№ 4 *2006*

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

629.735.015.4: 539.219.2

ДРОБЕСТРУЙНАЯ ОБРАБОТКА ПАНЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Канд. техн. наук, проф. Г.М. РЫБАКОВ

Описывается новый алгоритм. Алгоритм моделирует изменение пластической деформации в поверхностном слое детали в течение обработки дробью и позволяет 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.

В [1—3] предложен ряд функций, построенных на энергетических принципах назначения режимов дробеструйной обработки (ДО). Однако этих функций еще недостаточно, чтобы управлять всеми параметрами качества ДО.

Ниже рассматривается еще одна функция для практического применения в области формообразования панелей и оболочек при помощи ДО. Однако прежде, чем перейти к разработке этой функции, проведем краткий анализ известных литературных сведений в области формообразования панелей и оболочек.

В условиях конкуренции фирмы стараются не раскрывать свои достижения в фундаментальных и прикладных исследованиях в области ДО, поэтому в литературе отсутствуют сведения о каких-либо теоретических разработках в области гибки при помощи ДО панелей и оболочек. Об этих достижениях можно судить лишь по некоторым результатам, публикуемым в специальной литературе или рекламных проспектах. Краткий анализ этой литературы дает следующее представление о современном состоянии управления параметрами ДО (*Shot Peening Technology*) в области технологий гибки.

Английская фирма *Vacu-Blast* примерно с 70-х годов XX века ведет исследования в области дробеструйной обработки как для повышения выносливости деталей, так и для формообразования тонких листов. При формообразовании используется эффект выгибания пластин Алмена «*Almen strips*» [4] при обработке дробью с одной стороны пластины. Этот эффект используют для контроля и построения графика изменения кривизны пластин, как показано на рис. 1 и 2.

Если варьировать уровень подводимой к материалу энергии в различных местах обрабатываемой поверхности, можно получить требуемую переменную кривизну поверхности. Как утверждается в рекламном проспекте этой фирмы «*Vacu-Blast application study 1. Shot Peening for Metals under Alternating or Fluctuating Stress*», это выгодное свойство используется во многих производствах, связанных с обработкой металлических листов. Формообразование дробеструйной обработкой поверхностей крыльев может применяться при производстве летательных аппаратов. При этом, даже при обработке толь-

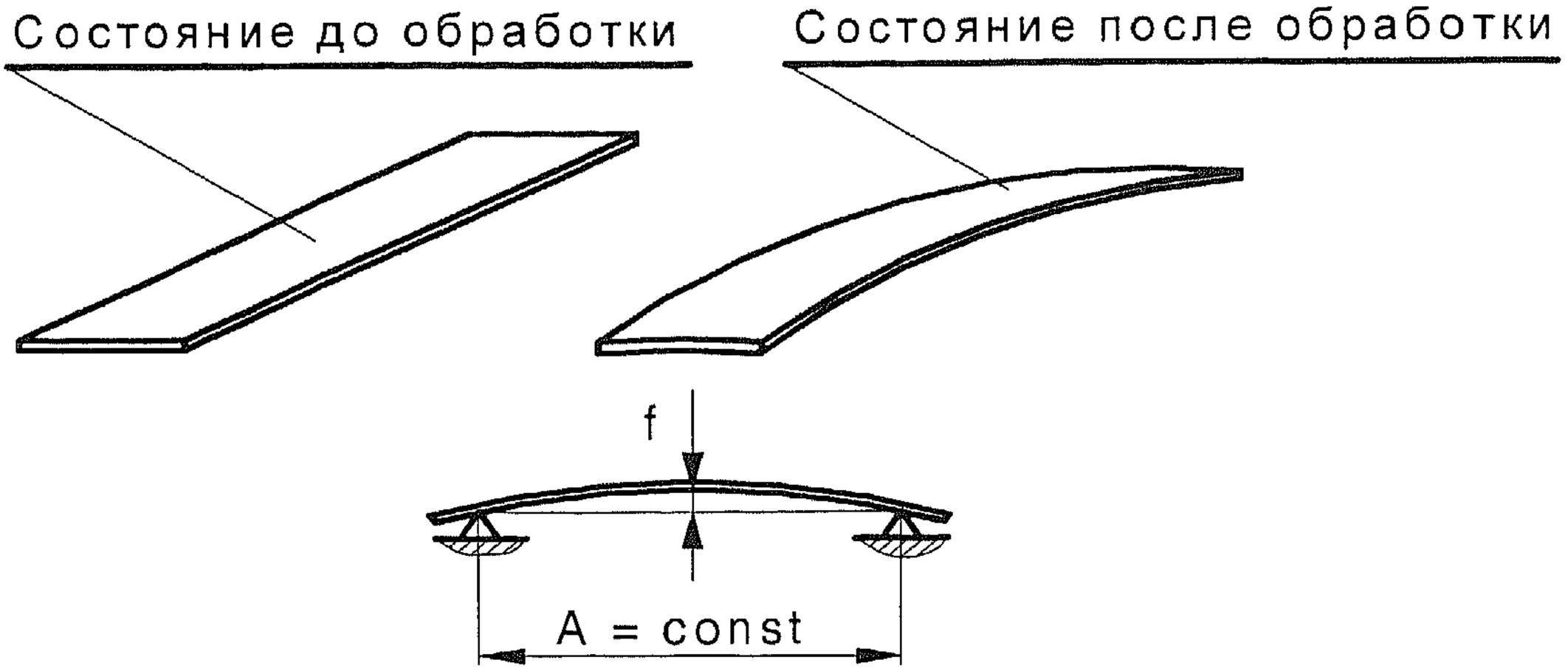


Рис. 1. Способ контроля интенсивности дробеструйной обработки «*Almen strips*»: *f* — стрела прогиба пластины при обработке дробью с одной стороны, *A* — постоянное для проводимого эксперимента расстояние, на котором определяют *f*

