

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_76

УДК 621.787.6

В. М. ПАШКЕВИЧ, д-р техн. наук, проф.

В. А. ПОПКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц.

В. В. АФАНЕВИЧ

А. В. ТЮРИНА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКЛЕПА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УПРАВЛЯЕМОЙ ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Аннотация

Представлены результаты моделирования упругопластического удара деформирующего шара по обрабатываемой поверхности при инерционно-импульсной обработке. В качестве материала деформирующего шара использована закаленная сталь ШХ15, в качестве обрабатываемого материала – специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом. Даны рекомендации по использованию режимов инерционно-импульсной обработки.

Ключевые слова:

поверхностно-пластическое деформирование, инерционно-импульсная обработка, высокопрочный чугун, конечно-элементное моделирование, остаточные напряжения, следы от деформирующих элементов.

Для цитирования:

Моделирование процесса наклепа поверхности при управляемой инерционно-импульсной обработке изделий из высокопрочного чугуна / В. М. Пашкевич, В. А. Попковский, В. В. Афаневич, А. В. Тюрина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 76–84.

Введение

Для отделочно-упрочняющей обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей, изготавливаемых из высокопрочного чугуна, используются различные способы. Кроме снижения шероховатости, они создают наклеп поверхности, обеспечивающий повышение ее износостойкости. Одним из распространенных способов является, например, дробеструйная обработка. Наряду с простотой реализации, ей свойственны и недостатки, среди которых – слабая управляемость процесса, необходимость использования системы рекуперации абразива, наличие специальной камеры. Альтернативу дробеструйной может составить инерционно-импульсная обработка (ИИО), которая лишена указанных недостатков. Главным преимуществом ИИО является

возможность обеспечения управляемости технологического процесса как за счет обеспечения частично регулярного микрорельефа поверхности, так и за счет получения требуемых характеристик упрочнения. Используемый инструмент может применяться с металлорежущим оборудованием широко распространенных групп – токарной, сверлильной, фрезерной.

На рис. 1 представлен чертеж инструмента для ИИО цилиндрических отверстий. При использовании представленного инструмента вращение от обрабатываемой заготовки передается через цангу 9 с фрикционными кольцами 10 на торцовый шаровой редуктор, включающий ведущее 5 и ведомое звено 4, которое одновременно является опорным элементом для деформирующих шаров 3. Опорный элемент, взаимодействуя с диском 2 с радиальными

пазами, приводит в движение деформирующие шары, которые, таким образом, движутся в радиальном направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, и наносят по ней удары. При этом изменение частоты вращения заготовки приводит к изменению скорости движения деформирующих шаров в направлении обрабатываемой поверх-

ности в момент совершения удара по ней. Изменение подачи инструмента в осевом направлении позволяет покрывать всю обрабатываемую поверхность следами от ударов деформирующих шаров, при этом совокупность таких следов имеет регулярные или частично регулярные характеристики.

