

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОЧАГЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШАРИКОМ

Зайдес С.А., Пятовский А.С.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск*

Ключевые слова: временные напряжения, плоская поверхность, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование, очаг деформации, обкатка шариком.

Аннотация. В работе представлена конечно-элементная динамическая модель многопроходной упрочняющей обработки плоской поверхности шариком. В качестве параметров деформирования приняты диаметр шарика $d_{ш} = 4,6,8$ мм и диапазон прижимного усилия $F_{раб} = 150..160$ Н. На основании результатов моделирования процесса упрочнения получены значения компонент тензора σ_x^{ep} , σ_y^{ep} и σ_z^{ep} , а также интенсивность σ_i^{ep} временных напряжений в очаге пластической деформации, при разных параметрах обработки. Установлена связь между технологическими параметрами обработки и величиной текущих напряжений в очаге упругопластической деформации, а также глубиной их проникновения. Целью работы является определение данных о напряженном состоянии в очаге пластической деформации, необходимых для проектирования нового многошарикового устройства ОУО плоской поверхности.

THE INFLUENCE OF THE MAIN DEFORMATION PARAMETERS ON THE STRESS STATE IN THE DEFORMATION CENTER DURING HARDENING OF A FLAT SURFACE WITH A BALL

Zaides S.A., Pyatovskii A.S.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

Keywords: temporary stresses, flat surface, stress-strain state, finite element modeling, deformation focus, ball rolling.

Abstract. The paper presents a finite element dynamic model of multi-pass hardening treatment of a flat surface with a ball. The ball diameter $d_{ш} = 4,6,8$ mm and the clamping force range $F_{раб} = 150..160$ N are accepted as deformation parameters. Based on the results of modeling the hardening process, the values of the components of the tensor σ_x^{ep} , σ_y^{ep} and σ_z^{ep} , as well as the intensity σ_i^{ep} of temporary stresses in the focus of plastic deformation, at different processing parameters, were obtained. A connection has been established between the technological parameters of processing and the magnitude of the current stresses in the focus of elastoplastic deformation, as well as the depth of their penetration. The aim of the work is to determine the data on the stress state in the focus of plastic deformation necessary for the design of a new multi-ball device for a flat surface.

Введение

Механические свойства неупрочнённых стальных элементов в значительной степени не соответствуют требованиям современного машиностроения, что делает их упрочнение всё более необходимым. Все детали,

соответствующие критериям прочности и износостойкости, должны проходить процесс упрочнения.

Наиболее технологически простым и эффективным способом упрочнения рабочих поверхностей деталей является поверхностное пластическое деформирование (ППД). Технология отделочно-упрочняющей обработки ППД позволяет формировать на поверхности детали упрочнённый слой с остаточными напряжениями сжатия и минимальными значениями микронеровностей. Упрочнением поверхностным пластическим деформированием удаётся обеспечить прочность деталей из менее дорогих металлических материалов и избежать применения высоколегированных сталей [1].

Как известно, в большинстве случаев разрушение детали начинается с поверхности [2] и то, насколько прочен поверхностный слой в целом определяет способность детали выдерживать эксплуатационные нагрузки.

Глубина и степень упрочнения во многом зависят от режимов обработки, таких как, диаметр деформирующего элемента и силы обкатывания. Известно, что совместное увеличение диаметра шарика и прикладываемой нагрузки приводит к значительному увеличению толщины упрочнённого слоя и степени упрочнения [3, 4].

С позиции механики деформирования глубина упрочнения определяется границей очага пластической деформации [5], соответственно, глубина распространения интенсивности временных напряжений, имеющих значения $\sigma_i^{ep} \geq \sigma_T$ и будет являться границей очага пластической деформации т.е. толщиной упрочнённого слоя [6].

Одним из перспективных направлений применения ОУО ППД является обкатка уплотнительных поверхностей запорных устройств, к которым предъявляются повышенные требования по плоскостности и контактной жёсткости. Так в частности, применение обкатки шариковым инструментом в качестве финишных операций позволит в значительной степени повысить эксплуатационные характеристики рабочих органов отделительных клапанов металлургической отрасли, работающих в условиях газабразивного износа и большого числа рабочих циклов.

Конечно-элементное моделирование процесса обкатки плоской поверхности шариком

Для конечно-элементного анализа была разработана модель процесса упрочняющей обкатки шариком плоского образца при «упругой» схеме за три рабочих прохода с поперечной подачей $s = 0,2$ мм и скоростью обработки $v = 2$ мм/с (рис. 1). При «упругой» схеме удельное давление обработки определяется рабочим прижимным усилием [7, 4].

Моделирование производилось с использованием программы ANSYS Mechanical в системе transient structural. Физико-механические характеристики материала упрочняемого плоского образца были установлены аналогичными характеристикам стали 20Х13, которая широко используется в производстве арматуры [8], а именно: предел текучести $\sigma_T = 492$ МПа, предел прочности $\sigma_\sigma = 880$ МПа, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

Деформирующий элемент – шарик был принят как абсолютно жёсткое тело, т.е. его напряжения и деформации не учитывались. Данное допущение обусловлено тем, что в практике твёрдость деформирующего инструмента в 2,5-3 раза выше чем твёрдость обрабатываемой детали.