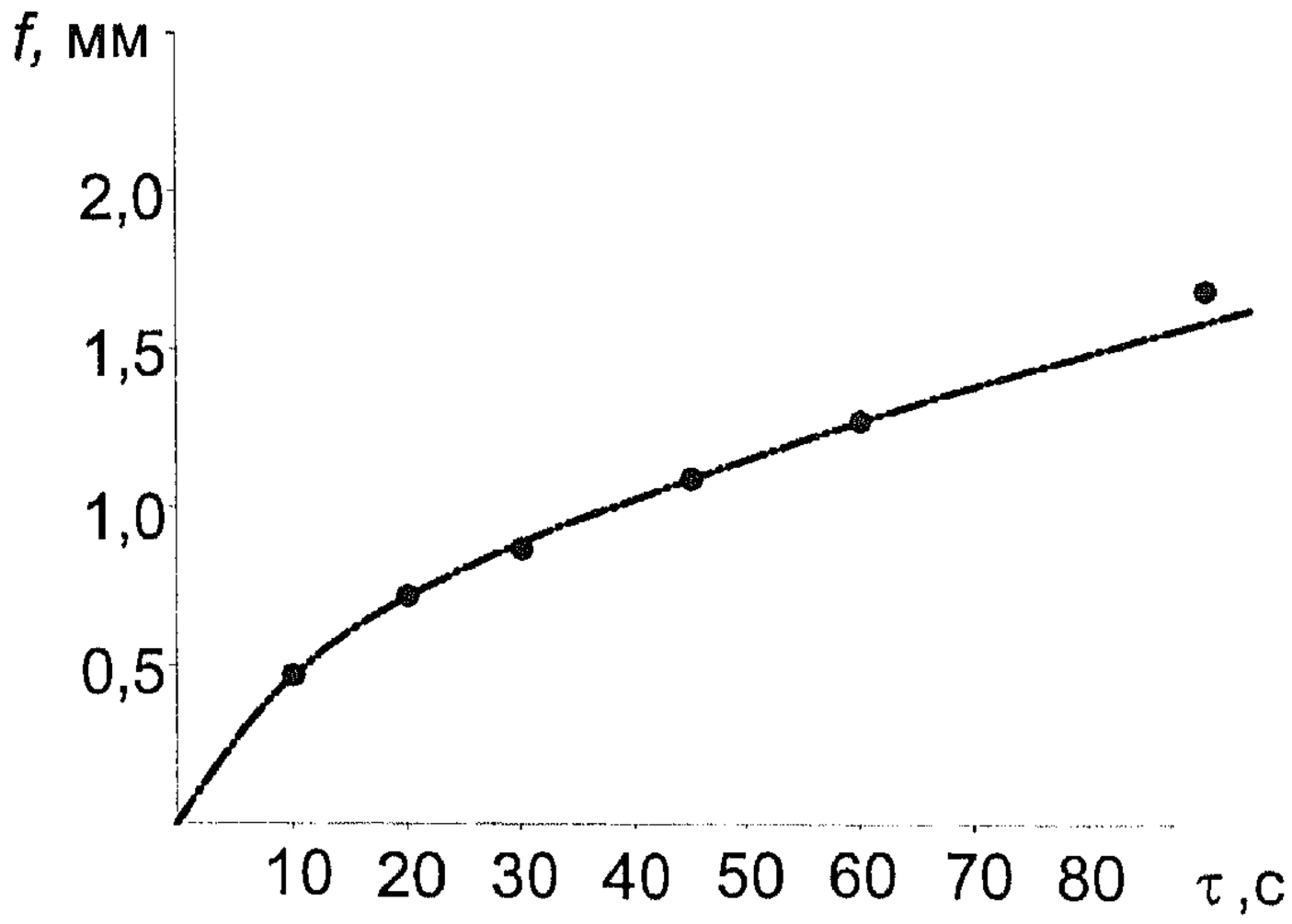


Рис. 2. График изменения кривизны пластины *f* при обработке дробью с одной стороны при постоянном уровне подводимой энергии и переменном времени обработки τ

ко с одной стороны, сжимающие напряжения возникают в поверхностных слоях с двух сторон, что в результате улучшает усталостные свойства. Кроме того, дробеструйная обработка может быть выгодна при исправлении искаженной формы отдельных деталей или наведении сжимающих напряжений вместо растягивающих, которые возникают в поверхностном слое деталей после механической обработки.

