

А.С. Донсков, А.В. Прохоров

Пермский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Предложена математическая модель остаточных напряжений, формирующихся в поверхностном слое заготовки в результате дробеструйной обработки. Проведенное сравнение расчетных и опытных данных показало их удовлетворительную сходимость.

Для увеличения усталостной прочности деталей машин широко используются методы поверхностного пластического деформирования (ППД), в том числе упрочнение дробеструйной обработкой. Это объясняется тем, что при упрочнении металла поверхностного слоя методами ППД в нем возникают значительные остаточные напряжения сжатия. Кроме того, как показано в работе [1], наличие остаточных напряжений сжатия частично нейтрализует вредное влияние на прочность металла начальных трещин усталости, замедляя, а в некоторых случаях приостанавливая их развитие. Вместе с тем в настоящее время применению дробеструйной обработки для упрочнения деталей машин, несмотря на предложенные в работах [2, 3 и др.] методы расчета остаточных напряжений, обычно предшествуют эксперименты на пробных образцах детали для определения режимов обработки дробью с целью создания необходимых остаточных напряжений.

В данной статье предложена математическая модель, описывающая формирование остаточных напряжений в зависимости от режима дробеструйной обработки.

Основу физической сущности математической модели составляет следующая особенность дробеструйной обработки, отмеченная в работе [3]. Несмотря на то что обработка поверхности заготовки осуществляется струей дроби, формирующиеся в поверхностном слое заготовки остаточные напряжения эквивалентны остаточным напряжениям, возникающим в результате удара отдельной дробинки. Следуя этому положению, заключим, что моделирование остаточных напряжений при дробеструйной обработке может быть осуществлено с помощью математической модели остаточных напряжений, возникающих в точках оси z (рис. 1), совпадающей с направлением удара отдельной дробинки шаровидной формы.

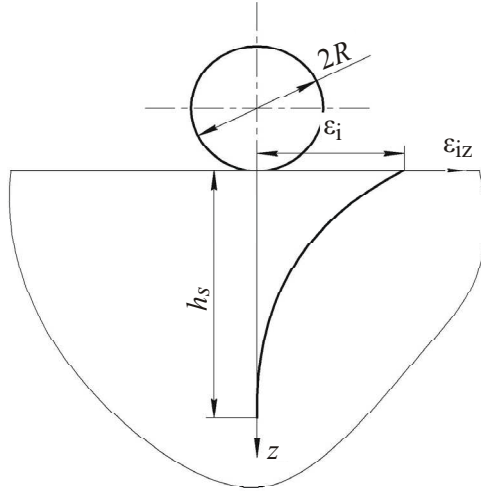


Рис. 1. Распределение деформации ε_{iz} по глубине пластически деформированного слоя

Остаточные напряжения σ_{ij}^o , согласно теореме о разгрузке, определяются по формуле

$$\sigma_{ij}^o = \sigma_{ij}^p - \sigma_{ij}^e, \quad (1)$$

где σ_{ij}^p – напряжения, возникающие при упругопластическом деформировании. В дальнейшем они называются полными напряжениями;

σ_{ij}^e – напряжения, снимаемые при упругой разгрузке, далее они называются напряжениями разгрузки.

Полные напряжения в произвольной точке оси z могут быть вычислены по формулам [4]:

$$\sigma_z^p = -p_{\max} \frac{a_p^2}{a_p^2 + z^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_x^p = \sigma_y^p = -p_{\max} \left[(1 + \mu_*) - \frac{1}{2} \frac{a_p^2}{a_p^2 + z^2} - (1 + \mu_*) \frac{z}{a_p} \operatorname{arctg} \frac{a_p}{z} \right]. \quad (3)$$

Для точки $z = 0$, т.е. в центре поверхности контакта

$$\sigma_z^p = -p_{\max}, \quad (4)$$

$$\sigma_x^p = \sigma_y^p = -p_{\max} \frac{(1 + 2\mu_*)}{2}, \quad (5)$$

где a_p – радиус круговой области пластического отпечатка, образующегося на поверхности обрабатываемой заготовки при ударе отдельной дробинки;

p_{\max} – максимальное давление в области контакта дробинки с поверхностью заготовки;

μ_* – переменный параметр упругости (коэффициент Пуассона).