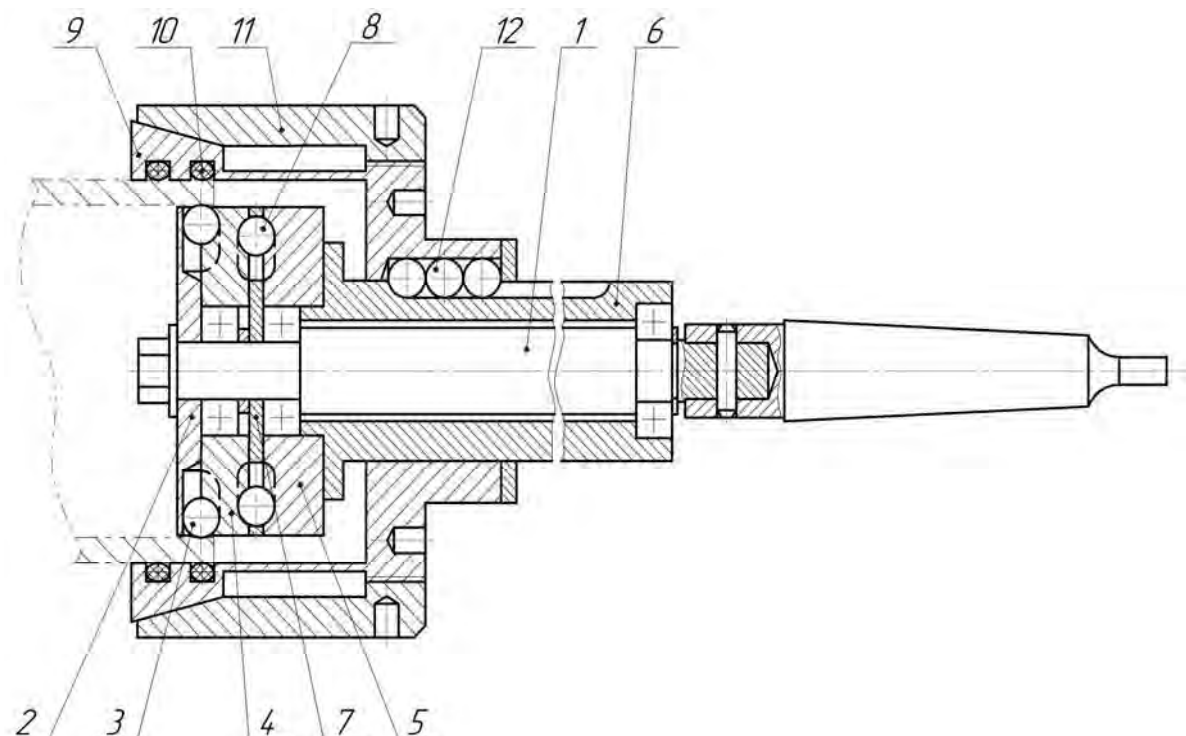


Рис. 1. Инерционно-импульсный раскатчик отверстий

Для исследования процесса ИИО требуется создание компьютерной модели, имитирующей удар шара по обрабатываемой поверхности. Построению такой модели и изучению характеристик процесса ИИО посвящена представленная работа.

Моделирование процесса наклена поверхности при инерционно-импульсной обработке

Цель работы – построение компьютерной модели и численное исследование процесса инерционно-импульс-

ной обработки цилиндрических отверстий в изделиях из высокопрочного чугуна.

Методами исследования являются численные методы (в том числе метод конечных элементов, реализованный в среде SolidWorks), а также методы аппроксимации численных данных.

В среде SolidWorks с использованием метода конечных элементов была разработана модель упругопластического удара деформирующего шара по обрабатываемой поверхности.

Объектами моделирования являлись: обрабатываемая поверхность из

специального высокопрочного чугуна, близкого по характеристикам к чугуну ВЧ60 (ГОСТ 7293–85) с шаровидным графитом; деформирующие шары диаметром 10 мм, выполненные из закаленной конструкционной подшипниковой стали ШХ15 (ГОСТ 801–78).

С точки зрения механики твердого деформируемого тела основные трудности вызывает тот факт, что при моделировании необходимо учитывать различного рода нелинейности. Они связаны как с учетом физической нелинейности, вызванной упругопластическим деформированием обрабатываемого материала, так и с геометрической нелинейностью, выраженной в изменении площади контакта в процессе соударения шара с обрабатываемой поверхностью. Учет в модели таких нелинейностей приводит к значительному увеличению времени вычислений из-за использования итерационных алгоритмов и усложняет процесс обеспечения сходимости результа-

тов расчета к реальным данным.

Для упрощения модели и уменьшения времени вычислений был применен принцип, сформулированный Сен-Венаном 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 приложения. 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. 2 показана ее реализация в среде SolidWorks.