Количество поглощенной материалом энергии, называемое в терминах фирмы «интенсивностью обработки» (*peening intensiti*), зависит от факторов, связанных с оборудованием (давление сжатого воздуха, размер и материал дробинок), а также от времени экспозиции или времени воздействия потока дроби на обрабатываемую поверхность. Приводится пример обработки панели самолета *Fokker NV* при помощи пневмодробеструйной установки, разработанной и построенной фирмой *Vacu-Blast Limited.* Панель устанавливают на платформу под углом 15° к вертикали и обрабатывают набором сопел за несколько проходв с одной стороны.

Фирма *Metal Improvement Company*, США в рекламном проспекте "*Shot Peening Applications. Seventh Edition*" представляет процесс формообразования крупных панелей дробеструйной обработкой без использования штампов. Габаритные размеры панелей: ширина 3 м, длина 24,5 м, толщина для алюминиевых сплавов 1,27...51 мм и 0,4...25,4 мм — для стальных сплавов. Установка для обработки таких панелей *PEENAMATIC* содержит набор центрифуг и позволяет варьировать кривизной панели вдоль ее поверхности, учитывая переменную толщину и элементы жесткости.

В [4] подробно изложены исследования в области управления дробеструйной обработкой. Чаще всего ДО применяется для создания равномерного слоя сжимающих напряжений на поверхности металлов или вблизи него, что увеличивает срок службы деталей в условиях циклических нагрузок, препятствуя усталостным разрушениям. С этой целью ДО применяется для листовых рессор, винтовых пружин, галтелей зубчатых колес, приводных валов (трансмиссий), торсионных стержней, осей, оборудования для бурения нефтяных скважин, секций пера и замковой части лопаток турбин и многих других металлических деталей, испытывающих циклические напряжения.

Хотя упрочняющая ДО является далеко не новым процессом, многие вопросы, связанные с воздействием параметров процесса на рабочие характеристики металлов, остаются открытыми для продолжающихся научных исследований и дебатов. Например, исследовательские работы последнего времени делают упор на значение размера дроби и исследуют традиционно допущенную корреляцию между прогибом полоски Алмена и сжимающим остаточным напряжением. Кроме того, для исследований использовались методы рентгенографии (дифракции рентгеновских лучей) и разрушающих механических методов для оценки влияния дробеструйной обработки на изучение ее оптимальных параметров.

Несмотря на большой объем исследований, налицо заметный дефицит в теоретических исследованиях по ДО. Очевидно, что это связано со сложностью реакции обрабатываемого материала на многократное ударное воздействие дроби. И, хотя моделирование реакции материала на воздействие единичного удара затруднительно, понимания процесса единичного удара еще недостаточно. Но когда имеет место многократный удар, задача становится еще более сложной.

К краткому обзору следует добавить, что по проблемам в области ДО периодически проводятся международные конференции, что подтверждает актуальность проводимых исследований.

Из проведенного обзора следует, что основная трудность решения задачи управления процессом ДО заключается в определении энергии, поглощаемой материалом в каждую единицу времени. При всех сложностях процесса деформирования дробью энергия, поглощаемая материалом, главным образом определяется свойствами материала.

Рассмотрим, прежде всего, принцип определения кривизны образцов расчетным путем от «эталонной кривой», заключающийся в том, что исследования начинают с построения статистически достоверного графика изменения кривизны пластины, который принимают за «эталонную кривую». Принцип построения такой кривой приведен на рис. 1 и 2. Этот эталонный график затем может быть применен для ситуации, при которой параметры режима ДО, к которым отнесем давление сжатого воздуха на входе в сопло, время обработки (время экспозиции), диаметр дроби, расход дроби, материал дроби, обрабатываемый материал, вид дробеструйной обработки, не меняются, а меняется только жесткость конструкции обрабатываемого образца. Исследование этой ситуации проведено в следующем порядке.

Проанализируем известное определение потенциальной энергии изгиба [7]

$$U = \frac{M^2 l}{2EJ}. \qquad (1)$$

Учитывая, что $\frac{M^2}{(EJ)^2} = \frac{1}{\rho^2}$ из (1) следует

$$U = \frac{M^2 l(EJ)}{(EJ)^2 2} = \frac{l(EJ)}{2\rho^2}.$$

Рассмотрим отношение энергии U_1 к U_2 на двух произвольных точках на графике изменения кривизны

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{J_1 \rho_2^{\,2}}{\rho_1^{\,2} J_2}. \qquad (2)$$

Зависимость (2) устанавливает связь потенциальной энергии изгиба с кривизной и жесткостью пластин. Исходя из (2) и известных значений $\rho_1, U_1, U_2, J_1, J_2$, получим расчетную формулу для кривизны ρ_2:

$$\rho_2 = \sqrt{\frac{U_1}{U_2}\frac{\rho_1^{\,2} J_2}{J_1}} = \rho_1 \sqrt{\frac{U_1 J_2}{U_2 J_1}}. \qquad (3)$$