Пути нахождения величин a_p , p_{\max} и μ_* аналогичен решению контактной задачи о скольжении штампа с неплоским основанием [5]. Применяя методологические подходы работы [5] для случая внедрения шара в упругопластическое полупространство, получим следующие соотношения между:

– полным (упругопластическим) внедрением δ_p дробинки-шара и нормальной силой удара P

$$\delta_p = \left[\frac{P(1-\mu)}{G\sqrt{R}} \frac{1}{1-\omega} \right]^{2/3} \frac{\alpha_a^2}{1+\omega}; \quad (6)$$

– радиусом a_p области пластического отпечатка и силой P

$$a_p = \left[\frac{P(1-\mu)}{G} \frac{R}{1-\omega} \right]^{1/3} \alpha_a; \quad (7)$$

– радиусом кривизны R_L лунки пластического отпечатка и радиусом R дробинки

$$R_p = \frac{R}{\omega}; \quad (8)$$

– величиной упругого δ_e и полного δ_p внедрения в обрабатываемую заготовку

$$\delta_e = \delta_p(1-\omega). \quad (9)$$

В приведенных выражениях α_a – параметр формы области контакта. Для круговой области $\alpha_a = 0,72$; ω – функция переменных параметров упругости μ_* и G_* :

$$\omega = 1 - \frac{(1-\mu)G_*}{(1-\mu_*)G}. \quad (10)$$

Согласно принятому в работе [5] методу переменных параметров упругости, процесс решения задачи о деформировании упругопластического тела представляет собой итерационный процесс, на каждом шаге которого тело рассматривается как идеально упругое, имеющее в исследуемых точках мо-

дули упругости и сдвига E_* , G_* и коэффициент Пуассона μ_* , определяемые по формулам:

$$E_* = \frac{3E}{2(1+\mu)\psi + 1 - 2\mu}; \quad G_* = \frac{G}{\psi}; \quad \mu_* = \frac{1 - (1 - 2\mu) / \psi(1 + \mu)}{2 + (1 - 2\mu) / \psi(1 + \mu)}, \quad (11)$$

где E , G , μ – модули упругости, сдвига и коэффициент Пуассона до момента деформирования упругопластического тела;

ψ – функция, вычисляемая по формуле

$$\psi = E \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}, \quad (12)$$

где σ_i – обобщенное напряжение, вычисляемое по экспериментальной зависимости $\sigma_i = \varphi(\varepsilon_i)$, построенной по результатам на растяжение деформируемого материала;

ε_i – обобщенная деформация в точке определения значений переменных параметров E_* , G_* , и μ_* . При определении параметров пластического отпечатка, образующегося на поверхности при ударе дробинки, такой точкой является $z = 0$. В ней

$$\varepsilon_i = \frac{1}{4\pi\alpha_a^2} \frac{(1 - 2\mu_*)}{(1 - \mu_*)^{2/3}} \frac{P^{1/3}}{G_*^{1/3} R^{2/3}}. \quad (13)$$

Пренебрегая упругой деформацией дроби, нормальную силу удара P можно определить по формуле [6]

$$P = \frac{0,024R^2 \vartheta^{6/5} \gamma^{3/5}}{\left(\frac{1 - \mu^2}{E}\right)^{2/5}}, \quad (14)$$

где R – радиус дроби, м;

v – скорость полета дроби, м/с;

γ – удельный вес материала дроби, кг/см³.

Вычисление переменного параметра μ_* по глубине деформированного слоя обрабатываемой заготовки осуществляется по формулам (11), (12) с использованием зависимости [7]

$$\varepsilon_{iz} = \varepsilon_i \left(\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_i}\right)^{z/h_s}, \quad (15)$$

где ε_{iz} – обобщенная деформация в рассматриваемой точке оси z ;

ε_T – деформация, соответствующая пределу текучести σ_T материала заготовки, $\sigma_T = E\varepsilon_T$;

h_s – глубина пластически деформированного слоя (см. рис. 1).