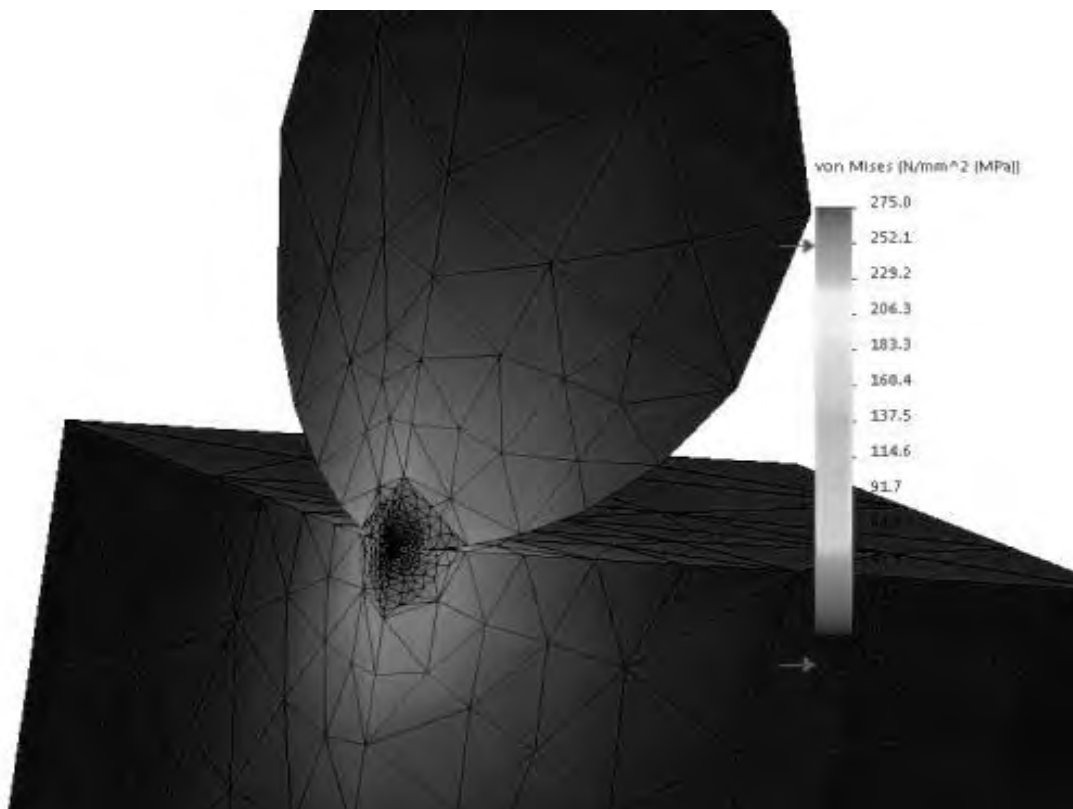


Рис. 2. Модель упругопластического удара в среде SolidWorks

Из рисунка видно, что площадь обрабатываемой поверхности многократно превышает площадь пятна контакта двух объектов. Данное обстоятельство позволяет исключить влияние краевого эффекта на напряженно-деформированное состояние обрабатываемой поверхности.

Кроме того, на рис. 2 можно видеть, что в данной конечно-элементной модели имеет место неравномерная сетка разбиения на конечные элементы со значительным их измельчением в зоне пятна контакта объектов (линейный размер самого крупного элемента более чем в 20 раз превосходит размер наибо-

лее мелкого). Этого удалось достичь посредством выделения малого объема на шаре и пластине в зоне контакта. Необходимость такого измельчения объясняется тем, что в зоне контакта отмечаются значительные градиенты напряжений, адекватное описание которых предполагает мелкую сетку элементов. В этой области были использованы конечные элементы, ребра которых не превышали 0,05 мм.

В качестве конечных элементов использовались тетраэдральные десятиузловые элементы повышенной точности (рис. 3).

