

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.78:004.94

*В. В. Афаневич, В. М. Пашкевич, В. А. Попковский*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

UDC 621.78:004.94

*V. V. Afanovich, V. M. Pashkevich, V. A. Popkovsky*

### SIMULATION OF THE PROCESS OF SURFACE MICRORELIEF FORMATION DURING INERTIA-PULSE PROCESSING

#### Аннотация

Представлены результаты моделирования упругопластического удара шара по поверхности при инерционно-импульсном раскатывании. В качестве материала деформирующего шара использована закаленная сталь ШХ15, в качестве обрабатываемой поверхности – сталь 45 в состоянии поставки.

#### Ключевые слова:

поверхностно-пластическое деформирование, инерционно-импульсная обработка, моделирование, упругопластический удар, конечно-элементная модель, размер лунки, шероховатость поверхности.

#### Abstract

The results of modeling an elasto-plastic impact of a ball against the surface during inertia-pulse rolling are presented. ШХ15 (HRC 60) hardened steel is used as the material of the deforming ball, and 45 (C45E) steel in the delivery condition is used as the surface to be treated.

#### Keywords:

surface plastic deformation, inertia-pulse processing, simulation, elasto-plastic impact, finite element model, crater size, surface roughness.

#### Введение

Среди различных способов обработки заготовок поверхностно-пластическим деформированием (ППД) можно выделить инерционно-импульсную. При ее реализации деформирующим элементом (шаром) сообщается движение, направленное перпендикулярно обрабатываемой поверхности. При этом шары наносят удары по ней (рис. 1).

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $D$  – диаметр обрабатываемой поверхности;  $d_{ш}$  – диаметр деформирующего шара;  $V$  – вектор скорости движения центра шара.

Вариантом инструмента для реализации такого способа обработки является инерционно-импульсный раскатник (рис. 2).

При его использовании обрабатываемую заготовку закрепляют в патроне токарного станка. Инструмент неподвижно устанавливается в пиноли задней бабки и подводится к заготовке таким образом, чтобы фрикционный поводок 14, установленный в поводковой цанге 2, вошел в соприкосновение с наружной поверхностью заготовки. Далее при помощи гайки 3 поводковая цанга прижимается к заготовке.



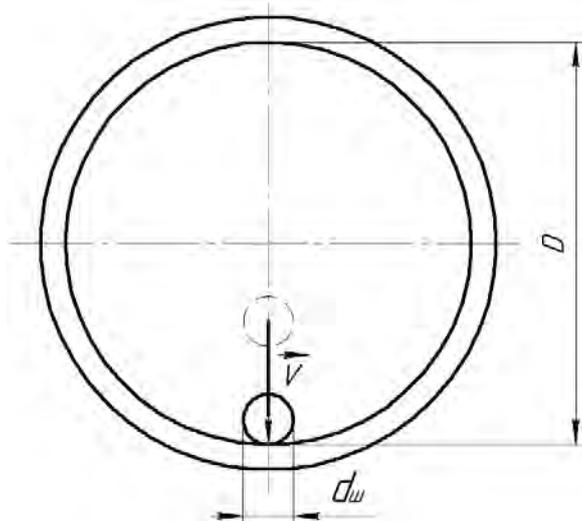


Рис. 1. Схема инерционно-импульсной обработки внутренней цилиндрической поверхности

