется повторить эксперимент и построить новый график для новых условий. Еще большие проблемы возникают при ДО крупногабаритных панелей для придания им аэродинамической формы, поскольку такие панели обладают переменной жесткостью по длине и ширине.

Избежать повторения рутинных экспериментов можно, только используя фундаментальные, основополагающие закономерности, описывающие деформирование как процесс преобразования энергии в процессе ДО.

В [2, 3] было приведено несколько функций, описывающих процесс деформирования ДО как процесс преобразования энергии. При этом было отмечено, что этих функций еще недостаточно для управления процессом ДО. Нами предлагается разработка

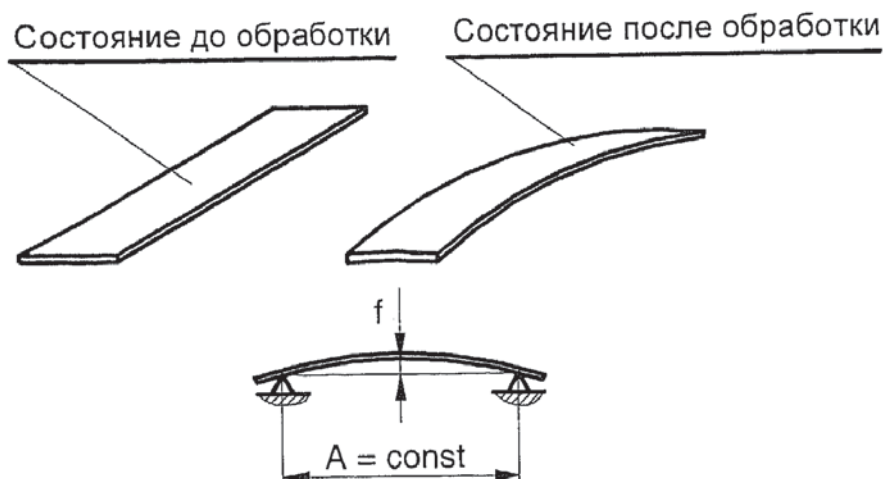


Рис. 1. Способ контроля интенсивности дробеструйной обработки «Almen strips» по стреле прогиба f контрольных пластин, измеряемой на постоянной для эксперимента базе A

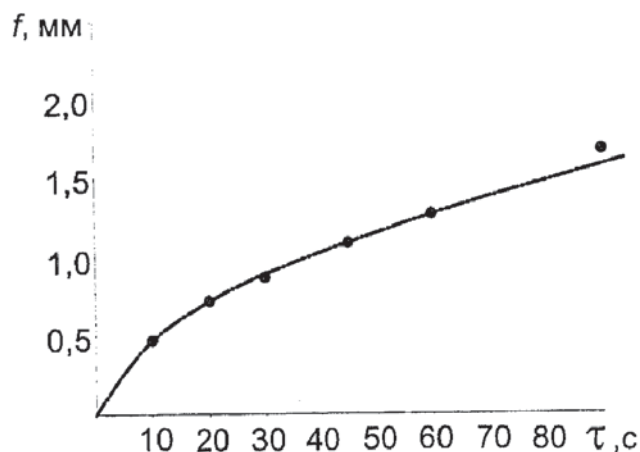


Рис. 2. График изменения кривизны пластины f при обработке дробью с одной стороны при постоянном уровне подводимой энергии и переменном времени обработки τ

еще одной функции, названной «предсказывающей функцией», которая входит в систему уравнений, составляющих алгоритм управления качеством ДО. Для разработки этой функции проведем анализ возникновения кривизны пластины под действием ДО.

Процесс деформирования представим происходящим циклически. В каждую единицу времени к обрабатываемой поверхности подводится порция дробы, которая несет соответствующую порцию энергии. Каждая дробинка из этой порции, совершив работу деформирования, отбрасывается от поверхности силами упругости материала. Поэтому и все дробинки, совершившие работу деформирования в течение единицы времени, также отбрасываются силами упругости. Работа всех дробинок каждой порции затрачивается на упруго-пластическое деформирование единицы объема материала. Когда работа порции дробы полностью израсходована, каждый единичный объем материала пластины упруго разгружается до некоторой остаточной деформации, при которой пластина находится в равновесии.