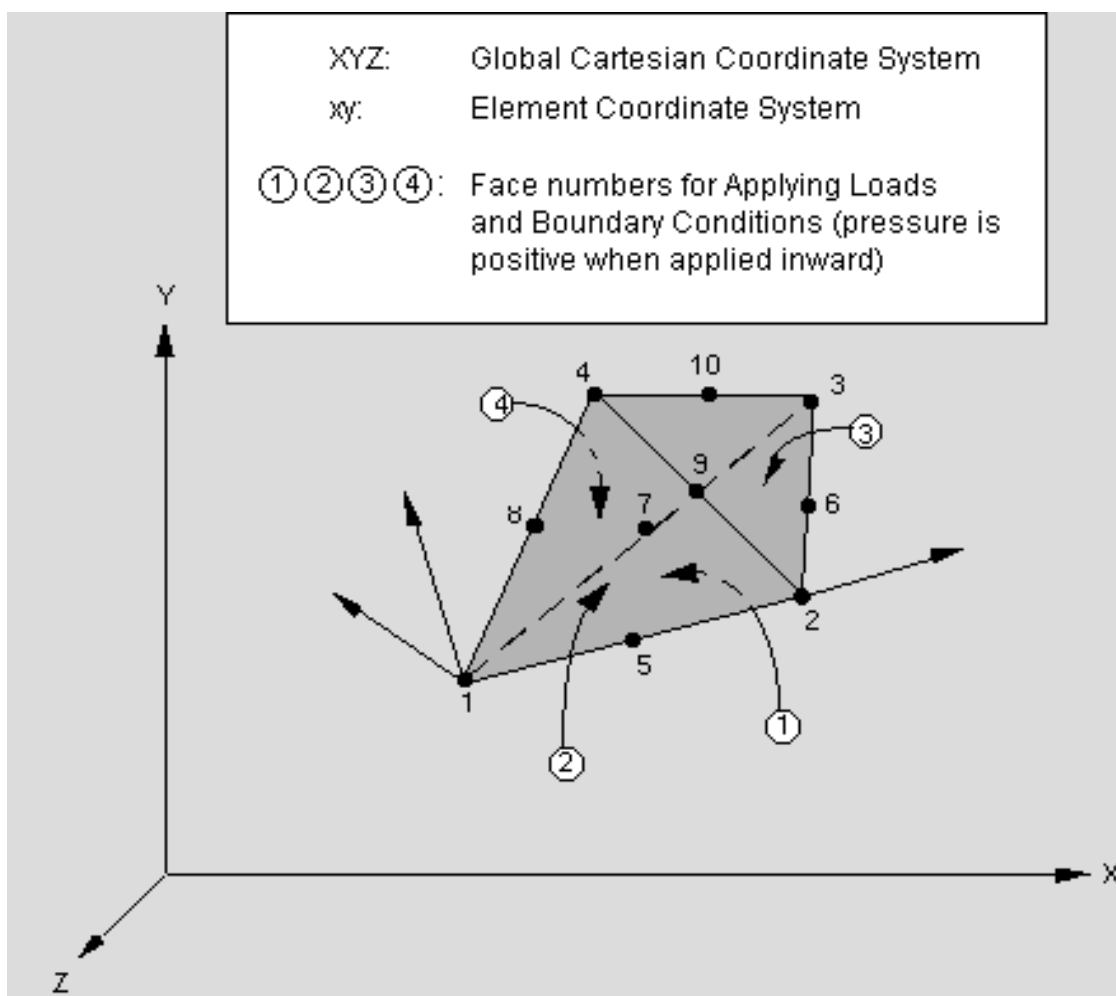


Рис. 3. Тетраэдральный конечный элемент, используемый при расчетах напряженно-деформированного состояния, возникающего в процессе инерционно-импульсной обработки

В модели варьируется скорость движения деформирующего шара в момент нанесения удара по обрабатываемой поверхности.

При моделировании исследовались перемещения материала обрабатываемой поверхности, а также остаточные напряжения, возникающие в ней.