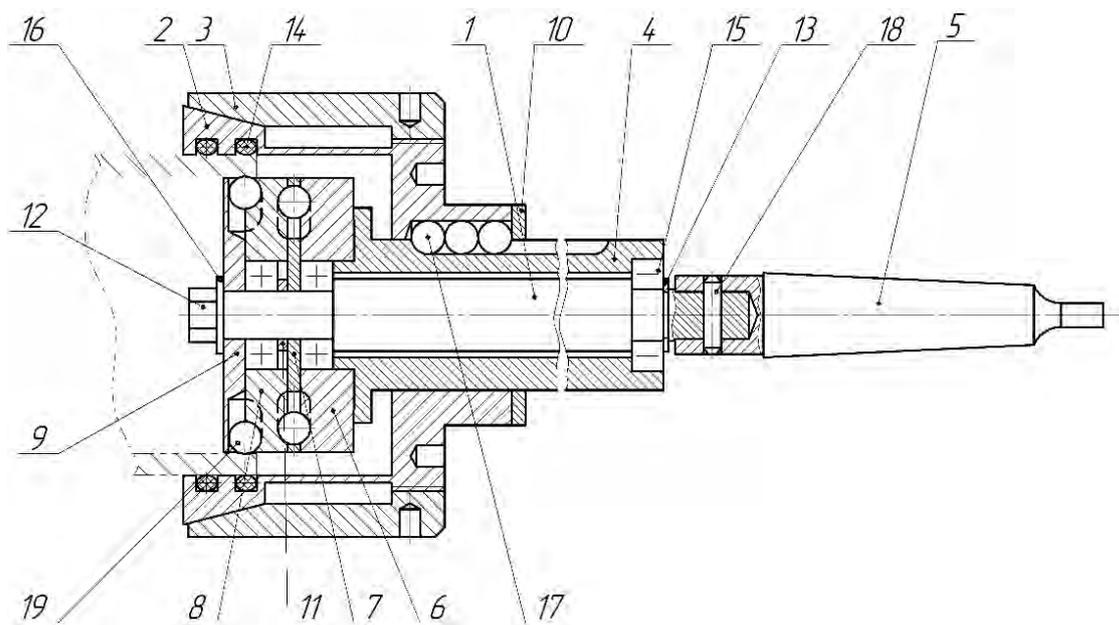


Рис. 2. Инерционно-импульсный раскатчик отверстий

После этого включается вращение шпинделя, и заготовка, а вместе с ней и поводковая цанга, начинают вращаться. Далее вращение через подвижную шпонку, выполненную в виде шаров 17, передается на корпус 4 инструмента.

Шпонка выполнена подвижной для того, чтобы при работе инструмента корпус имел возможность свободно перемещаться вдоль оси цанги. На корпусе неподвижно установлено ведущее звено 6 редукцирующего узла. С его по-



мощью на опорный элемент 8 передается редуцированное вращение.

На левом торце опорный элемент имеет замкнутую волнообразную канавку, выполненную таким образом, что деформирующие шары 19, обкатываясь по ней, выступают за наружную цилиндрическую поверхность.

Взаимодействуя с пазами сепаратора 9, которые выполнены радиально его оси, шары совершают возвратно-поступательные движения перпендикулярно обрабатываемой поверхности заготовки.

Таким образом, за счет совмещения вращения заготовки и движения подачи инструмента поверхность заготовки может обрабатываться по всей площади.

На эффективность процесса инерционно-импульсной обработки влияют различные параметры: материалы заготовки и деформирующего элемента, его размер, скорость шара в момент нанесения удара по обрабатываемой поверхности, исходная шероховатость обрабатываемой поверхности и другие.

### ***Конечно-элементная модель удара деформирующего элемента по поверхности***

При создании модели удара были приняты следующие допущения:

- не учитываются шероховатости поверхности шара и обрабатываемой поверхности заготовки, а также отклонения их формы;
- удар наносится строго перпендикулярно обрабатываемой поверхности, проскальзывание шара по поверхности в тангенциальном направлении не учитывается;
- материал шара и обрабатываемой поверхности описывается диаграммой Прандтля (диаграммой идеального упругопластического материала);
- в область обработки наносится единичный удар (однократная обработка поверхности).

Для реализации моделирования в пакете прикладных программ SolidWorks была создана твердотельная модель обрабатываемой заготовки, которая разбита на набор конечных элементов. В их качестве использовались тетраэдральные десятиузловые конечные элементы повышенной точности (рис. 3).

На рис. 4 приведена конечно-элементная модель взаимодействующих при обработке тел, а также показаны точки закрепления заготовки.