Для подтверждения достоверности полученной зависимости при дробеструйной обработке проведен эксперимент на образцах типа стержней, представленных на рис. 1. Стержни имели одинаковые размеры по длине и ширине, но по высоте (или толщине) размеры были различны. Поэтому при прочих равных условиях стержни имели разную жесткость в зависимости от толщины. Подставив в (3) вместо буквенных обозначений моментов инерции J_1, J_2 их аналитические выражения для прямоугольного сечения [7] и выразив кривизну стержней через стрелу прогиба f, приведем (3) к виду, более удобному для практических расчетов,

$$f_2 = f_1 \sqrt{\frac{Э_{уп2} H_1^{\,3}}{Э_{уп1} H_2^{\,3}}}. \qquad (4)$$

Для эксперимента применили два стержня размером 150×20 × H мм из алюминиевого сплава, имевшего модуль упругости E = 80 ГПа и предел текучести $\sigma_{0,2}$ = 320 МПа. В этих условиях жесткость стержней определяется их толщиной H. Для исследований применили образцы с H = 4,125 и 5,375 мм. Стержни были обработаны стальной дробью при тех же условиях, как это описано в [1—3]. Для всех стержней были применены одинаковые параметры режима обработки P = 0,2 МПа, τ = var, чтобы выявить «в чистом виде» влияние жесткости стержней на их кривизну, возникающую под действием дробеструйной обработки при постоянном уровне подводимой дробью энергии. Величины энергии пластической $Э_{пл}$ и упругой $Э_{уп}$ деформации по найденным экспериментально значениям прогибов f были рассчитаны при помощи программы [5]. Результаты измере-

ний экспериментальных значений прогибов и расчетов сведены в табл. 1 и представлены на рис. 3.

Из данных табл. 1 следует, что способность материала поглощать энергию не является константой материала и зависит не только от физико-механических свойств материала, но и от толщины образца, что для нашего случая означает увеличение жесткости образца. Определить этот параметр в настоящее время представляется возможным только экспериментально для каждого конкретного случая отдельно. Поэтому поиск общей закономерности по определению этого параметра для различных материалов остается актуальным.

Кроме того, как показывает проведенный эксперимент, достаточно определить этот параметр хотя бы для одной точки на рассчитываемых кривых прогиба. Например, получить статистически достоверные значения прогибов при времени воздействия 10 с на образцах толщиной $H = 7{,}645$ и 4,125 мм.

Подобные исследования для панелей переменной жесткости хотя и требуют дополнительного количества образцов для построения кривых изменения прогибов для всех значений жесткости, имеющихся на панели, но приводят к надежным результатам.

Однако целесообразно выяснить, можно ли избежать подобных затрат. Для этого проведем дополнительные теоретические исследования при условии, что стержни с различной жесткостью обработаны на одном и том же энергетическом уровне режима ДО. Зависимость (4) содержит две неизвестных величины и поэтому алгебаически неразрешима. Чтобы она стала разрешима, рассмотрим случай, когда $f_1 = f_2$. Для исследований применили образцы, выполненные в виде стержней прямоугольного сечения размером $150\times20\times H$ мм, изготовленные из одного и того же алюминиевого сплава. Было использовано два вида образцов с $H = 5{,}375$ и 7,645 мм. На рис. 3 приведен пример графиков изменения кривизны пластин с жесткостью $H = 7{,}647$ и 5,375 мм обработанных на режиме ДО с одинаковым энергетическом уровнем.

