

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

629.735.015.4: 539.219.2

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ. СООБЩЕНИЕ 2. НАСЫЩЕНИЕ ЭНЕРГИЕЙ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

Канд. техн. наук, проф. Г.М. РЫБАКОВ

Предложен новый алгоритм, который представляет собой «ноу-хау» в области дробеструйной обработки. Алгоритм моделирует изменение пластической деформации в поверхностном слое детали в процессе дробеструйной обработки и определяет оптимум, при котором в поверхностном слое металла накапливается максимум «энергии сжатия». Результатом оптимальных условий при дробеструйной обработке является максимум усталостной прочности деталей и заданные параметры кривизны.

This paper describes new algorithm. This algorithm is a «know how» in the field of shot peening technology. This algorithm simulates the change plastic deformation in the surface layer of the component during shot peening, and eventually determines the optimum at which maximum «compressive energy» accumulate in the surface layer of the metal. The obtained optimum shot peening conditions result is maximum fatigue strength of the components and given parameters curvature.

Применение дробеструйной обработки (ДО) в автомобильной и авиационной промышленности для повышения выносливости деталей относят к 30—40-м годам XX века. В 1943 г. J.O. Almen из исследовательской лаборатории фирмы Джeneral Моторс разработал для контроля ДО метод, который он назвал «пластинки Алмена» (Almen strips) [1]. Метод основан на свойстве металлических пластин выгибаться навстречу потоку дробы обрабатываемой стороной, как показано на рис. 1.

Несмотря на большой объем исследований и опыт практического применения, до настоящего времени не найдено фундаментальных закономерностей, связывающих результаты исследований в области ДО в единую систему. Отсутствие этих закономерностей приводит фирмы к необходимости повторять рутинные эксперименты и исследования всякий раз, когда меняется материал или условия работы детали.

В данном сообщении представлена зависимость, описывающая изменение кривизны пластин при ДО с энергетической точки зрения. Выгиб пластинок навстречу потоку дробы зависит от энергии, поглощаемой материалом в процессе обработки и сопровождается насыщением обрабатываемой поверхности следами ударов дробинок (лунками). На рис. 2 приведены результаты исследований фирмы Metal Improvement Company (USA) по изучению насыщения поверхности лунками при ДО. На этой кривой исследователи отмечают период времени $(0...T)$ с, в который количество лунок на обрабатываемой поверхности растет по кривой, близкой к параболической. После достижения в момент времени T максимальной точки на этой кривой, функция насыщения меняется скачком и для всех значений времени больших T кривизна меняется по прямой, имеющей неболь-

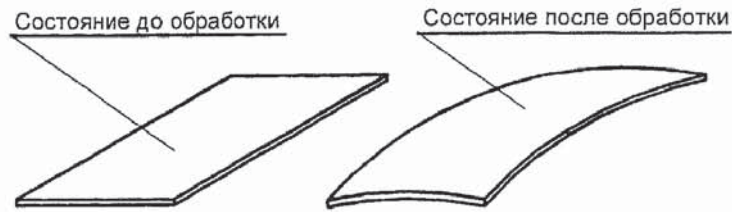


Рис. 1

шой угол наклона к оси времени. Оптимальным считают время, за которое кривизна увеличится не менее чем на 10 %, и принимают его равным $2T$, как показано на рис. 2. Многие исследователи отождествляют процесс насыщения поверхности следами ударов дробинок с процессом насыщения материала энергией, хотя не все эксперименты подтверждают это. За оптимальное деформированное состояние принимают такое, когда насыщение поверхности лунками от ударов дробинок достигает 100 %. При данном подходе практически невозможно получить математическую модель насыщения материала энергией, которая была бы настолько общей, что всегда оставалась верной при подстановке в нее конкретных свойств различных материалов. Для управления процессом с использованием ЭВМ необходимо иметь именно такую общую математическую модель.



Рис. 2

Для решения проблемы привлекли вероятностно-комбинаторные методы. Каждую лунку представили в виде абстрактного бездонного ящичка, размеры которого позволяют дробишке свободно пройти в ящичек, не задевая за его стенки. Вся абстрактная поверхность покрыта такими абстрактными ящичками, а дробишки подводятся к поверхности хаотично в произвольные места на поверхности одна за другой. Если этот процесс продолжать, то на любой его стадии ящички, в которые попали дробишки, будут содержать не менее чем по одной дробишке. При такой постановке задача имеет общее вероятностно-комбинаторное решение*. Вероятностно-комбинаторная модель имеет следующий вид:

$$P(\mu, m) = \left(C_{m-1}^{\mu-1} / m^{n-1} \right) \sum_{i=0}^{\mu-1} (-1)^i C_{\mu-1}^i (\mu - i)^{n-1},$$

где μ — число ящичков, заполненных не менее чем одной дробишкой; m — общее число ящичков на поверхности; n — число дробинок, подведенных к поверхности кратное чис-

*Математическое решение задачи разработал д-р физ.-мат. наук Орёл Е. Н.

