

поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива // Упрочняющие технологии и покрытия. – Москва, 2007. – № 10. – С. 19–23.

3. Искандарова, Н. К., Шин, И. Г. Анализ режущей способности нового абразивного материала купершлака для снятия заусенцев пильного диска в процессе абразивоструйной обработки // Научно-технический журнал «Машиностроение». – Андижан, 2022. – № 1. – С. 28–36.
4. Искандарова, Н. К. Аналитическая оценка силы микрорезания при абразивоструйной обработке металлических поверхностей // Научно-технический журнал Машиностроение. Андижан, 2024. – № 3. – С. 16–22.
5. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов – М.: Машиностроение. 1975. – 344 с.
6. Вульф, А. М. Резание металлов. – М.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1973. – 496 с.
7. Армарего, И. Дж. А., Браун, Р. Х. Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
8. Шин, И. Г., Искандарова, Н. К. Определение глубины деформационного упрочнения на основе моделирования напряженного состояния при абразивоструйной обработке деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия. – Москва, 2024. – № 12. – С. 538–545.

УДК 671.924.9

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДРОБЬЮ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Туйчиев М. Ш., студ., Назаров С. Р., PhD., доц., Шин И. Г., д.т.н., проф.*

*Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,  
г. Ташкент, Республика Узбекистан*

Реферат. Представлены данные по аналитическому определению радиуса пластического контакта и силы удара в процессе контактного взаимодействия при дробеударной обработке металлических поверхностей.

Ключевые слова: дробеударная обработка, пластический отпечаток, радиус, твердость, сила, дробь, деформация.

В машиностроении для повышения долговечности и усталостной прочности деталей машин, работающих в условиях циклического нагружения, применяют различные способы поверхностного пластического деформирования (ППД) и, в частности, упрочняющую обработку дробью, которая обеспечивает эффективное упрочнение тонких маложестких деталей с острыми кромками и сложным профилем (лопатки ГТД, рессоры, пружины, пильные диски и др.), для обработки которых такие способы ППД, как обкатывание шариком или роликом, алмазное выглаживание не подходят.

При дробеструйной обработке на поверхности детали образуется множество пластических отпечатков, создающих двухосное поле остаточных сжимающих напряжений, направленных параллельно обработанной поверхности. При этом наибольшие напряжения имеют место в приповерхностном слое.

Радиус пластического отпечатка  $a = d / 2$  можно определить через степень поверхностной деформации  $\varepsilon$  по формуле, предложенной М. М. Савериным

$$\varepsilon = \frac{d}{D} = \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho}{g} \cdot \frac{n_d + 2}{H_d} \cdot v_0^2 \right)^{\frac{1}{n_d + 2}} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала дроби, г/см<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $v_0$  – скорость удара, м/с;  $H_d$  – динамическая твердость упрочняемого материала, кгс/мм<sup>2</sup>;  $n_d$  – показатель динамического упрочнения.

Преобразованием формулы (1) получим выражение [1] для важнейшего параметра контактного взаимодействия при упругопластическом внедрении шара в упрочняемую поверхность детали – радиус пластического отпечатка после однократного соударения:

$$a' = \frac{d}{2} = D \sqrt[4]{\frac{\rho \cdot v^2}{10,2 \cdot HB \cdot g}}, \text{ мм} \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр пластического отпечатка, мм;  $D$  – диаметр дроби, мм;  $\rho$  – плотность материала дроби, г/см<sup>3</sup> (Н/мм<sup>3</sup>);  $v$  – скорость дроби при ударе, м/с;  $HB$  – твердость статическая по Бринелю;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Зависимость (2) получена с учетом, что для конструкционных качественных углеродистых сталей 20, 25, 40 и легированных сталей 40Х, 30ХГСА, 30ХНМА [2]  $n_d = 2$ . Динамическую твердость  $H_d$  заменили на статическую твердость  $HB$  с учетом известной зависимости  $H_d = 1,7 HB$  [3].

Формула (1) рекомендована для расчета поверхностной деформации при допущении, что каждый последующий удар дроби менее эффективен, чем первый. Это объясняется тем, что первичный удар дроби уже вызывает пластическую деформацию и эффект деформационного упрочнения, но так как кинетическая энергия дроби не меняется, то последующие удары менее эффективны ввиду возникшего упрочненного слоя.

