

## ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.787.4

DOI: 10.18324/2077-5415-2024-3-7-14

## Влияние основных параметров деформирования на остаточные напряжения при упрочнении плоской поверхности шариком

С.А. Зайдес<sup>a</sup>, А.С. Пятовский<sup>b</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>a</sup> zsa@istu.edu, <sup>b</sup> pyatovskii\_a@mail.ru<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0002-8907-4681>

Статья поступила 06.08.2024, принята 17.09.2024

Целью данной работы является определение влияния основных параметров деформирования на остаточные напряжения при упрочняющей обработке плоской поверхности шариком, используя метод конечно-элементного анализа. В работе реализована конечно-элементная модель взаимодействия деформирующего элемента — шарика с упругопластическим полупространством при многопроходной обработке плоской поверхности. В качестве основных параметров деформирования приняты диаметр шарика и рабочее прижимное усилие. Для описания упругопластических характеристик материала использована кривая упрочнения, построенная по экспериментальным данным испытаний образцов из стали 45 на разрывной машине. На основании разработанной модели определена величина компонентов тензора  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$ , а также интенсивности  $\sigma_i$  остаточных напряжений и глубина их залегания в поверхностном слое при обработке шариком диаметром 4 мм с изменением рабочего усилия в диапазоне от 50 до 120 Н. Для определения характера изменений остаточных напряжений при изменении диаметра деформирующего элемента был произведен анализ для диаметров 6 и 8 мм. По результатам моделирования отмечено влияние каждого последующего прохода на напряженно деформированное состояние в поверхностном слое детали, сформированное предыдущим проходом. Получена зависимость изменения величины интенсивности остаточных напряжений и глубины их распространения при разной величине нагружения для шариков с диаметрами 4; 6 и 8 мм. Результаты исследования подтверждают практическую значимость применения метода конечных элементов при прогнозировании остаточных напряжений с целью подбора оптимальных параметров упрочняющей обработки плоских поверхностей шариком.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения; плоская поверхность; напряженно-деформированное состояние; конечно-элементное моделирование; поверхностный слой; обкатка шариком.

, and , as well as the intensity of residual stresses and the depth of their occurrence in the surface layer during processing with a ball with a diameter of 4 mm with a change in the working force in the range from 50 to 120 N. To determine the nature of changes in res

## The effect of the main deformation parameters on residual stresses during hardening of a flat surface with a ball

S.A. Zaides<sup>a</sup>, A.S. Pyatovskii<sup>b</sup>

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup> zsa@istu.edu, <sup>b</sup> pyatovskii\_a@mail.ru<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0002-8907-4681>

Received 06.08.2024, accepted 17.09.2024

The purpose of this work is to determine the effect of the main deformation parameters on residual stresses during the hardening treatment of a flat surface with a ball using the method of finite element analysis. The paper implements a finite element model of the interaction of a deforming ball element with an elastoplastic half-space during multi-pass processing of a flat surface. The ball diameter and the working clamping force are accepted as the main deformation parameters. To describe the elastic-plastic characteristics of the material, a hardening curve is used, based on experimental data from testing samples made of 45 steel on a bursting machine. Based on the developed model, the magnitude of the tensor components  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$ , as well as the intensity  $\sigma_i$  of residual stresses and the depth of their occurrence in the surface layer during processing with a ball with a diameter of 4 mm with a change in the working force in the range from 50 to 120 N are calculated. To determine the nature of changes in residual stresses when the diameter of the deforming element changes, an analysis is performed for diameters of 6 and 8 mm. According to the simulation results, the effect of each subsequent passage on the stress-strain state in the surface layer of the part formed by the previous passage is noted. The dependence of the change in the intensity of residual stresses and the depth of their propagation at different loading values for balls with diameters of 4, 6 and 8 mm is obtained. The results of the study confirm the practical importance of using the finite element method in predicting residual stresses in order to select the optimal parameters of the hardening treatment of flat surfaces with a ball.

**Keywords:** residual stresses; flat surface; stress-strain state; finite element modeling; surface layer; ball rolling.

**Введение.** Надежность работы машин и механизмов непосредственно связана с качеством поверхностного слоя деталей, которые характеризуются их геометрическими и физико-механическими параметрами, такими как шероховатость, твердость, глубина упрочнения, величина остаточных напряжений и др.

На сегодняшний день в машиностроении в качестве заключительных операций механической обработки деталей машин обычно применяют процессы шлифования, хонингования, притирки и доводки, которые позволяют повысить геометрическую точность, снизить шероховатость, придать поверхности эстетические свойства, но при этом не обеспечивают оптимального качества поверхностного слоя [1].