Характеристика упрочнения материала плоского образца была задана в виде кривой упрочнения (рис. 2).

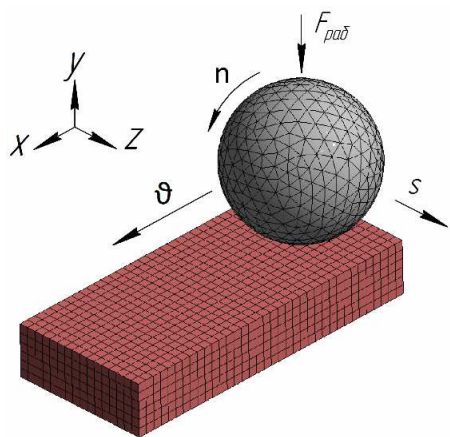


Рис. 1. Конечно-элементная модель процесса обкатки плоской поверхности шариком

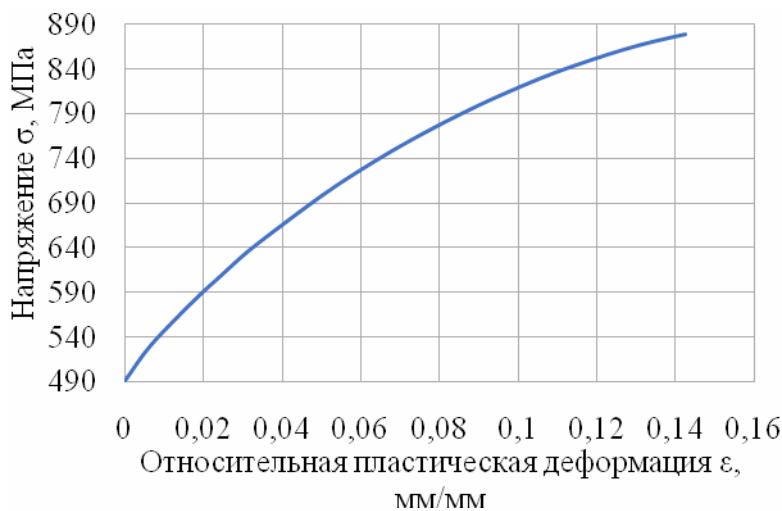


Рис. 2. Характеристика упрочнения материала плоского образца

За базовый диаметр шарика был принят $d_{ш} = 4$ мм. Чтобы проанализировать изменение напряжения, значения прижимной силы и диаметра шарика изменялись в диапазоне: $F_{раб} = 50...160$ Н и $d_{ш} = 4,6,8$ мм. Согласно справочным данным такие параметры соответствуют упрочняющему режиму обработки ППД [4].

Тип контакта деформирующего шарика с образцом был принят Frictional с коэффициентом трения качения $\eta = 0,05$, конечные элементы в форме равностороннего гексаэдра с размером грани 0,2 мм.

Процесс упрочняющей обработки состоит из 3 проходов, каждый из которых в свою очередь включает 6 шагов, изображённых на рисунке 3.

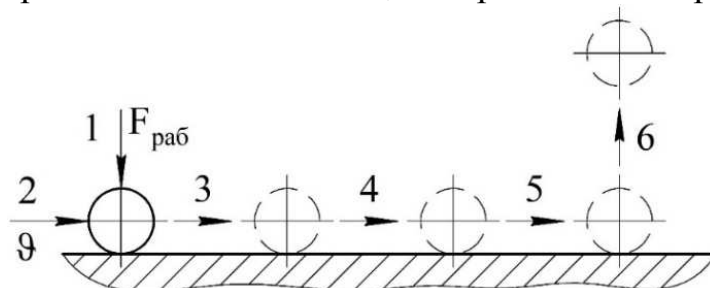


Рис. 3. Пошаговый процесс обкатки плоской поверхности шариком

Значение текущих напряжений фиксировались в области второго прохода (в середине обработанного участка) при 3-ем рабочем ходе на 4 этапе процесса обработки (рис. 3), когда шарик находится в контакте с поверхностью образца, а деформирующее усилие и скорость качения постоянны.

Результаты моделирования и обсуждение

На рисунке 4 представлен очаг деформации в продольном сечении сформировавшийся при третьем рабочем ходе обработки плоской поверхности шариком.