Увеличение диаметра  $d_i$  отпечатка и соответственно поверхностной деформации  $\varepsilon$  прекращается после 10–12 ударов [4] и достигает значения  $d = (1,3 \dots 1,5) d_i$ , где  $d_i$  – диаметр пластического отпечатка при первом ударе. В численном эксперименте за коэффициент увеличения диаметра  $a = K_a a'$  можно принять среднее значение  $K_a = 1,4$ .

В работе [5] статическую силу, соответствующую данному радиусу пластического отпечатка, определяли по формуле

$$P = \omega \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot \left[ \left( 1 + \frac{\pi}{2} \right) \cdot a^2 + \left( \frac{R^2}{2} - a^2 \right) \cdot \arcsin \frac{a}{R} - \frac{a}{2} \sqrt{R^2 - a^2} \right], \quad (3)$$

где  $\omega \approx 1,1$  – коэффициент, учитывающий трение в контакте шар-деталь;  $R$  – радиус шара.

На рисунке 1 а–в показаны зависимости изменения радиуса  $a$  отпечатка, силы  $P$  удара и распределенной нагрузки  $p_0$  от скорости  $v$  дроби при разной твердости обрабатываемого материала.

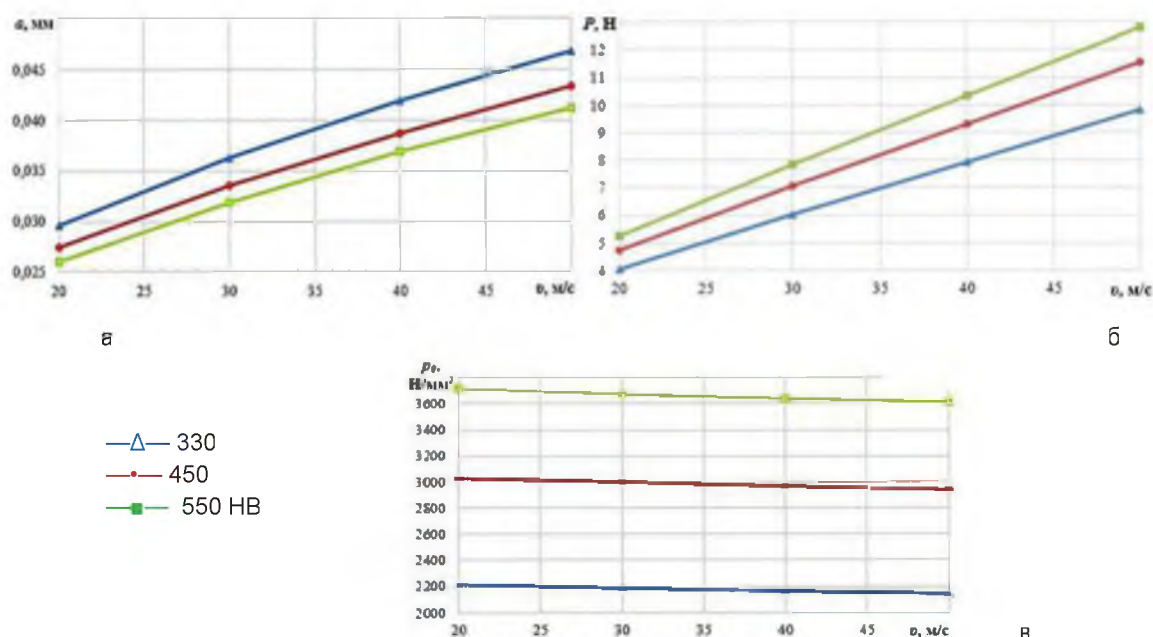


Рисунок 1 – Влияние скорости  $v$  дроби при разной твердости обрабатываемого материала:  
а – на радиус  $a$  отпечатка; б – на силу  $P$  удара; в – на распределенную нагрузку  $p_0$

С увеличением твердости обрабатываемого материала, то есть повышением сопротивления пластическому деформированию, радиус  $a$  отпечатка уменьшается незначительно. При увеличении твердости с 330 до 550 НВ и скорости удара  $v = 20$  м/с радиус отпечатка уменьшается с 0,0296 до 0,0260 мм, то есть на 12,2 %; при  $v = 30$  м/с – на 11,9 %; при  $v = 40$  м/с – на 12,1 %; при  $v = 50$  м/с – на 12 % (рис. 1 а).