Полученная модель оказалась довольно громоздкой и требует значительных временных и компьютерных ресурсов для расчета. Для ее упрощения был использован сформулированный Сен-Венаном принцип в рамках теории упругости. В соответствии с ним, если к какой-либо малой, по сравнению с размерами всего тела, части приложена статически уравновешенная система сил, то она вызывает напряжения, быстро убывающие по мере удаления от места соприкосновения. Данный принцип позволяет заменять одни граничные условия (действующие силы) на другие (удобные для статических расчетов) и называется методом смягчения граничных условий.

Учитывая осесимметричный характер модели и используя принцип Сен-Венана, была предложена усовершенствованная модель упругопластического удара в области контакта. На рис. 5 показана ее реализация в среде SolidWorks.

При построении конечно-элементной модели предполагалось, что нижняя грань фрагмента обрабатываемого изделия жестко закреплена. Кроме того, для снижения погрешности расчетов в зоне контакта шара и обрабатываемой поверхности производилось значительное измельчение сетки конечных элементов (линейный размер самого крупного элемента более чем в 20 раз превосходит размер наиболее мелкого элемента). Вектор скорости шара задавался пер-



пендикулярно обрабатываемой поверхности. В процессе вычислений решалась контактная задача взаимодействия шара

и поверхности, при которой площадь контакта этих объектов может изменяться в процессе деформирования.

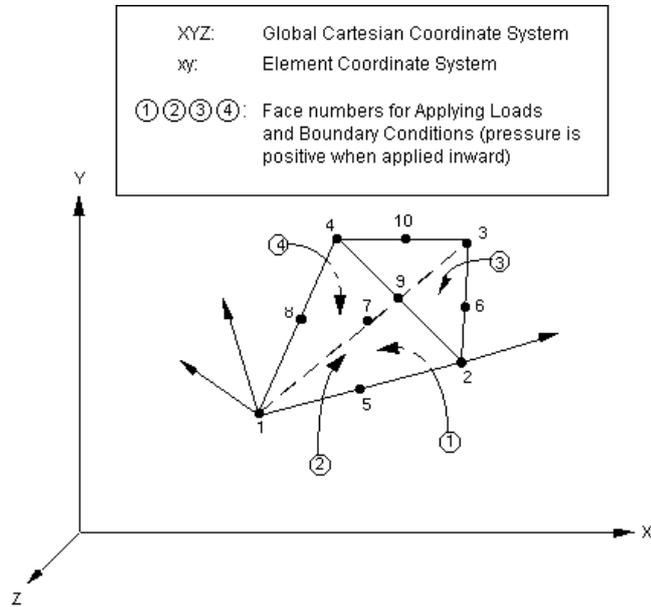


Рис. 3. Тетраэдральный конечный элемент, используемый при расчетах напряженно-деформированного состояния, возникающего в процессе инерционно-импульсной обработки

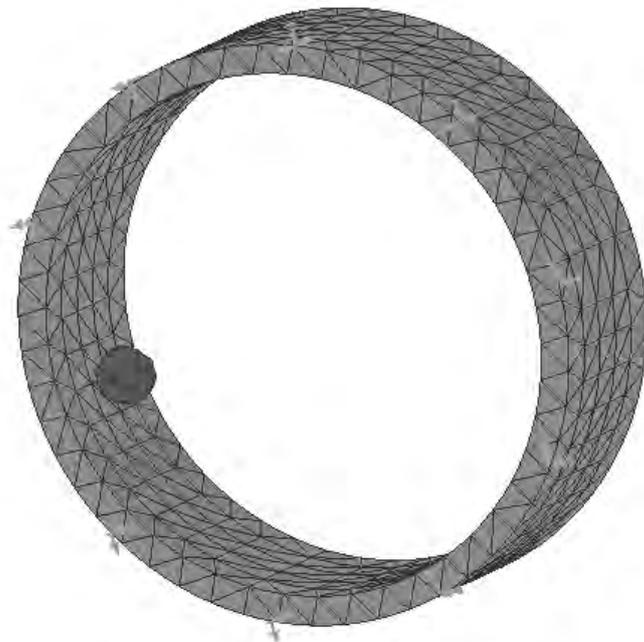


Рис. 4. Конечно-элементная модель взаимодействия при обработке внутренней поверхности заготовки