При моделировании принято, что шероховатость шара и обрабатываемой поверхности, а также погрешности их формы и расположения отсутствуют. Принято, что удар наносится в направлении, строго перпендикулярном обрабатываемой поверхности; обрабатываемая поверхность в точке контакта условно плоская. При моделировании по обрабатываемой поверхности наносится единичный удар, возможные повторные

удары при этом не рассматриваются.

Перед началом расчетов численным путем проводилось определение периода взаимодействия деформирующего шара и обрабатываемой поверхности (от момента соприкосновения шара с поверхностью до ее восстановления и стабилизации выходных параметров модели). Для большинства численных экспериментов это время принималось равным $6 \cdot 10^{-6}$ с.

В результате моделирования было установлено, что след от удара деформирующего шара по поверхности имеет форму кратерообразной лунки (рис. 4) (увеличение по вертикальной оси – 100 раз), что хорошо согласуется с данными экспериментов.

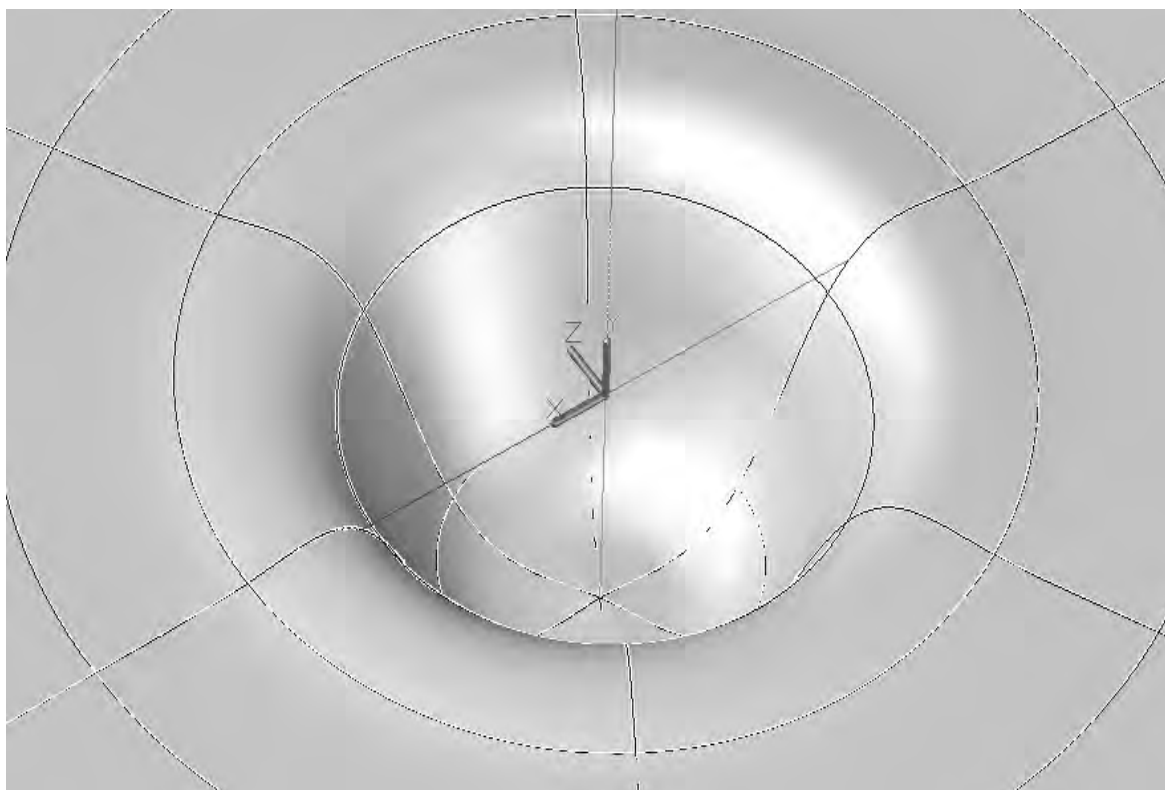


Рис. 4. След от деформирующего шара

Из рисунка видно, что после нанесения удара деформирующим шаром по обрабатываемой поверхности происходят несколько явлений формообразова-

ния нового микрорельефа.