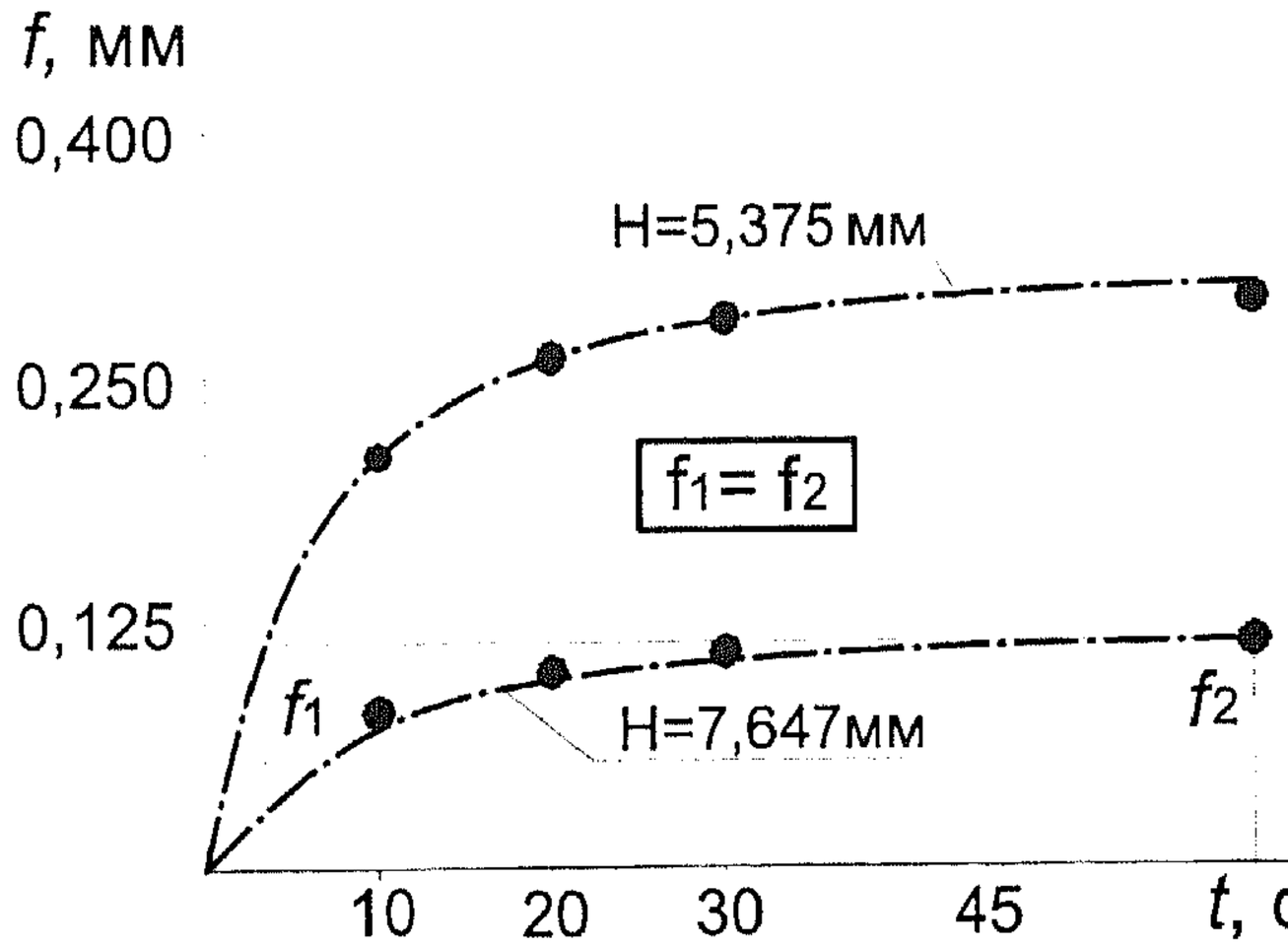


Рис. 3. Графики изменения кривизны стержней прямоугольного сечения различной жесткости при постоянном энергетическом уровне режима ДО

Зависимость (4) для этих случаев преобразуется в (5)

$$1 = \sqrt{\frac{U_1 H_2^3}{U_2 H_1^3}}, \quad 1 = \frac{U_1 H_2^3}{U_2 H_1^3},$$

откуда получаем

$$U_2 = U_1 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^3 . \qquad (5)$$

Теперь задача определения кривизны стержней, обладающих различной жесткостью, но обработанных на режиме с одним и тем же энергетическим уровнем, решается путем определения энергии пропорциональной потенциальной энергии изгиба при условии получения равной кривизны для стержней с различной жесткостью относительно «эталонной кривой».

Для оценки достоверности зависимости (5) использовали программу [6] и рассчитали значения энергий для случаев, показанных на рис. 1

$$f_1 = 0{,}115,\ H_2 = 5{,}375,\ U_2 = 0{,}0003487545,$$

$$f_2 = 0{,}115,\ H_1 = 7{,}648,\ U_1 = 0{,}0010059.$$

Таблица 1

Кривизна стержней и распределение энергии по объему стержней в зависимости от их жесткости

τ,с	$f_{эксп}$, мм	$Э_{пл}$, МПа	$Э_{уп}$,, МПа	$f_{расч}$, мм	H, мм
10	0,21	0,32012	0,001167	—	5,375
20	0,26	0,335258	0,001792	—	
30	0,28	0,34156	0,002083	—	
60	0,29	0,344702	0,002236	—	
90	0,30	0,34781	0,002394	—	
10	0,08	0,4143627	0,000485	0,07975	7,648
20	0,1	0,4263882	0,000759	0,09969	
30	0,11	0,432493	0,0009197	0,1096	
60	0,115	0,43556	0,001006	0,1146	
90	0,117	0,43679	0,0010415	0,117	

Проверяем по формуле (15) для $f = 0{,}115$:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{0{,}0003487545}{0{,}0010059} = 0{,}34671, \quad \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^3 = \left(\frac{5{,}375}{7{,}648} \right)^3 = 0{,}34713 .$$

Отклонение вычисленных величин относительной энергии и жесткости не превышает 0,12 %. Поэтому по результатам экспериментальных исследований можно заключить, что формула (5) правильно отражает реальный механизм деформирования при дробеструйной обработке.

Алгоритм использует подпрограмму, в которой кривизна является функцией от двух факторов: жесткости образца и количества поглощенной энергии.

На рис. 4 показано действие алгоритма, который находит такой режим ДО, при помощи которого кривизна образца с H = 5,375 мм будет такой же, как и у образца с H = 7,645 мм. В данном случае энергетический уровень режима снижен путем уменьшения