лу m ; $P(\mu, n)$ — вероятность попадания не менее чем одной дробиной в μ ящиков из общего числа m , i — номер слагаемого суммы, которая рассчитывается до получения заданного значения вероятности $P(\mu, n)$.

Разработанная вероятностно-комбинаторная модель представляет собой общее решение или общий закон, по которому происходит насыщение поверхности следами ударов дробинок.

Если мы заменим абстрактную терминологию на технологическую, принятую при дробеструйной обработке, то абстрактные понятия получают смысл, соответствующий этой технологии: m — число лунок на поверхности, полностью укрытой следами ударов дробинок; μ — число лунок, образованных ударом не менее чем одной дробиной; n — число дробинок, подведенное к поверхности и кратное m ; i — номер слагаемого суммы, которая считается до заданного значения вероятности, $P(\mu, n)$ — вероятность того, что при числе подведенных к поверхности дробинок, равном n , μ лунок из m будет образовано не менее чем одним ударом дробиной. При этом отношение $(\mu/m)\%$ и есть искомый процент заполнения или насыщения поверхности следами ударов дробинок для назначенного значения вероятности $P(\mu, n)$. Полученные данные корреспондируются с исследованиями [2] и позволяют определить время достижения любого, наперед заданного процента насыщения поверхности следами ударов дробинок. Информацией, необходимой для использования зависимости, является число лунок на поверхности, полностью укрытой следами ударов дробинок.

Теперь проведем анализ энергетического фактора, определяющего возможности управления кривизной пластин ДО. Прежде всего следует отметить, что возникающие при ДО пластически деформированный и упруго деформированный слой после прекращения ДО приходят в состояние равновесия, воздействуя один на другой равными по модулю силами $|P_1| = |P_2|$ (рис. 4). В этом состоянии пластически деформированный слой

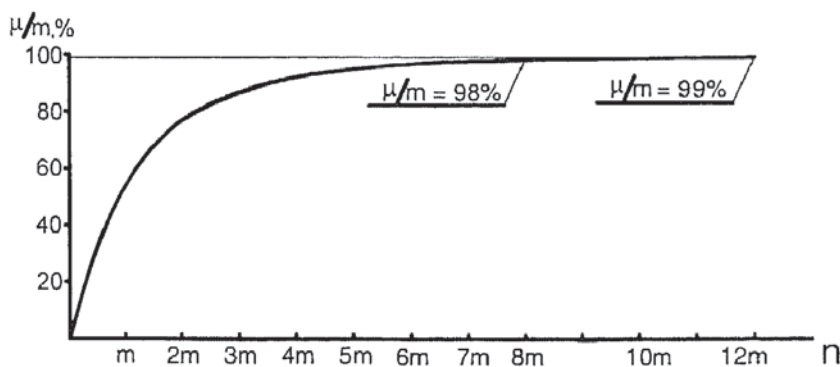


Рис. 3. Кривая насыщения поверхности следами ударов дробинок, рассчитанная комбинаторными методами для вероятности $P \geq 0,99$

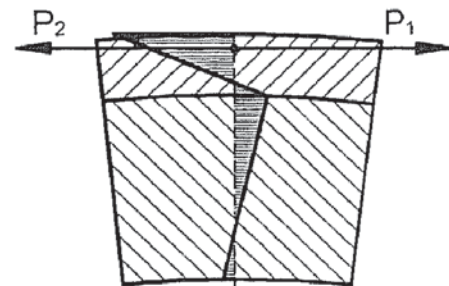


Рис. 4

упруго сжат и упруго изогнут, а упруго деформированный упруго растянут и также упруго изогнут с той же кривизной. Следовательно, каждый слой обладает энергией чистого изгиба, как и вся пластина. Используя выражение потенциальной энергии изгиба [3] и проведя ряд преобразований при условиях $M = \text{const}$ и $EJ = \text{const}$, получим

$$U = \frac{M^2 l}{2EJ}, M = \frac{EJ}{\rho}, U = \frac{E^2 J^2 \ell}{\rho^2 EJ 2} = \frac{EJ \ell}{\rho^2 2}, U_1 = \frac{EJ \ell}{\rho_1^2 2}, U_2 = \frac{EJ \ell}{\rho_2^2 2}, \frac{U_1}{U_2} = \frac{\rho_2^2}{\rho_1^2}, \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (1)$$