Из известных способов по улучшению качества поверхностного слоя наиболее целесообразно применение отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Отделочно-упрочняющая обработка ППД позволяет получить поверхностный слой, обладающий высокой твердостью, сглаженной формой микронеровностей и наличием остаточных напряжений (ОН) сжатия, которые существенно влияют на усталостную прочность [2] и контактную выносливость деталей машин [3]. Многочисленные исследования показали, что усталостная прочность существенно зависит от величины, знака и глубины распространения ОН в поверхностном слое деталей машин [4–7].

Установлено, что сжимающие остаточные напряжения поверхностного слоя увеличивают предел усталости, а растягивающие — снижают его [8]. Так, технологические ОН растяжения будут накладываться на действующие эксплуатационные напряжения при растяжении и уменьшать их допускаемую величину. Сжимающие ОН наоборот будут увеличивать допускаемые напряжения растяжения при эксплуатации путем их компенсации [9]. Подтверждением этого являются результаты многочисленных экспериментов. Например, применение в качестве упрочняющей операции обкатывания шариком повысило предел выносливости образцов из сплава ВТЗ-1 на 31–34 %, что объясняется формированием в поверхностном слое благоприятных ОН сжатия.

Возможность точного прогнозирования остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) в поверхностном слое позволяет определить оптимальные с точки зрения упрочнения режимы обработки поверхностным пластическим деформированием, при котором величина ОН сжатия будет максимально близка к пределу текучести материала, не допуская перенаклепа.

В современной исследовательской практике существует достаточно большое разнообразие методов определения ОН, таких как тензометрия, оценка деформации после релаксации ОН, путем послойного химического удаления слоев материала с оценкой возникающей деформации, методами дифракции

рентгеновских лучей, микроиндентирования и др. [10–13]. Все они позволяют определить величину ОН в обработанных деталях, однако задачу их прогнозирования решают лишь косвенно. К тому же, почти каждый метод требует разрушения деталей, которые впоследствии уже не могут быть использованы по назначению.

Для решения задачи, по оценке напряженно-деформированного состояния деталей после обработки ППД достаточно хорошо зарекомендовал себя численный метод, который позволяет, не проводя натурных экспериментов, путем моделирования технологического процесса произвести анализ временных (ВН) и ОН при разных параметрах и режимах обработки, что подтверждается работами [14–17].

Большинство известных способов ППД разработано для упрочняющей обработки деталей цилиндрической формы. Однако в технике известно большое разнообразие деталей с плоской рабочей поверхностью, например, ползуны, скользящие, различные направляющие, уплотнительные поверхности клапанов и др., которые также требуют улучшенных качеств поверхностного слоя.

Накатывание плоских поверхностей осуществляется одно- и многошариковым, одно- и многошариковым инструментами при упругом или жестком режимах нагружения [4].

Авторами статьи ведутся работы по созданию многошарикового деформирующего инструмента со сложной кинематикой движения. Чтобы обосновать выбор диаметра шарика и величины силы нагружения, которые бы создавали требуемую степень наклепа и величину остаточных напряжений в деталях с плоской рабочей поверхностью, необходимо выполнить на стадии проектирования обоснование величины соответствующих параметров.

Поэтому целью данной работы является определение по результатам конечно-элементного моделирования влияния основных параметров деформирования на остаточные напряжения при упрочнении шариком плоской поверхности.

**Конечно-элементная модель процесса обкатки плоской поверхности шариком.** При накатывании шариками сила обкатывания и диаметр деформирующего элемента (ДЭ) являются основными параметрами, влияющими на величину и характер распределения временных и остаточных напряжений. При увеличении диаметра шарика увеличивают и силу обкатывания, что в совокупности приводит к росту величины ОН и глубины их залегания в поверхностном слое [4; 18].

Скорость обкатывания практически не оказывает влияния на характеристики поверхностного слоя и ограничивается тепловыми явлениями, допустимым биением инструмента, жесткостью, точностью применяемого оборудования и почти всегда выбирается исходя из условий обеспечения максимальной производительности [4].

В работе была реализована конечно-элементная модель процесса обкатки шариком плоского образца за

три рабочих хода с поперечной подачей  $s = 0,2$  мм (рис. 1). Схема обработки принята «упругой» так как большинство известных устройств для накатки работают в упругом режиме, предполагающем наличие в конструкции упругого элемента в виде тарированной пружины. При «упругой» схеме удельное давление обработки определяется рабочим прижимным усилием, а не припуском на обработку (натягом), как в случае с «жесткой» схемой [1; 18].

Исследование проводилось в программном комплексе *ANSYS Mechanical* при использовании модуля *transient structural*. Параметры материала моделируемого плоского образца были приняты соответствующими стали 45 с физико-механическими характеристиками, указанными в табл. 1.