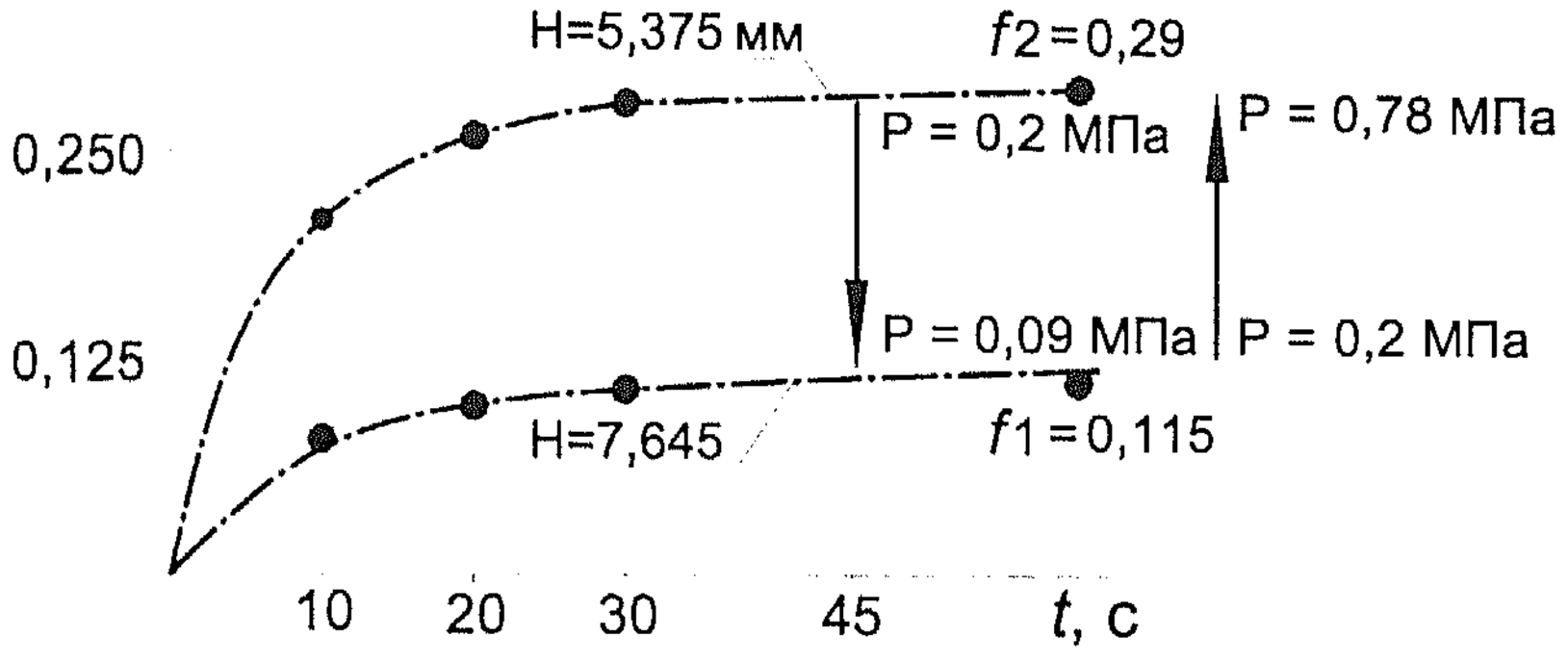


Рис. 4. Выравнивание кривизны стержней с различной жесткостью путем изменения энергетического уровня режима ДО