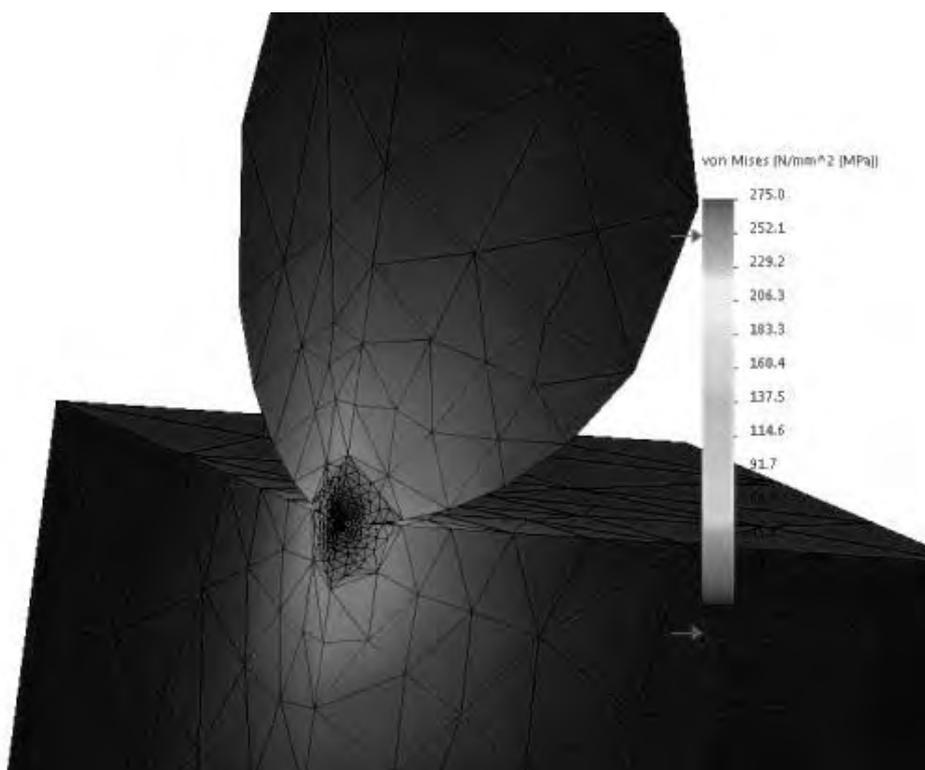


Рис. 5. Модель упругопластического удара в среде SolidWorks

### Результаты моделирования

В результате моделирования установлено, что модель дает возможность получить луночный микрорельеф поверхности, совпадающий с результатами, наблюдаемыми при обработке. Моделирование также дает возможность получить зависимости параметров этого рельефа от режимов обработки.

Так, для определения размеров и формы лунки, получаемой после моделирования удара, задавались следующие параметры:

- материал заготовки – сталь 45 в состоянии поставки (твердость 179 НВ);
- материал деформирующего шара – закаленная сталь ШХ15 (твердость 63...67 HRC);
- диаметр шара – 10 мм;
- скорость шара в момент нанесения удара – 3 м/с.

В результате моделирования определены особенности перемещения ма-

териала обрабатываемой поверхности в зоне, прилегающей к точке нанесения удара (рис. 6).

Из рисунка видно, что полученная форма лунки имеет кратерообразную форму с наплывами по краям и некоторой выпуклостью на дне.

Аналогично можно установить изменение размеров и формы лунки в зависимости от изменения размера деформирующего шара. Так, на рис. 7 представлены графики, иллюстрирующие профиль лунки для диаметров деформирующего шара от 5 до 15 мм при его скорости в момент нанесения удара 2 м/с.

Из графиков видно, что при увеличении диаметра шара диаметр лунки и её глубина существенно возрастают.

На рис. 8 представлены графики, отражающие изменение размера и формы лунки при варьировании скорости шара в момент удара при постоянном его диаметре, равном 10 мм.