При твердости обрабатываемого материала 330 НВ (твердость материала пильных дисков хлопкоперерабатывающих машин) с увеличением скорости удара с 20 до 50 м/с (рис. 1 б) сила  $P$  удара возрастает с 4,054 до 9,810 Н, то есть в 2,4 раза. С увеличением твердости с 330 до 550 НВ сила  $P$  удара при  $v = 20$  м/с уменьшается с 4,054 до 3,161 Н (на 22 %). Данная закономерность наблюдается и при скоростях 30, 40 и 50 м/с.

С увеличением твердости обрабатываемого материала повышается распределенная нагрузка  $p_0$ , причем для всех исследуемых скоростей она увеличивается на 68 % (рис. 1 в). От повышения скорости удара с 20 до 50 м/с изменение распределенной нагрузки незначительно, разница в зависимости от твердости обрабатываемого материала составляет всего  $2,8 \pm 3,2$  % [6].

При обработке материалов разной твердости (330, 450, 550 НВ) дробью с диаметром  $D = 0,3$  мм при  $v = 40$  м/с радиусы отпечаток были в диапазоне  $0,0418 \pm 0,0368$  мм (рис. 1 а). По формуле (2) для дроби с  $D = 0,2$  мм радиус отпечатков составил  $0,028 \pm 0,025$  мм.

При разной твердости обрабатываемого материала сила  $P$  удара при  $v = 40$  м/с составила  $7,923 \pm 10,333$  Н (рис. 1 б). Расчетное значение по формуле (2) распределенной нагрузки  $p_0$  при  $v = 40$  м/с,  $D = 0,2$  мм и твердости обрабатываемого материала 550 НВ с учетом уменьшения диаметра радиуса отпечатка в 1,5 раз составит  $p_0 = 7896$  МПа.

Такое сопоставление расчетных и экспериментальных данных [4] показателей НДС обработанных поверхностей показало их удовлетворительную сходимость, что позволило перейти к расчету интенсивности остаточных напряжений  $\sigma_{locm}$  [7, 8].

Предложенный расчет радиуса отпечатка, силы удара дроби, интенсивности напряжений в поверхностном слое детали при дробеударном упрочнении с учетом твердости обрабатываемого материала и закономерности распределения интенсивности нормальных напряжений по глубине поверхностного слоя позволил рассчитать остаточные напряжения, которые во многом определяют усталостную прочность и долговечность деталей машин, работающих в условиях переменных нагрузок.

#### Список использованных источников

1. Шин, И. Г. Технологические методы обеспечения качества и прогнозирования долговечности деталей машин первичной обработки хлопка: Автореф. дисс... докт. техн. наук 05.02.03 / И. Г. Шин. – Ташкент, 2014. – 90 с.
2. Рыковский, Б. П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом / Б. П. Рыковский, В. А. Смирнов, Г. М. Щетинин. – М.: Машиностроение, 1985. – 151 с.
3. Клейс, И. Р. Экспериментальное и расчетное определение глубины повреждений от удара сферического индентора / И. Р. Клейс, Х. Ф. Кангур // Трение и износ. – 1987. – Т. 8. – № 4. – С. 605–613.
4. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
5. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
6. Назаров, С. Р. Алгоритмизация расчета интенсивности остаточных напряжений при дробеударном упрочнении деталей технологических машин / С. Р. Назаров, Б. М. Касимов, И. Г. Шин // Материалы Международного научно-практического симпозиума «Прогрессивные технологии и оборудование: текстиль, одежда, обувь». 3 ноября 2020 г. – Витебск, ВГТУ, 2020. – С. 81–84.
7. Шин, И. Г. Интенсивность остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании деталей машин / И. Г. Шин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010, – № 2. – С. 10–13.
8. Шин, И. Г. Дислокационная модель формирования технологических остаточных напряжений в деталях машин и оценка их интенсивности / И. Г. Шин, Р. Х. Максудов, М. Р. Муминов, З. А. Шодмонкулов // Вестник машиностроения. – 2014, – № 9. – С. 30–34.