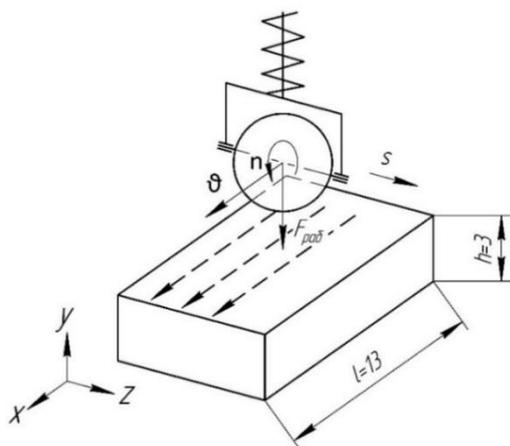


Рис. 1. Схема обкатки шариком плоского образца

Таблица 1. Физико-механические характеристики материала плоского образца (сталь 45)

| Характеристика       | Обозначение | Единицы измерения | Значение       |
|----------------------|-------------|-------------------|----------------|
| Модуль упругости     | E           | МПа               | $2 \cdot 10^5$ |
| Коэффициент Пуассона | $\nu$       |                   | 0,3            |
| Предел текучести     | $\sigma_T$  | МПа               | 492            |

В качестве ДЭ был принят шарик опорного подшипника с физико-механическими характеристиками, соответствующими закаленной стали ШХ15, напряжения и деформации которого не учитывались, т. е. ДЭ принят как абсолютно жесткое тело.

Для задания характеристик упрочнения материала изотропного тела в компьютерной программе *ANSYS Mechanical* предусмотрено несколько способов, но наиболее широко применяемых всего два, это *Bilinear Isotropic Hardening* и *Multilinear Isotropic Hardening* (билинейный и полилинейный). Оба способа включают задание параметров упругости материала и кривой его упрочнения.

Билинейный способ позволяет задать кривую упрочнения в виде ее аппроксимации с начальной

точкой, равной пределу текучести, и углом наклона линии пластического течения.

Полилинейный способ предполагает построение кривой упрочнения по точкам, ограничивая ее пределом текучести и напряжением образования шейки, что делает данный способ более точным так как в данном случае кривая упрочнения имеет характерный для среднеуглеродистой стали нелинейный вид и строится по экспериментальным данным.

В данной работе механические характеристики материала плоского образца определены по кривой упрочнения, полученной путем испытания образцов на разрывной машине с последующим преобразованием значений силы и перемещений в истинные значения напряжений и пластических деформаций (рис. 2). На графике представлены среднеарифметические результаты, полученные после испытания на растяжение трех образцов.

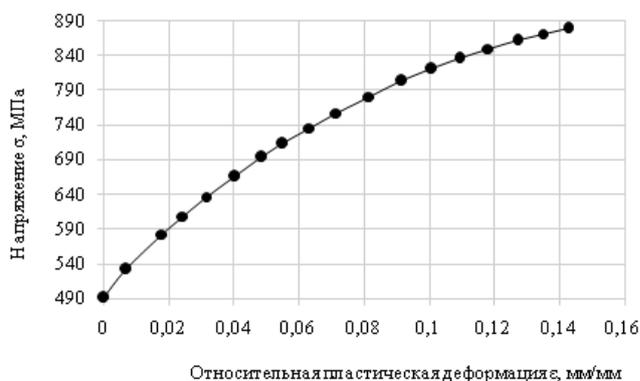


Рис. 2. Кривая упрочнения стали марки 45

В качестве базовых параметров моделируемого процесса обкатки были приняты следующие значения (табл. 2).

Таблица 2. Базовые параметры процесса упрочнения

| Параметр                    | Обозначение      | Единицы измерения | Значение |
|-----------------------------|------------------|-------------------|----------|
| Скорость подачи инструмента | $\vartheta$      | мм/сек            | 2        |
| Рабочее усилие              | $F_{\text{раб}}$ | Н                 | 100      |
| Диаметр шарика              | $d_{\text{ш}}$   | мм                | 4        |
| Толщина плоского образца    | h                | мм                | 3        |
| Коэффициент трения          | $\eta$           |                   | 0,05     |

Для анализа изменений остаточных напряжений величина прижимного усилия и диаметр шарика изменялись в диапазонах:

$$F_{\text{раб}} = 50 \dots 120 \text{ Н и } d_{\text{ш}} = 4,6 \text{ и } 8 \text{ мм.}$$

Тип контакта ДЭ с образцом был принят *Frictional* с коэффициентом трения качения  $\eta = 0,05$ . Фиксация образца производилась по нижней поверхности с исключением всех степеней свободы. Реализация параметров обработки осуществлялось командами:

рабочее усилие — *force*, скорость — *velocity*, перемещение — *displacement*.