Условия равновесия каждого элементарного объема в совокупности определяют равновесие всей пластины в изогнутом после ДО состоянии. Синтез условий, при которых наступает равновесие изогнутой ДО пластины, был получен из анализа ряда известных задач изгиба пластин при листовой штамповке: моментом, моментом с продольной растя-

гибающей силой, растягивающей силой и вытяжкой сферической детали [4]. Кроме того, проанализированы теорема о разгрузке [4] и задача внецентренного растяжения—сжатия, основанная на теории упругости [5]. Каждая из этих задач в отдельности не подходит для специфики изгиба пластин при ДО, но каждая из них содержит общие элементы с решаемой задачей, которые и были использованы для синтеза условий равновесия.

Состояние равновесия элементарного объема пластины представлено на рис. 3. Элементарный объем пластины в состоянии равновесия характеризуется параметрами, представленными ниже: H — толщина пластины, X — толщина пластически деформированного слоя; сила P_1 представляет собой реакцию упруго сжатого, пластически деформированного слоя, противодействующую его сжатию; упруго деформированный слой воздействует с силой P_2 на пластически деформированный, вызывая его упругое сжатие. В состоянии равновесия модули сил P_1 и P_2 равны. Координаты точек приложения сил P_1 и P_2 неодинаковы относительно нейтральных и средних линий упруго и пластически деформированных слоев: так, e_1 — эксцентриситет или координата точки приложения силы P_1 относительно центра тяжести прямоугольного сечения стержня или относительно осевой линии пластически деформированного

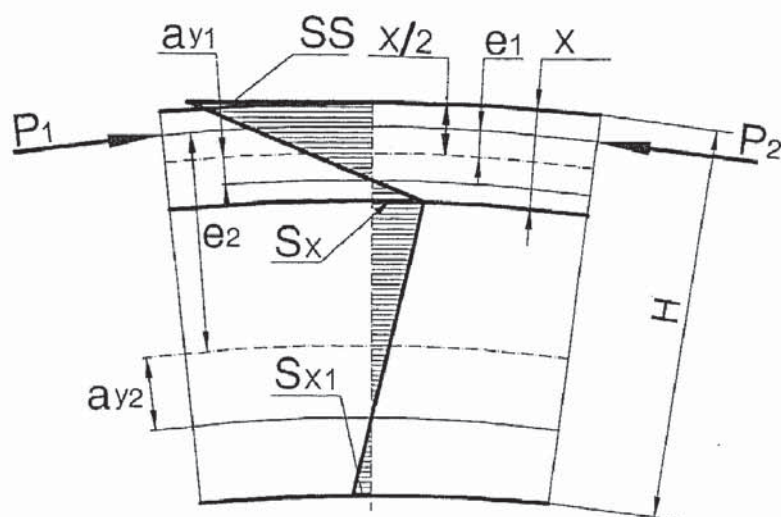


Рис. 3. Условия равновесия элементарного объема изогнутой ДО пластины

слоя; a_{y1} — расстояние от оси симметрии пластически деформированного слоя до его нейтральной оси, на которой напряжения сжатия приобретают нулевые значения; e_2 — эксцентриситет или координата точки приложения силы P_2 относительно центра тяжести прямоугольного сечения стержня или относительно осевой линии упруго деформированного слоя; a_{y2} — расстояние от оси симметрии упруго деформированного слоя до его нейтральной оси, на которой напряжения приобретают нулевые значения; ss — сжимающие напряжения, возникающие на поверхности пластины в состоянии, когда упруго и пластически деформированные слои находятся в равновесии. В соответствии со стандартами, принятыми в международной практике, буквы ss являются начальными буквами слов *Surface Stress* (поверхностные напряжения) — напряжения, определяемые на поверхности материала детали; s_x — растягивающие напряжения, возникающие на границе перехода от пластически к упруго деформированному слою; s_{x1} — сжимающие напряжения, возникающие в состоянии равновесия на вогнутой стороне пластины, противоположной стороне, обрабатываемой дробью.

Кроме перечисленных параметров системы упруго и пластически деформированных слоев, на рис. 3 наглядно показано остаточное приращение линейных размеров поверхностного слоя, возникающее в состоянии равновесия.