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}. \quad (16)$$

При расчете напряжений разгрузки будем полагать, что эти напряжения эквивалентны напряжениям, возникающим при упругом внедрении дробинки-шара в лунку образованного пластического отпечатка радиусом кривизны R_n на величину

$$\delta_e = \left[\frac{P_e(1-\mu)}{G\sqrt{R_1}} \right]^{2/3} \alpha_\delta, \quad (17)$$

где P_e – сила упругого внедрения дробинки в пластический отпечаток;

R_1 – радиус средней кривизны соприкасающихся поверхностей [8]:

$$R_1 = \frac{RR_n}{R_n - R}. \quad (18)$$

Учитывая зависимость (9), из уравнения (17) находим

$$P_e = \frac{GR_1^{1/2}\delta_p^{3/2}(1-\omega)^{3/2}}{\alpha_\delta^{3/2}(1-\mu)}. \quad (19)$$

Поскольку для упругого контакта $p_{\max} = \frac{3}{2} \frac{P_e}{\pi a_e^2}$, то из равенства макси-

мального давления в области контакта при упругом и упругопластическом внедрении дробинки в поверхность заготовки имеем

$$a_e = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_e}{HB}}. \quad (20)$$

Таким образом, приведенные зависимости (1)–(20) составляют математическую модель, позволяющую рассчитать остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое обрабатываемой заготовки на ее локальном участке удара отдельной дробинки общей струи дробы. Алгоритм расчета напряжений составляют следующие основные этапы.

1. Определяется по формуле (14) сила удара P . Методом последовательных приближений по формулам (11)–(13) вычисляются с заданной точностью переменные параметры упругости в центре контакта ($z = 0$) дробинки с поверхностью заготовки.

2. Рассчитываются по зависимостям (10), (7), (16) функция переменных параметров упругости ω , радиус a_p области пластического отпечатка и глубина на пластически деформированного слоя h_s .

3. Принимается, согласно результатам работ [2, 7], максимальное давление p_{\max} , равным твердости по Бринеллю ($p_{\max} = HB$, МПа), и по формулам (2)–(5) вычисляются полные напряжения в последовательных точках оси z . При этом параметр μ_* определяется с использованием зависимости (15).

4. Вычисляются напряжения упругой разгрузки по формулам (2)–(5), в которых величины a_p , и μ_* принимаются равными a_e и μ .

5. По выражению (1) определяются остаточные напряжения.

Для проверки адекватности математической модели проведено сравнение результатов моделирования с опытными данными, приведенными в работах [6, 9–12].

На рис. 2 приведены эпюры остаточных напряжений, формирующихся при обдувке дробью пластин из стали 12Х2Н4А (НВ 513). Дробеструйная обработка производилась шариками из стали ШХ-15 диаметром 1,0 мм при скорости 56 м/с в течение 1 мин [11].

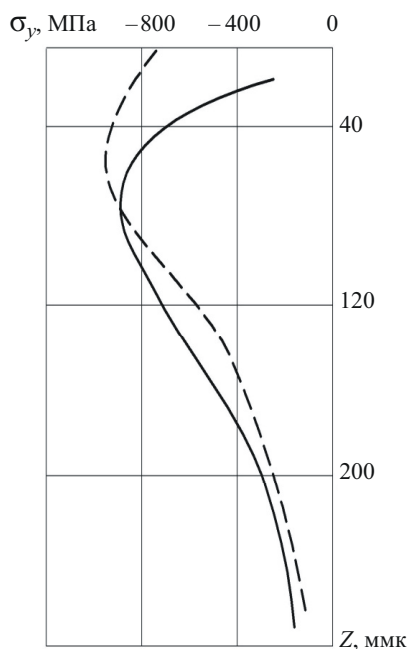


Рис. 2. Эпюры остаточных напряжений после дробеструйной обработки стали 12Х2Н4А: — — экспериментальные данные [11]; - - - - - расчетные данные

Как видно из приведенных эпюр, характер изменения по глубине поверхностного слоя рассчитанных напряжений полностью согласуется с опыт-

ными данными. В частности, математическая модель отражает экспериментально установленное во многих работах возникновение при дробеструйной обработке сжимающих остаточных напряжений. При этом их максимум, как правило, находится на некоторой глубине пластически деформированного слоя обработанной детали.