Для дискретизации плоского образца наиболее применим метод *Hexa* с формой конечного элемента в виде равностороннего гексаэдра размером граней 0,2 мм и промежуточными узлами. Данный метод позволяет сформировать регулярную структуру конечно-элементной сетки по всему объему образца, а высокая степень интерполяции восьмиузловых элементов дает возможность более точно оценить величину и характер распределения напряжений по глубине поверхностного слоя [19].

Процесс упрочняющей обработки, изображенный на рис. 3, состоял из трех проходов, каждый из которых, в свою очередь, состоял из 6 шагов, описанных ниже.

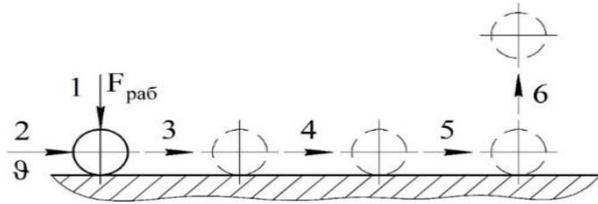


Рис. 3. Пошаговый процесс обкатки плоской поверхности шариком

На первом шаге моделирования шарик неподвижен, к нему прикладывается рабочее усилие  $F_{раб}$ , под действием которого он начинает статично оказывать давление на поверхность образца. На следующем шаге шарик задается скорость  $v$ , приводящая его в движение (качение). На 3-м и 4-м шагах происходит процесс обкатки плоской поверхности шариком за 1 проход с постоянным усилием и скоростью. На 5-м шаге скорость шарика и рабочее усилие стремятся к 0, и по его завершению шарик неподвижно находится в контакте с поверхностью. На заключительном, 6-м шаге шарик перемещается вверх, выходя из контакта с обрабатываемой поверхностью, завершая первый проход. Далее шарик возвращается в исходное положение и смещается на 0,2 мм в направлении поперечной подачи и повторяет описанный выше процесс обработки, таким образом совершая 2-й и 3-й рабочие ходы.

Для замера напряжений был взят ряд точек, лежащих на вертикальной линии, проходящей через тело образца в области 2-го прохода (в середине обработанного участка), построенной с помощью команды *path*. Количество точек на линии равно 120, таким образом, распределение значений ОН по глубине фиксировались с шагом 0,025 мм. Величина ОН определена по завершению процесса обработки, в момент, когда шарик выходит из контакта с поверхностью детали.

**Результаты моделирования и обсуждение.** Как видно на рис. 4, в результате обработки плоской детали шариком в поверхностном слое сформировались ОН.

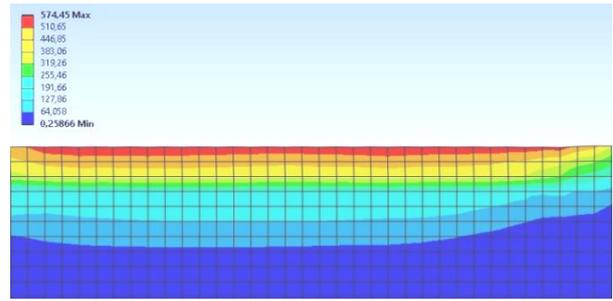


Рис. 4. Изополе распределения интенсивности ОН  $\sigma_i^{OCT}$  по толщине плоского образца после обкатки шариком (при базовых параметрах и режимах обработки)

В основе алгоритма определения значений интенсивности ОН для трехосного напряженного состояния в программном комплексе *Ansys* лежит уравнение фон Мизеса [20; 21]:

$$\sigma_i^{ocm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x^{ocm} - \sigma_y^{ocm})^2 + (\sigma_y^{ocm} - \sigma_z^{ocm})^2 + (\sigma_z^{ocm} - \sigma_x^{ocm})^2}.$$

При многопроходной обработке плоской поверхности шариком с определенным шагом каждый последующий проход оказывает воздействие на НДС в поверхностном слое, сформированное предыдущим проходом.

Так после первого прохода в поверхностном слое формируются остаточные напряжения определенной величины (рис. 5, а), после 2-го прохода величина напряжений в области первого следа возрастает на 28 % (рис. 5, б) за счет накопления пластической деформации. После 3-го прохода значения ОН отличаются незначительно (рис. 5, в), что говорит о стабилизации процесса деформирования.