Рис. 6. Размеры и форма лунки



Рис. 7. Изменение размера профиля лунки при варьировании диаметра шара

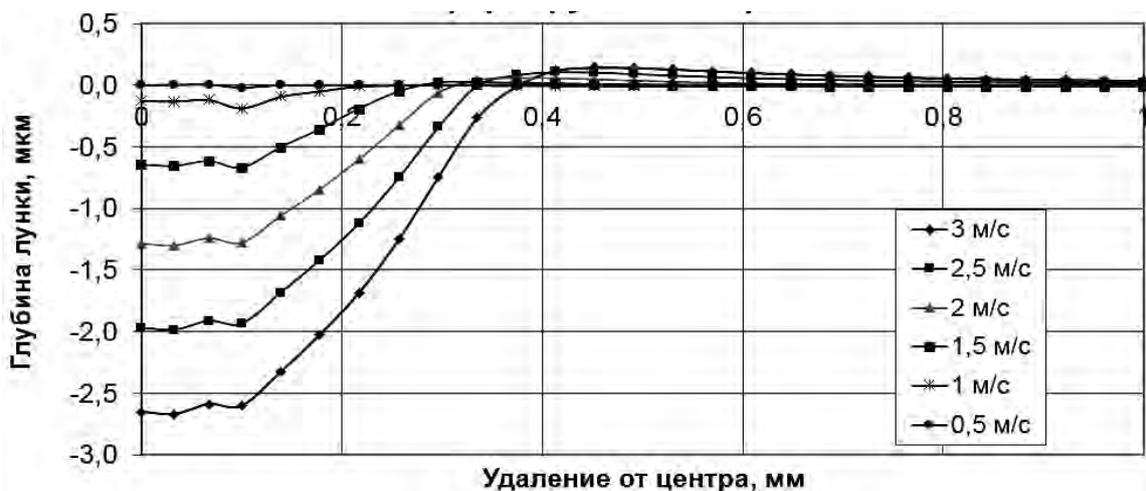


Рис. 8. Изменение размера следа при варьировании скорости шара

Из графиков видно, что при увеличении скорости шара в момент удара диаметр лунки и её глубина существенно возрастают.

На основе полученных данных (см. рис. 7 и 8) можно построить соответствующие зависимости глубины и диаметра лунки от диаметра шара (рис. 9 и 10) и скорости шара в момент удара (рис. 11 и 12) соответственно.

Из полученных графиков видно, что зависимость глубины от диаметра

шара может быть приближена к квадратической зависимости, описываемой линией тренда с уравнением  $y = 0,0049x^2 + 0,0893x - 0,0199$  с коэффициентами детерминации  $R^2$ , равными 0,9954. В то же время зависимость диаметра лунки от диаметра шара имеет линейный характер и хорошо согласуется с линией тренда, имеющей уравнение  $y = 0,063x$  с коэффициентами детерминации  $R^2 = 0,9927$ , что свидетельствует о высокой достоверности.