Результаты экспериментов, проведенных для подтверждения достоверности зависимости (1), провели на пластинах размером $75 \times 20 \times 1,3$ мм, изготовленных из высокопрочной стали, жаропрочного сплава и алюминиевого сплава (представлены в табл.). Обработку пластин провели стальной дробью диаметром 0,2 мм, которую подвели к обрабатываемой поверхности при помощи сжатого воздуха при давлении 0,2 МПа и переменном времени обработки. Радиус кривизны пластин измеряли стандартным способом по трем точкам, а энергию, поглощаемую материалом, определяли, используя специально разработанный алгоритм [4]. Как видно из таблицы, отклонения экспериментальных значений кривизны и расчетных значений энергетических характеристик для стали и жаропрочного сплава не превысили 1,5 %, а для алюминиевого сплава — 8 %. Зависимость (1) представляет точки на кривой прогибов пластин как энергетические характеристики и может быть использована для управления ДО при помощи ЭВМ.

Следует отметить, что возможности алгоритма не исчерпаны представленным материалом и будут публиковаться по мере появления новых результатов.

Таблица

| Время экспоз. т, с | $\Delta_{\text{уп. без.разм.}}$ | R, мм | $\sqrt{\frac{\Delta_{\text{уп.}}}{\Delta_{\text{уп.1}}}}$ | $\frac{R_1}{R}$ | $\Delta\%$ |
|---------------------|---------------------------------|---------|---|-----------------|------------|
| Высокопрочная сталь | | | | | |
| 10 | 0,282 | 535,82 | 1,000 | 1,000 | 0 |
| 20 | 0,3698 | 468,87 | 1,149 | 1,143 | 0,5 |
| 30 | 0,4027 | 450,12 | 1,1988 | 1,1904 | 0,7 |
| 40 | 0,4246 | 438,72 | 1,231 | 1,221 | 0,8 |
| 50 | 0,4484 | 427,24 | 1,265 | 1,254 | 0,88 |
| 60 | 0,472 | 416,8 | 1,298 | 1,285 | 1,0 |
| 70 | 0,496 | 406,86 | 1,33 | 1,317 | 1,3 |
| 80 | 0,581 | 397,24 | 1,364 | 1,35 | 1,0 |
| 90 | 0,547 | 388,07 | 1,397 | 1,38 | 1,2 |
| Жаропрочный сплав | | | | | |
| 10 | 0,12134 | 818,457 | 1,0 | 1,0 | 0 |
| 20 | 0,1870414 | 663,323 | 1,24156 | 1,2333871 | 0,6 |
| 30 | 0,2248382 | 607,66 | 1,361235 | 1,3469 | 1,0 |
| 40 | 0,248334 | 579,54 | 1,4306 | 1,412251 | 1,3 |
| 50 | 0,2639727 | 562,9 | 1,474951 | 1,453997 | 1,4 |
| Алюминиевый сплав | | | | | |
| 10 | 0,00171 | 671,97 | 1,00 | 1,00 | 0,00 |
| 20 | 0,003611 | 469,23 | 1,453 | 1,432 | 1,46 |
| 30 | 0,005574 | 381,63 | 1,805 | 1,76 | 2,55 |
| 45 | 0,009075 | 303,8 | 2,303 | 2,21 | 4,2 |
| 60 | 0,014415 | 245,75 | 2,903 | 2,73 | 6,3 |
| 90 | 0,019635 | 214,02 | 3,39 | 3,14 | 7,96 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allen J. O. Peening Surfaces Improve Endurance of Machine Parts, Metal Progress, 43 (February 1943). — P. p. 209—217.
2. Robert B. Heaton. Shot Peening. Metal Finishing, 1989. — Vol. 87/ — № 7. — Pp. 25, 26, 28, 30, 31.
3. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. — М.: Государственное издание технико-теоретической литературы, 1954. — 856 с.
4. Рыбаков Г. М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиностроения. Сообщение 1 // Известия вузов. Машиностроение. — 2006. — № 1. — С. 52—56.