Каждая последующая порция энергии создает дополнительное приращение линейных размеров поверхностного слоя путем преобразования подводимой энергии в остаточную деформацию материала. При этом каждая порция энергии действует в течение определенного времени, определяемого отношением веса порции дроби к расходу дроби. Время действия порции энергии принимают за единицу времени при ДО. Из практики применения ДО за единицу времени можно принимать время обработки в пределах (5...10) с. Остаточная деформация, проявляющаяся в виде прогиба пластины f , является количественной характеристикой накопленной материалом энергии, которая может быть подсчитана для каждого состояния равновесия.

Механизм циклического накопления энергии и остаточной деформации положен в основу функции, при помощи которой можно рассчитывать изменение кривизны пластины в процессе ДО. Эта функция названа «предсказывающей функцией», поскольку с ее помощью можно рассчитать, как будет происходить изменение кривизны пластины, не проводя эксперимент. Для управления перечисленными параметрами материала пластины при ДО разработана программа для ЭВМ [6] на языке Qbasic. Программа содержит алгоритм, который, используя «предсказывающую функцию» определяет все вышеперечисленные параметры для каждого конкретного значения прогиба пластин и может предсказывать изменение кривизны пластин при наличии определенной исходной информации. Основная идея «предсказывающей функции» заключается в том, что, поскольку свойства материала не меняются от цикла к циклу, то не меняется и его свойство поглощать энергию. При этом условия энергии, поглощаемая материалом не меняется от цикла к циклу, но деформация, накапливаемая материалом от цикла к циклу уменьшается. Поэтому алгоритм, содержащий «предсказывающую функцию», строит график изменения кривизны как асимптотическую зависимость.

Для получения исходных данных для алгоритма выбирают единицу времени, например 10 с, и, применяя ДО, определяют значение прогиба f_1 , достигаемое за это время, как показано на рис. 1.

Алгоритм, содержащий «предсказывающую функцию» [6], строит график изменения кривизны пластины при ДО в следующем порядке:

- рассчитывает энергию, накопленную материалом в состоянии равновесия в упругой области $\mathcal{E}_{\text{уп}}$ для значения f_1 ;
- определяет энергию, поглощенную материалом за один цикл нагружения в условиях пластического деформирования;
- поскольку энергия, поглощаемая материалом за один цикл нагружения, не меняется от цикла к циклу, алгоритм суммирует эту энергию с накопленной энергией и рассчитывает следующий прогиб, исходя из новых условий равновесия.

Примеры использования «предсказывающей функции» приведены на рис. 4 и в табл. 1 и табл. 2.

На рис. 4 представлены два графика изменения кривизны пластин размером $75 \times 20 \times 1,3$ мм, изготовленных из алюминиевого сплава. График, обозначенный поз. 1 получен при обработке пластин дробью с одной стороны при давлении сжатого воздуха, разгоняющего дробь, $p = 0,3$ МПа и переменном времени обработки $\tau = \text{вар}$. Полученные экспериментально значения прогибов использованы для построения графика изменения кривизны поз. 1. График, обозначенный поз. 2, получен при тех же условиях ДО, но при давлении $p = 0,2$ МПа. Позицией 3 обозначен график изменения кривизны, построенный

при помощи «предсказывающей функции». Отклонение в % графика поз. 3 от полученного экспериментально поз. 1 по всем экспериментальным значениям представлен в табл. 1. Поз. 5 обозначен график, построенный при помощи «предсказывающей функции». Отклонение в % графика поз. 5 от полученного экспериментально поз. 2 по всем экспериментальным точкам представлено в табл. 1.