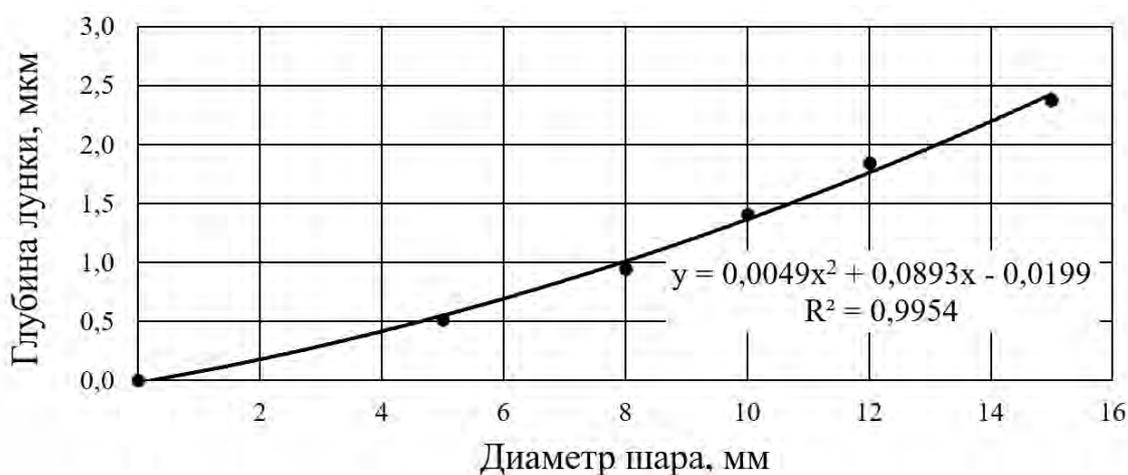


Рис. 9. Зависимость глубины лунки от диаметра шара

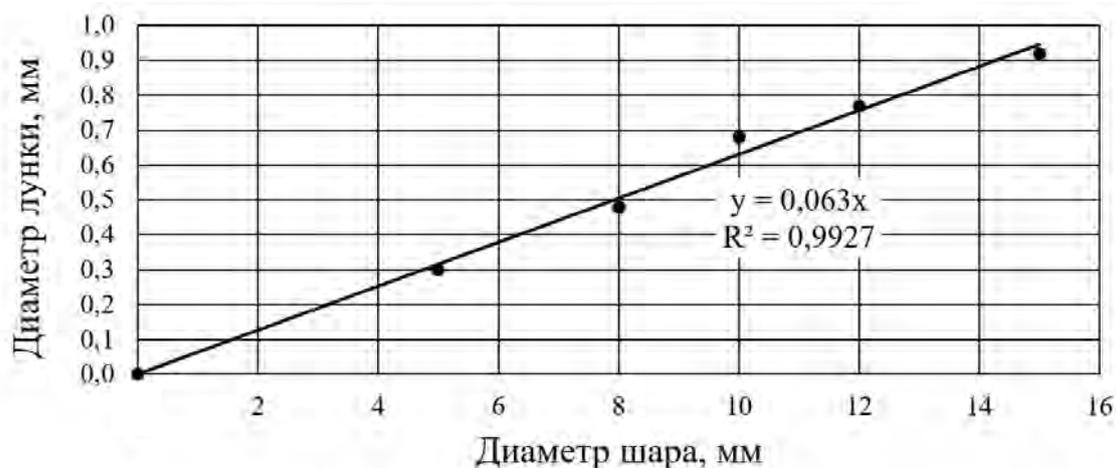


Рис. 10. Зависимость диаметра лунки от диаметра шара

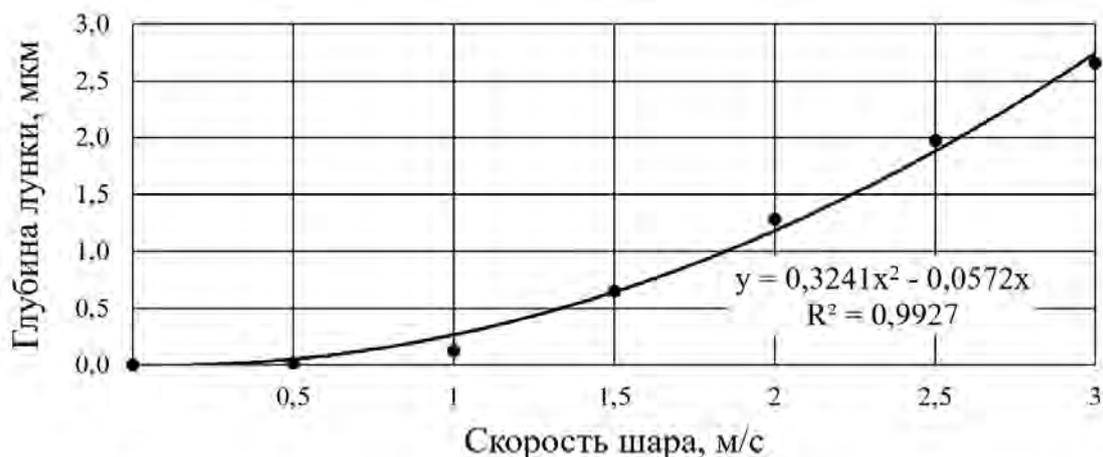


Рис. 11. Зависимость глубины лунки от скорости шара



Рис. 12. Зависимость диаметра лунки от скорости шара

Полученный график согласуется с квадратической зависимостью линии тренда, описываемой уравнением  $y = 0,3241x^2 - 0,0572x$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9927$ . Вероятно, такая зависимость имеет место в связи с тем, что кинетическая энергия, влияющая на эффективность удара шара, пропорциональна квадрату его скорости:

$$E_k = \frac{mV^2}{2}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса;  $V$  – скорость.

Данный график имеет нелинейный характер, приближающийся к кривой с насыщением. Одна из возможных линий тренда в данном случае описы-

вается уравнением  $y = -0,0981x^2 + 0,5188x + 0,0308$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9734$ .

При определении диаметра лунки (см. рис. 10 и 12) за диаметральный размер принималось удвоенное расстояние от точки нанесения удара до ближайшего пересечения профиля лунки с исходным уровнем обрабатываемой поверхности (см. рис. 7 и 8).