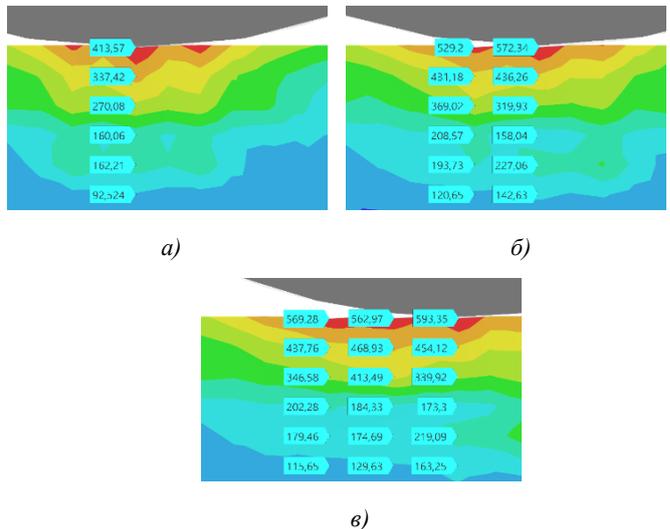
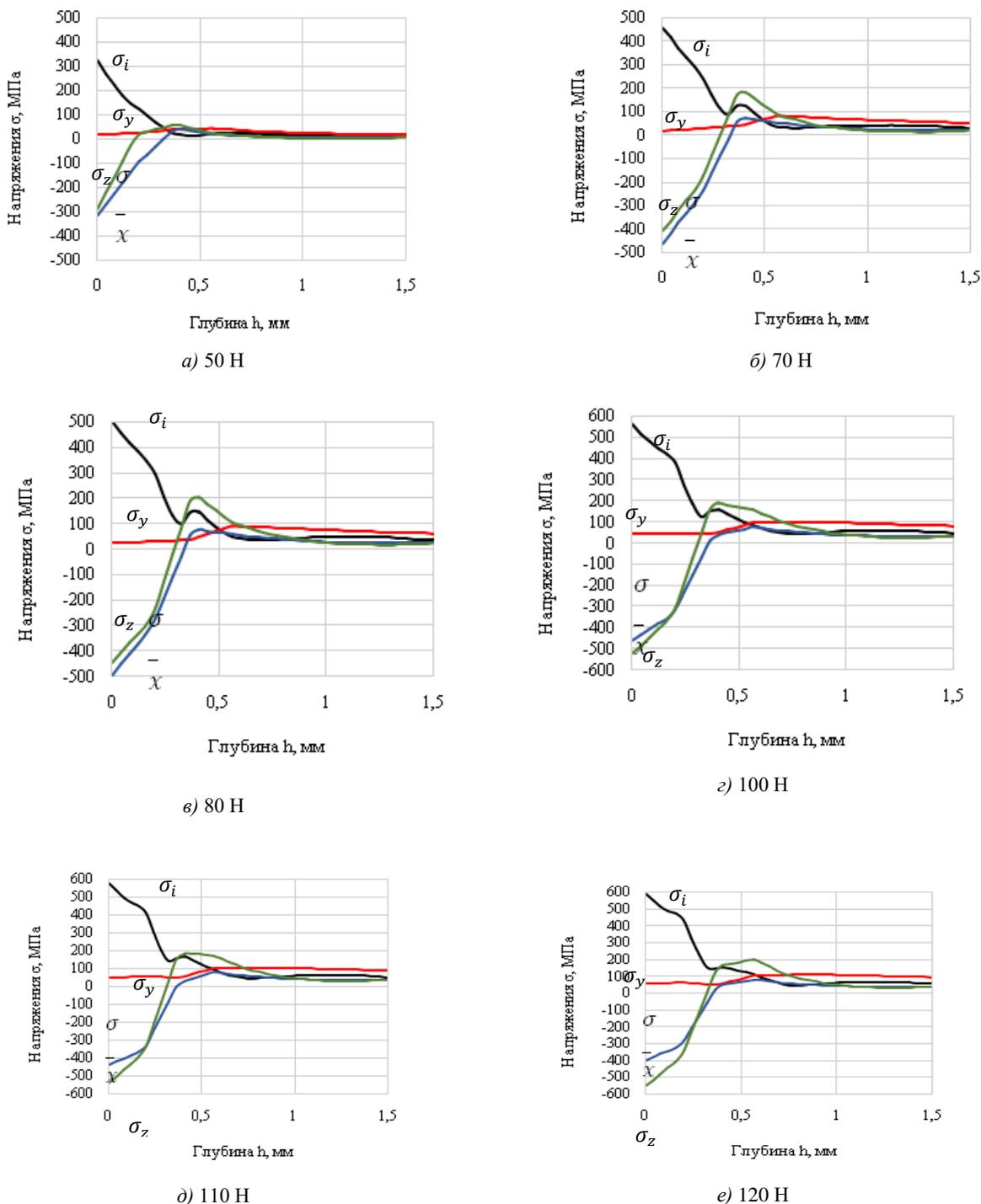


Рис. 5. Значения интенсивности ОН в поверхностном слое плоской детали после: а) первого, б) второго и в) третьего проходов с шагом 0,2 мм (при базовых параметрах и режимах обработки)

На рис. 6 представлены результаты распределения компонентов тензора и интенсивности ОН по глубине плоского образца после обкатки шариком диаметром 4 мм, при диапазоне рабочего усилия от 50 до 120 Н.