В таблице представлены результаты количественной оценки расчетных и экспериментальных данных исследования остаточных напряжений для различных материалов и режимов дробеструйной обработки.

Расчетные (числитель) и экспериментальные (знаменатель) значения максимальных остаточных напряжений и глубины их залегания

Материал (твердость по Бринеллю)	Диаметр дроби d , мм	Скорость полета дроби v , м/с	Максимальные остаточные напряжения σ_r , МПа	Глубина максимальных остаточных напряжений h , мкм
ВТ1-1 (НВ 321) [9]	1,5	89	705/750	40/0
40ХНМА (НВ 360) [10]	1,0	65	729/700	68,1/80
	1,4	65	746/500	96,8/100
Сталь 40 (НВ 190) [10]	1,0	65	380/500	46/100
	1,4	65	413/500	63,2/150
12Х2Н4А (НВ 534) [11]	1,0	56	986/1000	50/65
13Х3НВМ2Ф-Ш (НВ 580) [11]	0,2	42	1250/1200	9,6/10
	1,6	1,2	1008/1000	30/40
	0,8	3	1170/1000	32/(20-40)
P18 (НВ 317) [12]	2,5	10	661/850	28,8/0
Сталь 10 (НВ 143) [13]	1,2	92	650/700	95,3/80
	1,2	150	395/700	117/80
Сталь 5 (НВ 165) [1]	1,6	58	410/500	79/50

Сопоставительный анализ результатов опытного и вычислительного эксперимента позволяет заключить, что полученная математическая модель качественно и количественно удовлетворительно отражает процесс формирования остаточных напряжений, формирующихся при дробеструйной обработке. Относительная погрешность расчетных значений не превышает 20 %. Имеющаяся повышенная погрешность расчетных данных по глубине залегания максимальных остаточных напряжений обусловлена тем, что в разработанной математической модели не учитывается время обработки и, следовательно, многократность деформирования дробью локальных участков обрабатываемой поверхности. Вместе с тем данная модель позволяет выполнить

прогнозирование параметров режима дробеструйной обработки для получения требуемых остаточных напряжений, не прибегая к трудоемким экспериментальным исследованиям.

Список литературы

1. Школьник Л.М. О методе определения остаточных напряжений, вызванных дробеструйной обработкой // Заводская лаборатория. – 1942. – № 10. – С. 1232–1239.
2. Харди С., Баронет С.Н., Тордион Д.В. Вдавливание жесткой сферы в упругопластическое полупространство // Механика. Периодический сборник переводов иностранных статей. – 1972. – № 2(132). – С. 126–136.
3. Смирнов В.А. Аналитическое определение остаточных напряжений и деформаций в процессе обработки деталей // Известия вузов. Машиностроение. – 1977. – № 1. – С. 150–154.
4. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев [и др.]. – Т. 2. – М.: Машгиз, 1958. – 974 с.
5. Донсков А.С. Исследование контактной зоны деформации при выглаживании инструментом произвольной формы // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении: сб. тр.; Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1983. – С. 69–78.
6. Пичко А.С. Выбор рациональных режимов при дробеструйной очистке металлических поверхностей // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 194–204.
7. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
8. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.
9. Дрозд М.С., Федоров А.В., Лебский С.Л. Исследование влияние начальной напряженности деталей из титановых сплавов на эпюру остаточных напряжений после ППД // Повышение точности деталей машин и приборов / Моск. дом науч.-техн. пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского. – М., 1977. – С. 27–29.
10. Саверин М.М. Дробеструйный наклеп. Теоретические основы и практика применения. – М.: Машгиз, 1955. – 307 с.
11. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1981. – 231 с.
12. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. – М.: Машиностроение, 1977. – 165 с.
13. Саверин М.М. Применение дробеструйного наклепа для повышения конструкционной прочности и долговечности машиностроительных деталей // Вестник машиностроения. – 1951. – № 7. – С. 54–58.

Получено 28.04.2010