На основе полученных зависимостей изменения размера профиля лунки от диаметра шара и его скорости (см. рис. 7 и 8) можно спрогнозировать шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$ . Его расчет ведется по формуле



$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}|, \quad (2)$$

где  $y_i$  – расстояние от текущей точки до средней линии профиля;  $\bar{y}$  – среднее значение по всем точкам профиля;  $n$  – количество точек.

При расчете параметра  $Ra$  в рассмотрение принимались только значения от точки нанесения удара до ближайшего пересечения профиля лунки с

исходным уровнем обрабатываемой поверхности, после которого условно перемещение материала отсутствует.

Так, например, для диаметра шара 5 мм (см. рис. 7) полупрофиль лунки описывается пятью точками и параметр  $Ra$  в этом случае будет равняться 0,21 мкм.

Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от диаметра шара имеет следующий вид (рис. 13).

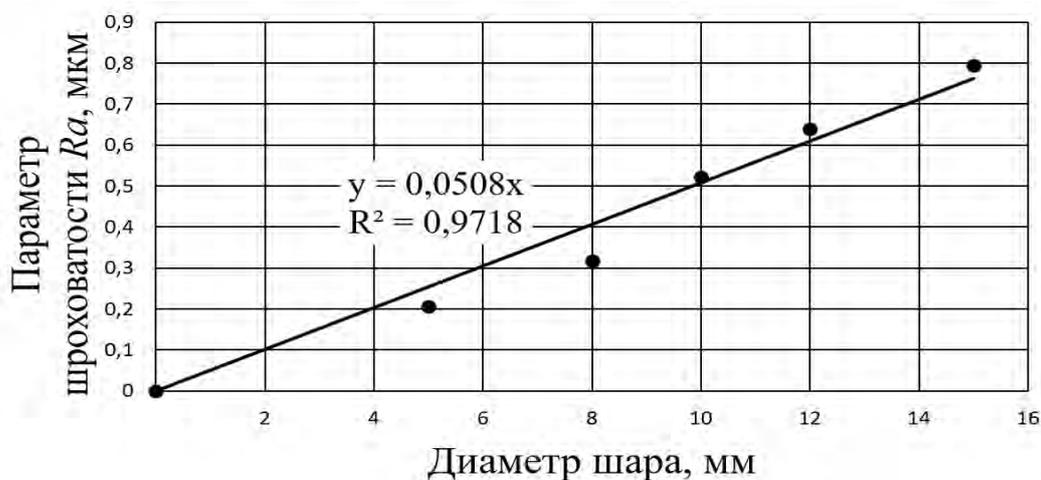


Рис. 13. Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от размера деформирующего элемента

Из полученного графика видно, что зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от диаметра шара имеет линейный характер. При этом линия тренда описывается уравнением  $y = 0,0508x$  с коэффициентами детерминации  $R^2$ , равными 0,9718.