На графиках видно, что интенсивность ОН  $\sigma_i^{\text{OCT}}$  с увеличением рабочего усилия имеет стабильный рост так же, как и компоненты тензора остаточных напряжений. Точки экстремума интенсивности ОН  $\sigma_i^{\text{OCT}}$  лежат на поверхности, что говорит об образовании благоприятных напряжений сжатия, повышающих предел выносливости при контактных нагрузках. Дальнейшее повышение силы нагружения приводит к

снижению экстремума интенсивности ОН. По полученным кривым хорошо заметно формирование точек экстремума значений напряжений (скачков) в глубине поверхностного слоя и при дальнейшем увеличении прижимной силы данные точки становятся более выраженными.



**Рис. 6.** Распределение компонент и интенсивности ОН по глубине поверхностного слоя в зависимости от величины усилия деформирования при  $d_{\text{ш}} = 4$  мм

Данное обстоятельство связано с погрешностью численного метода, а именно с применением КЭ в виде гексаэдров, имеющих, кроме угловых узлов, дополнительные узлы интерполяции, расположенные на ребрах. Такие промежуточные узлы в трехмерном случае могут принадлежать не более чем четырем элементам, в то время как угловые могут принадлежать восьми, следовательно, промежуточные узлы усредняют поле перемещений не более чем по четырем элементам, а угловые, соответственно, по восьми элементам. По этой причине эффективность промежуточных узлов при аппроксимации ниже, чем угловых. С усреднением перемещений по элементам, сходящимся в узле конечно-элементной сетки, связано и вычисление напряжений, которые при переходе из элемента в элемент могут изменяться скачком [22].

Стоит отметить, что компонента тензора ОН  $\sigma_y$ , действующая по направлению действия прижимной силы, имеет самое низкое значение и на поверхности существенно не изменяется, его величина при диапазоне рабочего усилия 50–120 Н находится в пределах  $\sigma_y = +20 \dots +55$  МПа, а также всегда имеет знак «+», что говорит о растягивающем характере ОН в данном направлении.

Компоненты  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  показывают более значительную тенденцию к увеличению с ростом рабочего усилия и имеют значения  $\sigma_x = -315 \dots -493$  МПа и  $\sigma_z = -285 \dots -552$  МПа. Данные напряжения, действующие в направлении продольной и поперечной подачи, являются напряжениями сжатия, их максимальные значения наблюдаются на поверхности.

Важно заметить, что компонента  $\sigma_x$ , действующая в направлении главного движения, при усилиях до 80 Н имеет максимальное значение среди остальных  $\sigma_x = -493$  МПа. Это связано с большей степенью деформации и сопротивлением металла вследствие образования пластической волны перед шариком. Последующее увеличение рабочей силы уже при 100 Н приводит к снижению значений данного компонента. Такое обстоятельство характерно для эффекта истощения запаса пластичности и перенаклепа, связанного с превышением значений ОН предела текучести материала [23].

Интенсивность ОН с увеличением деформирующего усилия показывает регулярный рост и находится в пределах  $\sigma_i = -324 \dots 593$  МПа.

На рис. 7 представлена зависимость значений интенсивности ОН от величины усилия обкатки для шариков с диаметрами 4; 6 и 8 мм. Кривые на рис. 7 показывают снижение величины ОН с увеличением диаметра ДЭ. Такая закономерность объясняется уменьшением удельного давления обработки в очаге деформации вследствие увеличения площади контакта ДЭ с поверхностью детали.

Эффективность ОУО ППД характеризуется величиной ОН сжатия в поверхностном слое и глубиной их распространения. Так как наибольшие ОН лежат в поверхностном слое, где НДС близко к двухосному, то их максимальное значение должно ограничиваться условием:  $\sigma_i^{\text{ост}} = 1,15\sigma_T$ . [5].

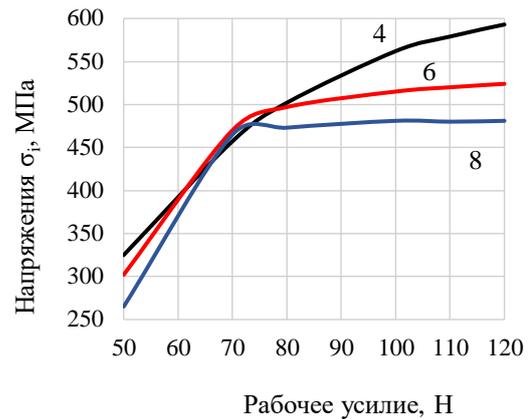


Рис. 7. Зависимость интенсивности ОН от величины рабочего усилия при диаметрах шарика 4; 6 и 8 мм

Также с увеличением диаметра шарика глубина распределения ОН снижается. Данная зависимость представлена на рис. 8.