Во-первых, в средней области следа деформирующего шара (лунке) происходит течение материала и последу-

ющее восстановление поверхности с образованием большей или меньшей пучности. Величина пучности особенно заметна у пластичных материалов (сталь) и в меньшей степени у чугунов (в последнем случае она относительно выше при слабых ударах).

Во-вторых, материал из лунки выдавливается в периферийные области, что приводит к образованию на обрабатываемой поверхности пучности в форме кольцеобразного валика, наружные склоны которого асимптотически стремятся к уровню исходной поверхности.

В-третьих, в реальных условиях при сочетании удара шара в радиальном направлении с вращением обрабатываемой заготовки в тангенциальном след

удара «размазывается», происходит частичное выглаживание поверхности, а форма лунки приобретает эллипсоидную, вытянутую форму.

Сочетание трех описанных явлений приводит к тому, что форма микро рельефа обработанной поверхности представляет собой совокупность кратерообразных областей.

После ИИО величина остаточных напряжений по глубине обрабатываемой заготовки характеризуется нелинейной зависимостью (рис. 5), а при заметном удалении от обрабатываемой поверхности эта величина стремится к нулю. По этой причине оценка глубины (пределов) упрочненного слоя вызывает определенные сложности.



Рис. 5. Распределение остаточных напряжений по глубине материала под местом нанесения удара: материал деформирующего шара – ШХ15; материал заготовки – высокопрочный чугун; диаметр шара – 10 мм; скорость шара – 1,5 м/с

Для практических целей можно предложить следующий оценочный критерий.

Под глубиной наклепа будем понимать глубину, на которой остаточные напряжения превышают их максимально допустимую величину для материала в состоянии поставки. Для стабилизированных изделий из пластичных высокопрочных чугунов остаточные напряже-

ния не должны превышать 20 %...40 % предела их текучести. Так, например, для чугуна марки ВЧ60 предел текучести σ_t составляет 370 МПа. Для таких материалов в качестве максимально допустимого значения остаточных напряжений принята величина, равная 30 % предела текучести, т. е. 111 МПа.

Полученная в результате моделирования зависимость глубины проник-

новения остаточных напряжений вглубь материала от скорости деформирующе-

го шара в момент нанесения удара по поверхности представлена на рис. 6.