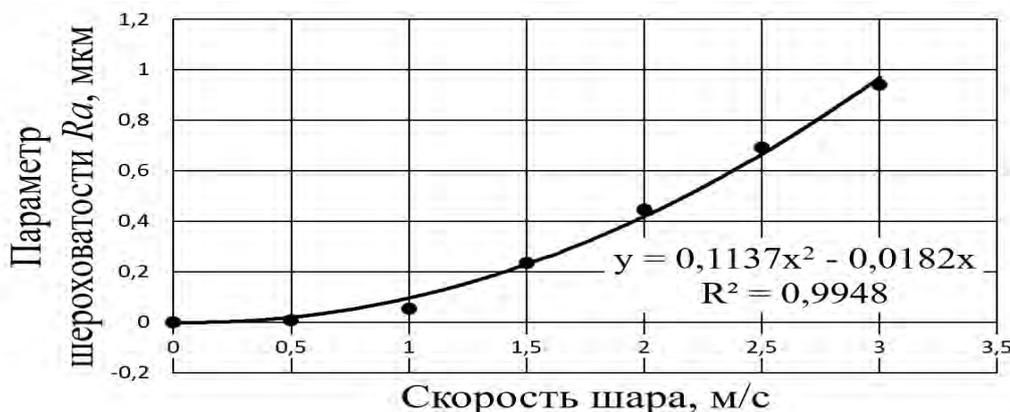
Аналогичным образом можно получить зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от скорости шара в момент нанесения удара при его постоянном диаметре 10 мм (рис. 14).

Полученный график имеет степенную форму. Такая зависимость, вероятно, имеет место в связи с тем, что скорость шара входит в выражение для кинетической энергии, влияющей на эффективность удара шара, в квадрате.

Нужно отметить, что стремление параметра шероховатости  $Ra$  расти на двух последних графиках при увеличении диаметра шара и его скорости связано с тем, что в модели не учитывается исходная шероховатость обрабатываемой поверхности и, соответственно, она принята идеально гладкой.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования результатов обработки поверхности. При увеличении размера следа, оставляемого деформирующим элементом, можно увеличивать подачу инструмента для поверхностно-пластического деформирования, а соответственно, и повышать производительность обработки.



Рис. 14. Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от скорости деформирующего элемента

### Выводы

1. Полученная модель упруго-пластического удара позволяет прогнозировать размеры и форму лунок, образующихся от ударов деформирующих элементов, а также устанавливать общий вид зависимости размеров следов от скорости деформирующего шара и его диаметра.

2. Установлено, что зависимость глубины лунки и ее размера от диаметра производящего ее шара имеет вид, близкий к линейному. Зависимость глубины лунки и ее размера от скорости шара имеет нелинейный вид. Это позволяет использовать полученные зависимости для прогнозирования формы микрорельефа поверхности после обработки, а также параметров ее шероховатости.

3. Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от диаметра шара имеет линейный характер, а от его скорости – показательный, что приводит к ограничениям применимости данного метода ППД при жестких требованиях к шероховатости поверхности, а также к назначению режимов обработки (подачи инструмента, частоты вращения заготовки).

4. Очевидно, что при заданных условиях шероховатость не может быть ниже предельных величин, представленных на рис. 14. Таким образом, при требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности ниже предельных величин необходимо подбирать менее форсированные режимы обработки, при которых шероховатость будет снижена.

Статья сдана в редакцию 20 сентября 2019 года

**Виталий Викторович Афаневич**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-45-38-58. E-mail: vitas-ik@tut.by.

**Виктор Михайлович Пашкевич**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-67-10-18. E-mail: pvm@bk.ru.

**Виктор Александрович Попковский**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-291-58-24-19.

**Vitaly Viktorovich Afanevich**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-45-38-58. E-mail: vitas-ik@tut.by.

**Viktor Mikhailovich Pashkevich**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-293-67-10-18. E-mail: pvm@bk.ru.

**Viktor Aleksandrovich Popkovsky**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-291-58-24-19.