На графике видно, что глубина залегания значений ОН, в зависимости от величины прижимной силы и диаметра шарика, меняется в диапазоне от 0,35 до 0,81 мм.

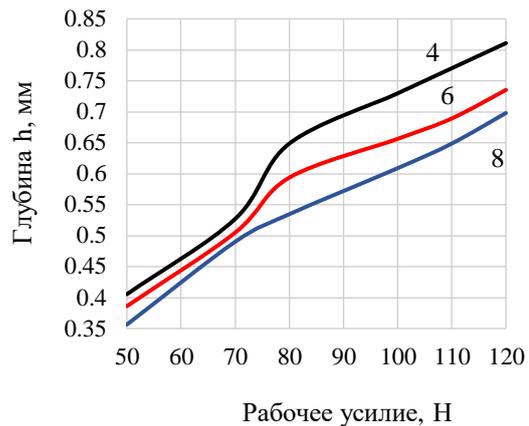


Рис. 8. Зависимость глубины залегания сжимающих ОН от величины рабочего усилия при диаметрах шарика 4; 6 и 8 мм

Разработка многошарикового устройства, о котором упоминалось выше, требует решения двух основных задач, таких как обеспечение габаритов инструмента, обусловленных размерами детали и техническими возможностями используемого станка, и обеспечение требуемого для эффективной обработки прижимного усилия. Наличие в предлагаемом устройстве большого количества ДЭ влечет за собой применение пружин большого усилия и, как следствие, размера, что в совокупности ведет к увеличению габаритов изделия в целом.

Следовательно, при подборе режимов обработки стоит стремиться к уменьшению диаметра ДЭ, что позволит снизить габариты устройства не только за счет размера ДЭ, но и за счет размера пружин, так как уменьшение диаметра шарика ведет к увеличению удельного давления обработки при меньших значениях силы. Вместе с тем, снижение диаметра ДЭ ведет к

снижению параметров производительности устройства и увеличению микронеровностей поверхности [23].

**Заключение.** В результате конечно-элементного анализа упрочняющей обработки плоской поверхности шариком получены значения компонент тензора и интенсивности остаточных напряжений. На основании полученных результатов выявлены зависимости величины и глубины распределения остаточных напряжений от изменения основных параметров обработки.

Определено, что с увеличением рабочего усилия интенсивность остаточных напряжений  $\sigma_i^{ост}$ , а также глубина их распространения возрастают.

Вместе с тем, зависимость величины интенсивности остаточных напряжений  $\sigma_i^{ост}$  и глубины упрочненного слоя от диаметра шарика имеет обратный характер, так, увеличение диаметра деформирующего элемента

#### Литература

- Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справ. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
- Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
- Pape F., Maiss O., Denkena B., Poll. G. Computational approach to improve bearings by residual stresses based on their required bearing fatigue life // International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. 2018. V. 6. P. 656-666.
- Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2021. 504 с.
- Oberreiter M., Horvath M., Stoschka M., Fladischer S. Effect of Surface Finishing State on Fatigue Strength of Cast Aluminium and Steel Alloys // Materials. 2023. V. 16, № 13. P. 4755.
- Hiroyuki Sasahara. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0,45 % C steel // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. V. 45, № 2. P. 131-136.
- Jung Won Seo, Byeong Choon Goo, Jae Boong Choi, Young Jin Kim. Effects of metal removal and residual stress on the contact fatigue life of railway wheels // International Journal of Fatigue. 2008. V. 30, iss. 10-11. P. 2021-2029.
- Биргер И.А. Остаточные напряжения. 2-е изд. М.: ЛЕНАНД, 2015. 232 с.
- Baumann M., Selbmann R., Milbrandt M., Kräusel V., Bergmann M. Adjusting the residual stress state in wire drawing products via in-process modification of tool geometries // Materials. 2021. V. 14, iss. 9. P. 2157.
- Haider M. Mohammad, Haider Mahdi Lieth, Murtadha Abbas Jabbar. Estimation of residual stresses in quenched 4140 low alloy steel using x-ray diffraction (XRD) // Journal of Southwest Jiaotong University. 2022. V. 57, № 3. P. 373-380.
- Монахов А.Д., Яковлев Н.О., Автаев В.В., Котова Е.А. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). С. 95-104.
- Пичугин С.С., Шитиков В.С., Головков А.Н. Разрушающие методы оценки остаточных напряжений // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). С. 101-112.
- Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T. A Method to Estimate Residual Stress in Austenitic Stainless Steel Using a Microindentation Test // Journal of Materials Engineering and Performance. 2015. V. 24, № 1. P. 362-372.
- Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20, № 4. С. 6-20.
- Зайдес С.А., Колесник А.В. Механика формирования остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании на основе динамического моделирования // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2017. Т. 21, № 1. С. 24-31.
- Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса ППД. Остаточные напряжения в упрочняемом упругопластическом теле // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21, № 2. С. 110-123.
- Altan T. Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses // J. Manuf. Sci. Eng. 2007. V. 129, № 4. P. 705-716.
- Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справ. В 2-х т. / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2014. Т. 1. 477 с.
- Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
- Бруйка В.А., Фокин В.Г., Курвева Я.В. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Самара: Самар. гос. технический ун-т, 2013. 147 с.
- Peng Jian, Zhou Peishuang, Wang Ying, Dai Qiao, Knowles D., Mostafavi M. Stress triaxiality and lode angle parameter characterization of flat metal specimen with inclined notch // Metals. 2021. V. 11, iss. 10. P. 1627.
- Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с.
- Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