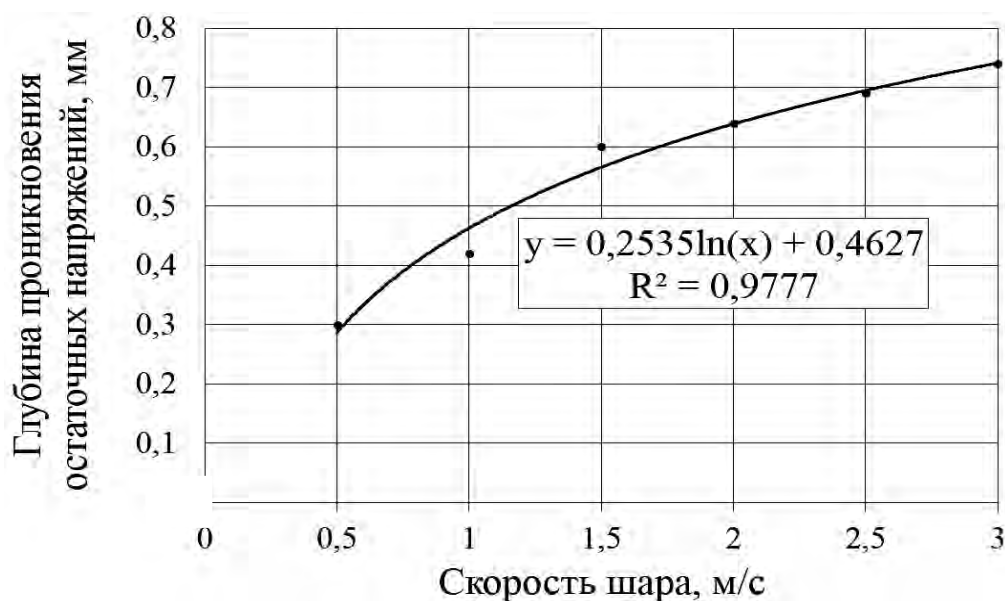


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения остаточных напряжений от скорости деформирующего шара

Остаточные напряжения наклепа при этом располагаются в подповерхностном слое как на склонах лунки следа, так и на склонах валика следа.

При этом наибольшие значения остаточных напряжений, как показывают результаты моделирования, наблюдаются как в области лунки следа, предшествующей ее переходу к валику (подповерхностный микрорельеф), так и в области самого валика (надповерхностный микрорельеф). Также остаточные напряжения имеют заметную величину в областях за пределами следа, под примыкающей к валику исходной поверхностью заготовки, особенно при больших скоростях удара. Данный результат иллюстрирует совмещенный график, на котором представлена зависимость расположения остаточных напряжений на обрабатываемой поверхности по мере удаления от точки удара (рис. 7).

Из рисунка видно, что остаточные напряжения на обработанной поверхно-

сти по мере удаления от точки нанесения удара уменьшаются и характер этих изменений сохраняется при различных скоростях деформирующего шара.

По нашему мнению, оценить размеры области наклепа на поверхности возможно, если образованный микрорельеф поверхности рассматривать с точки зрения его будущего контакта с сопряженной поверхностью. Очевидно, что этот контакт будет происходить в основном в области валика и на начальном этапе приработки поверхностей трения не будет затрагивать область лунки. Радиус этой области соответствует переходу величины остаточных напряжений к значениям, меньшим максимально допустимой величины для материала в состоянии поставки (в качестве границы остаточных напряжений, как и ранее, была принята величина 111 МПа).

Очевидно, что остаточные напряжения со значениями, превышающими эту величину, располагаются в области,

имеющей форму кольца. На рис. 8 представлена полученная в результате моде-

лирования зависимость ширины такой области от скорости шара.



Рис. 7. Зависимость расположения остаточных напряжений на обрабатываемой поверхности по мере удаления от точки удара, наложенная на полупрофиль лунки

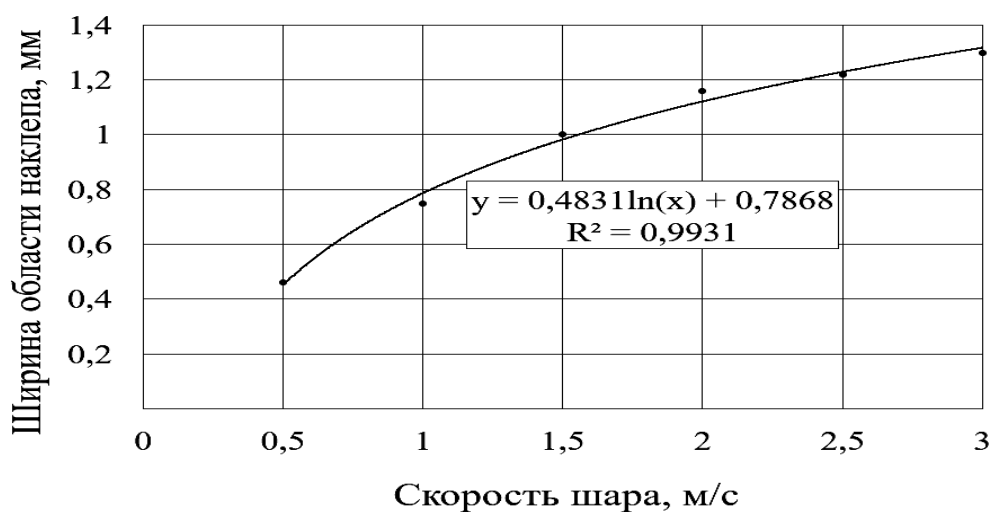


Рис. 8. Зависимость ширины области наклепа с остаточными напряжениями от скорости шара