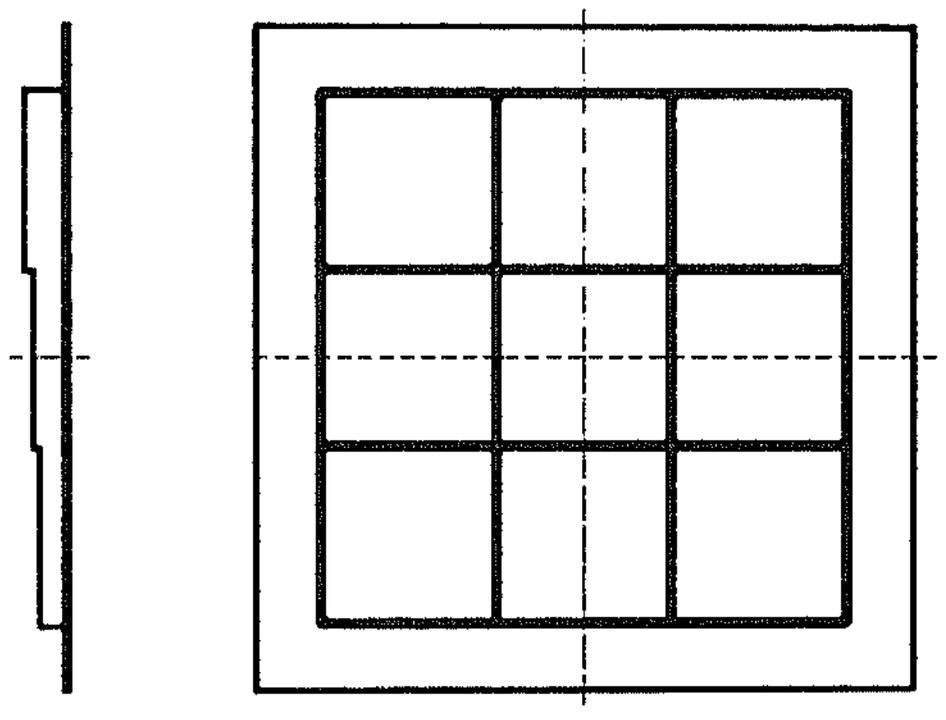


Рис. 5. Конструкция панели, снабженная ребрами переменной жесткости

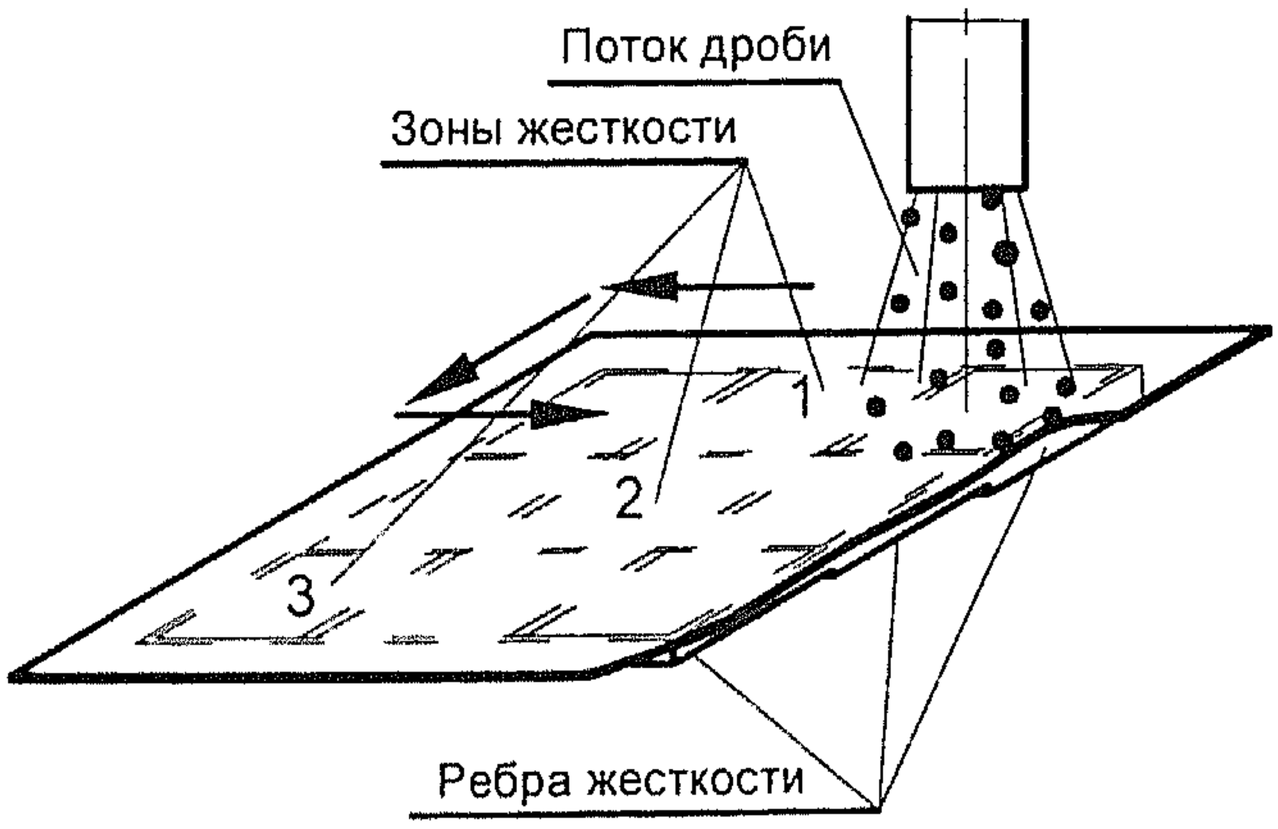


Рис. 6 Схема обработки панели переменной жесткости

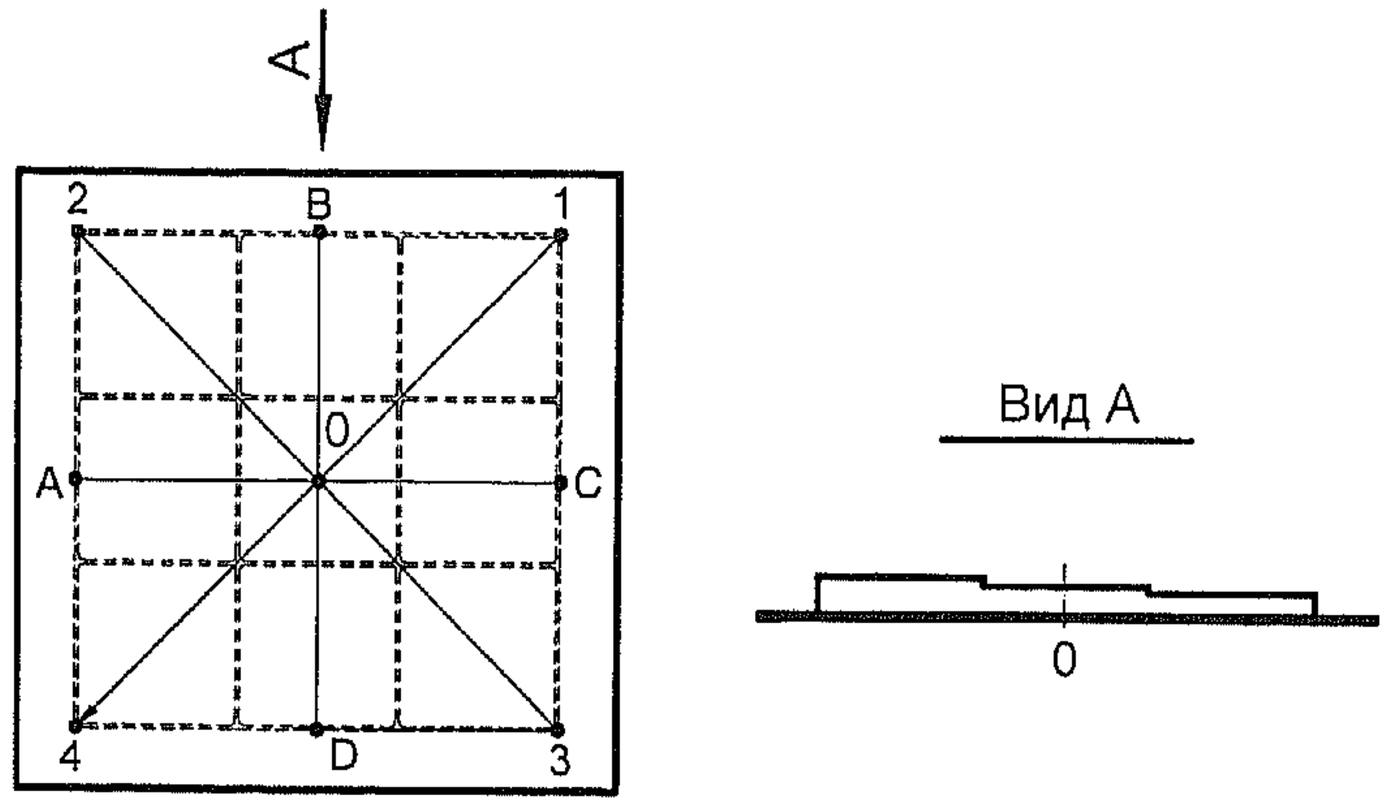


Рис. 7 Схема измерения кривизны панели после ДО

давления сжатого воздуха с 0,2 до 0,09 МПа, что обеспечивает нужную кривизну. Аналогичные результаты получены при повышении энергетического уровня ДО при увеличении давления сжатого воздуха с 0,2 до 0,78 МПа. Отклонение экспериментальных значений прогибов от рассчитанных алгоритмом для обоих случаев не превысило 7 %.

Высокая надежность работы всех функций алгоритма позволила перейти к разработке технологии придания кривизны панели переменной жесткости. Панель была изготовлена из алюминиевого сплава и имела ребра жесткости с различной прочностью, как показано на рис. 5.

Чтобы проверить надежность работы алгоритма, было решено придать панели сферическую форму дробеструйной обработкой.

Следует заметить, что обеспечить сферическую форму панели такой конструкции, применяя традиционные методы обработки металлов давлением, невозможно.

На панели выделили три зоны жесткости. Для каждой из этих зон алгоритм определил режим обработки с соответствующим энергетическим уровнем и временем обработки. Схема обработки панели представлена на рис. 6.

Таблица 2

Результаты измерения кривизны панели переменной жесткости

Сечение	Радиус кривизны по каждому сечению R, мм		Отклонение среднего радиуса Rср. от радиуса сечения в %
4 - 0 -1	11602	Средний радиус кривизны Rср.= 11576	0,2
2 - 0 -3	12329		6,5
A - 0 - C	10845		6,7
B - 0 - D	11528		0,4