#### References

- Odincov L.G. Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation: sprav. M.: Mashinostroenie, 1987. 328 p.
- Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts. M.: Mashinostroenie, 2000. 320 p.
- Pape F., Maiss O., Denkena B., Poll. G. Computational approach to improve bearings by residual stresses based on their required bearing fatigue life // International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. 2018. V. 6. P. 656-666.

4. Handbook of surface plastic deformation processes / pod red. S.A. Zajdesa. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2021. 504 p.
5. Oberreiter M., Horvath M., Stoschka M., Fladischer S. Effect of Surface Finishing State on Fatigue Strength of Cast Aluminium and Steel Alloys // *Materials*. 2023. V. 16, № 13. P. 4755.
6. Hiroyuki Sasahara. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0,45 % C steel // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. V. 45, № 2. P. 131-136.
7. Jung Won Seo, Byeong Choon Goo, Jae Boong Choi, Young Jin Kim. Effects of metal removal and residual stress on the contact fatigue life of railway wheels // *International Journal of Fatigue*. 2008. V. 30, iss. 10-11. P. 2021-2029.
8. Birger I.A. Residual stresses. 2-e izd. M.: LENAND, 2015. 232 p.
9. Baumann M., Selbmann R., Milbrandt M., Kräusel V., Bergmann M. Adjusting the residual stress state in wire drawing products via in-process modification of tool geometries // *Materials*. 2021. V. 14, iss. 9. P. 2157.
10. Haider M. Mohammad, Haider Mahdi Lieth, Murtadha Abbas Jabbar. Estimation of residual stresses in quenched 4140 low alloy steel using x-ray diffraction (XRD) // *Journal of Southwest Jiaotong University*. 2022. V. 57, № 3. P. 373-380.
11. Monahov A.D., Yakovlev N.O., Avtaev V.V., Kotova E.A. Destructive methods for determining residual stresses (review) // *Trudy VIAM*. 2021. № 9 (103). P. 95-104.
12. Pichugin S.S., Shitikov V.S., Golovkov A.N. Non-destructive methods of residual stress assessment // *Trudy VIAM*. 2024. № 1 (131). P. 101-112.
13. Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T. A Method to Estimate Residual Stress in Austenitic Stainless Steel Using a Microindentation Test // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015. V. 24, № 1. P. 362-372.
14. Mahalov M.S., Blyumenshtejn V.Yu. Mechanics of the process of surface plastic deformation. A model of a hardened elastoplastic body // *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2018. V. 20, № 4. P. 6-20.
15. Zajdes S.A., Kolesnik A.V. Mechanics of the formation of residual stresses during surface plastic deformation based on dynamic modeling // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2017. V. 21, № 1. P. 24-31.
16. Mahalov M.S., Blyumenshtejn V.Yu. Mechanics of the PPD process. Residual stresses in a hardened elastoplastic body // *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2019. V. 21, № 2. P. 110-123.
17. Altan T. Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses // *J. Manuf. Sci. Eng.* 2007. V. 129, № 4. P. 705-716.
18. Technology and tools of finishing and strengthening processing of parts by surface plastic deformation: sprav. V 2-h t. / pod obshch. red. A.G. Suslova. M.: Mashinostroenie, 2014. V. 1. 477 p.
19. Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zaharova Yu.V. Fundamentals of work in ANSYS 17. M.: DMK Press, 2017. 210 p.
20. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kurveva Ya.V. Engineering analysis in Ansys Workbench. Samara: Samar. gos. tekhnicheskij un-t, 2013. 147 p.
21. Peng Jian, Zhou Peishuang, Wang Ying, Dai Qiao, Knowles D., Mostafavi M. Stress triaxiality and lode angle parameter characterization of flat metal specimen with inclined notch // *Metals*. 2021. V. 11, iss. 10. P. 1627.
22. Mihlin S.G. Variational methods in mathematical physics. M.: Nauka, 1970. 512 p.
23. Smelyanskij V.M. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation. M.: Mashinostroenie, 2002. 300 p.