Как видно из графика, зависимость носит нелинейный характер и стремится к некоторому насыщению. Также очевидно, что значительное увеличение скорости удара не приводит к заметному возрастанию ширины области наклепа, что позволяет рекомендовать для ИИО режимы обработки, обеспечивающие скорость шара в преде-

лах 1...3 м/с. Данные результаты согласуются с экспериментальными данными. Однако отметим, что приведенные рекомендации справедливы лишь в части обеспечения заданной величины наклепа поверхности и не учитывают требуемого снижения шероховатости поверхности.

Выводы и обсуждение результатов

1. В результате выполнения численного моделирования подтверждена гипотеза о возможности управления процессом упрочнения высокопрочных чугунов на основе ИИО.

2. Управление процессом ИИО можно осуществлять за счет изменения частоты вращения заготовки, приводящей к изменению скорости деформирующего шара. Изменение подачи инструмента в осевом направлении влияет

на плотность покрытия поверхности следами обработки.

3. Для реализации ИИО рекомендуется использовать режимы, обеспечивающие скорость шара в момент удара в интервале 1...3 м/с, которые приводят к возникновению остаточных напряжений, достигающих величин 250...300 МПа, до глубины 0,4...0,75 мм. Остаточные напряжения на поверхности заготовки локализуются в областях диаметром до 0,8...1,3 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инерционно-импульсный раскатчик: пат. ВУ 12381 / В. М. Пашкевич, В. В. Афаневич. – Опубл. 30.08.2020.
2. **Афаневич, В. В.** Моделирование процесса формирования микрорельефа поверхности при инерционно-импульсной обработке / В. В. Афаневич, В. М. Пашкевич, В. А. Попковский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 4 (65). – С. 5–14.
3. **Пашкевич, В. М.** Управляемое инерционно-импульсное раскатывание внутренних цилиндрических поверхностей / В. М. Пашкевич, В. В. Афаневич, К. А. Максимов // Машиностроение и металлообработка: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев – Бобруйск, 10–11 окт. 2019 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 48.
4. **Pashkevich, V.** Simulation of micro- and macro-relief topography surfaces during inertial impact treatment / V. Pashkevich, V. Afanevich, V. Popkovsky // Polish journal of science. – 2020. – Vol. 1, № 33. – С. 29–36.

Статья сдана в редакцию 13 июля 2023 года

Контакты:

rvm@bk.ru (Пашкевич Виктор Михайлович);
viktorpopkovski@mail.ru (Попковский Виктор Александрович);
vitas-ik@tut.by (Афаневич Виталий Викторович);
angelina.turina.01@mail.ru (Тюрина Ангелина Викторовна).

V. M. PASHKEVICH, V. A. POPKOVSKY, V. V. AFANEVICH, A. V. TYURINA

MODELING THE PROCESS OF SURFACE HARDENING DURING CONTROLLED INERTIAL PULSE PROCESSING OF HIGH STRENGTH CAST IRON PRODUCTS

Abstract

The paper presents results of modeling the elastic-plastic shock of a deforming ball on a processed surface during inertial pulse processing. Hardened steel SHX15 was used as the material of the deforming ball, and special high strength cast iron with nodular graphite was used as the material to be processed. Recommendations on the use of inertial pulse processing modes are given.

Keywords:

surface plastic deformation, inertial pulse processing, high strength cast iron, finite element modeling, residual stresses, traces of deforming elements.

For citation:

Modeling the process of surface hardening during controlled inertial pulse processing of high strength cast iron products / V. M. Pashkevich, V. A. Popkovsky, V. V. Afanevich, A. V. Tyurina // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 76–84.