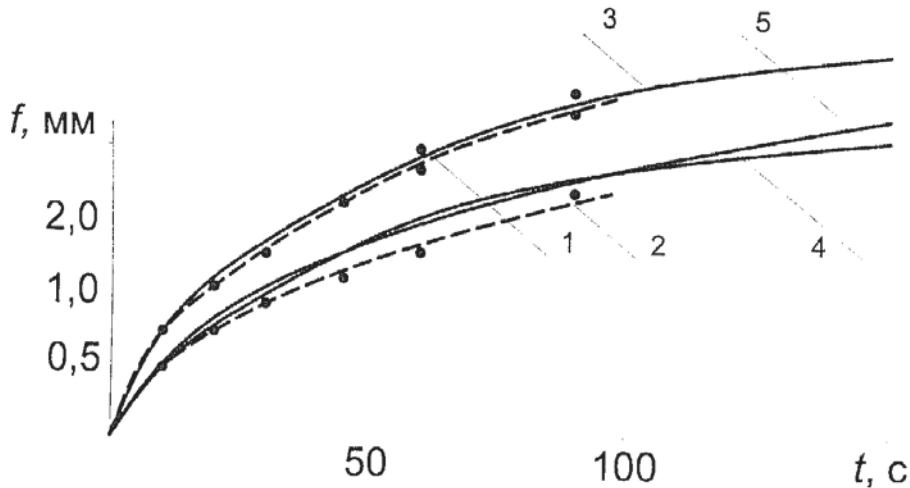


Рис. 4. Действие предсказывающей функции. 1, 2 — графики изменения кривизны пластин, обработанных на разных энергетических уровнях, 3, 4, 5 — различные способы получения графиков изменения кривизны при помощи «предсказывающей функции»

Таблица 1

Действие алгоритма, снабженного «предсказывающей функцией»

t, с	Прогиб пластин f , мм					
	Энергетический уровень $p = 0,2$ МПа			Энергетический уровень $p = 0,3$ МПа		
	Эксперимент	Расчет	$\Delta\%$	Эксперимент	Расчет	$\Delta\%$
10	0,47	0,496	5,0	0,72	0,72	0,0
20	0,72	0,81	12,5	1,03	1,09	5,8
30	0,9135	1,028	12,5	1,285	1,343	4,5
45	1,14	1,27	11,4	1,61	1,66	3,1
60	1,33	1,465	10,1	1,885	1,925	2,1
90	1,68	1,765	5,0	2,255	2,30	2,0
100	-	1,846	-	-	2,384	-
150	-	2,19	-	-	2,633	-

Из анализа данных, представленных в табл. 1, можно заключить, что «предсказывающая функция» вполне работоспособна и в общем правильно описывает процесс изменения кривизны пластин в процессе ДО. Отклонения в процентах от экспериментальных данных не превысило 12,5 % в некоторых точках, что можно объяснить неточностями эксперимента. Основной вывод, который следует из анализа результатов на этом этапе заключается в том, что для успешного применения «предсказывающей функции» необходимо получать статистически достоверные исходные данные. Чем большая надежность исходных данных, тем точнее работает «предсказывающая функция».

В табл. 2 приводится сравнительный анализ двух функций алгоритма. Первая функция, описана в работе [2], и введена в алгоритм как подпрограмма, рассчитывающая скорость дробы как функцию давления сжатого воздуха, а затем определяющая поглощаемую материалом энергию и прогиб f показана на рис. 4 поз. 4. Вторая — это «предсказывающая функция» показана на рис. 4 поз. 5.

Таблица 2

Сравнительный анализ действия двух энергетических функций алгоритма

t, с	Прогиб пластин f , мм		
	Функция энергетического уровня	Предсказывающая функция	$\Delta\%$
10	0,47	0,47	0,0
20	0,76	0,811	6,7
30	0,977	1,028	1,0
45	1,27	1,27	0,0
60	1,507	1,465	2,8
90	1,708	1,765	3,3
100	1,846	1,846	0,0
150	2,04	2,19	7,3

Как видно из данных табл. 2, обе функции дают практически совпадающие результаты.

Как уже отмечалось в предыдущих сообщениях, приведенные результаты еще не исчерпывают всех возможностей алгоритма и будут излагаться по мере получения новых результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allen J. O., Peening Surfaces Improve Endurance of Machine Parts, Metal Progress, 43 (February, 1943), P.p. 209—217.
2. Рыбаков Г. М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиностроения. Сообщение 1. Управление энергетическими параметрами // Известия вузов. Машиностроение, 2006. № 1. — С. 52—56.
3. Рыбаков Г. М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиностроения. Сообщение 2. насыщение энергией обрабатываемого материала // Известия вузов. Машиностроение, 2006. — № 2. — С.
4. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. — М.: Машиностроение, 1977. — 275 с.
5. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. — М.: Государственное издание технико-теоретической литературы, 1954. — 856 с.
6. Рыбаков Г. М. Программа, содержащая алгоритм управления качеством дробеструйной обработки металлических деталей, работающих в условиях сложного нагружения / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612514. — 2005.