Кривизну панели до и после обработки измеряли на плоской поверхности панели в четырех сечениях и восьми контрольных точках относительно точки 0, расположенной в геометрическом центре поверхности (рис. 7). До обработки все контрольные точки были расположены на одном уровне с точкой 0. После обработки контрольные точки сместились ниже точки 0. Величину смещения каждой точки измеряли, а кривизну панели в каждом сечении определяли по трем точкам, образующим дугу соответствующего радиуса. Результаты измерений сведены в табл. 2.

Выводы

Как видно из табл. 2, отклонение от сферичности панели не превысило 7 %. Однако полученная точность не является предельной для алгоритма.

Затраты на исследовательскую работу и подготовку изделий к производству при использовании алгоритма значительно сокращаются.

Очевидно, что возможности алгоритма раскрыты не полностью и исследования по повышению его эффективности и расширению его возможностей продолжаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбаков Г. М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиносстроения. Сообщение 1. Управление энергетическими параметрами. — М.: Известия вузов. Машиностроение, 2006.— № 1.— С. 52—56.
2. Рыбаков Г. М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиносстроения. Сообщение 2. Насыщение энергией обрабатываемого материала. — М.: Известия вузов. Машиностроение, 2006. — № 2. — С.35—38.
3. Рыбаков Г. М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиностроения. Сообщение 3. Разработка предсказывающей функции.— М.: Известия вузов. Машиностроение, 2006. — № 3. — С. 47—51.
4. Almen, J.O.,Peening Surfaces Improve Endurance of Machine Parts, Metal Progress, 43 (February 1943), P. 209–217.
5. Robert B. Heaton. Shot Peening. Metal Finishing, 1989, vol. 87, №7, pp. 25,26,28,30,31.
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.
7. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. — М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1954. — 856 с.