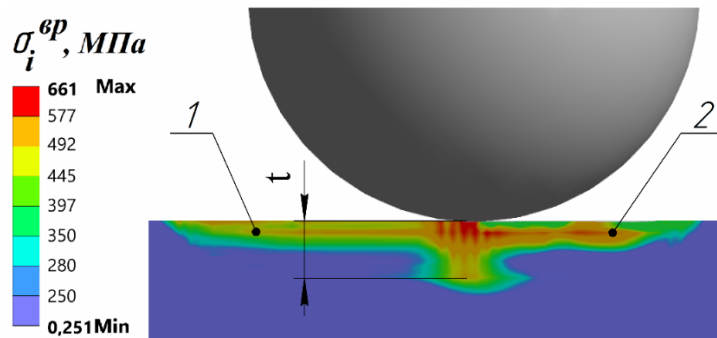


Рис. 4. Очаг деформации при третьем рабочем ходе обработки плоской поверхности шариком

Как видно из рисунка 4 очаг деформации на третьем рабочем ходе пересекает зону остаточных напряжений сжатия сформировавшихся от предшествующих проходов поз. 1. Позицией 2 обозначена зона остаточных напряжений, сформировавшихся после третьего рабочего хода в среднем сечении обработанного участка. Глубина распространения пластической деформации отмечена символом t . По результатам моделирования фиксировались значения интенсивности временных напряжений σ_i^{ep} , а также компоненты тензора временных напряжений в направлении главных осей: σ_x^{ep} , σ_y^{ep} и σ_z^{ep} .

В программной среде Ansys расчет интенсивности временных напряжений при трехосном напряженном состоянии базируется на критерии эквивалентных напряжений фон Мизеса [9, 10].

Результаты моделирования показали, что интенсивность временных напряжений σ_i^{ep} с увеличением рабочего усилия деформирования возрастает, также как и компоненты тензора.

Максимальную величину среди компонент имеет σ_z^{ep} , направленная поперёк направления движения деформирующего элемента, её значение находится в пределах $\sigma_z^{ep} = -392 \dots -793$ МПа. Компонента σ_y^{ep} имеет наименьшее значение и с изменением рабочего усилия находится в пределах $\sigma_y^{ep} = -80 \dots -286$ МПа. Значения интенсивности временных напряжений изменяется в пределах $\sigma_i^{ep} = 347 \dots 721$ МПа.

Из графика на рисунке 5 видно, что существенное влияние на величину интенсивности временных напряжений σ_i^{ep} оказывает диаметр деформирующего элемента. Так при увеличении диаметра шарика $d_{ш}$ до 8 мм достижение пластической деформации происходит при значительно больших усилиях деформирования в сравнении с базовым значением $d_{ш} = 4$ мм.

При увеличении диаметра шарика наблюдается уменьшение глубины проникновения временных напряжений в зоне пластической деформации, что наглядно отображено на рисунке 6.

График показывает, что глубина распространения пластической деформации h , в зависимости от величины деформирующей силы $F_{\text{раб}}$ при базовом значении диаметра шарика $d_{\text{ш}} = 4$ мм составляет 0,23 мм, при $d_{\text{ш}} = 6$ мм – 0,16 мм и при $d_{\text{ш}} = 8$ мм – 0,125 мм.

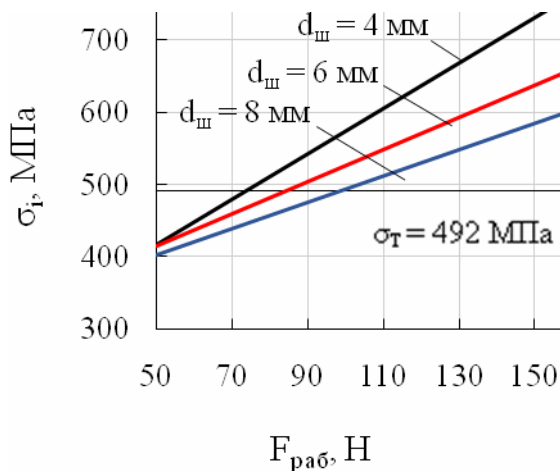


Рис. 5. Зависимость значений интенсивности временных напряжений в очаге деформации от величины деформирующего усилия при $d_{\text{ш}} = 4, 6, 8$ мм

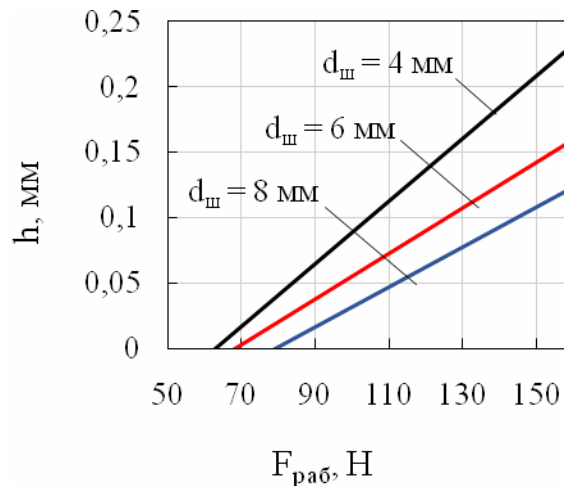


Рис. 6. Зависимость глубины пластической деформации от величины деформирующей силы при $d_{\text{ш}} = 4, 6, 8$ мм

Деформирующая сила во всех случаях положительно влияет на НДС в очаге деформации. С её ростом увеличиваются временные напряжения и глубина распространения пластической деформации.

Полученные результаты моделирования согласуются с результатами работ [11, 12].

Заключение

В результате решения конечно-элементной модели процесса упрочняющей обработки плоской поверхности шариком получены значения тензорных компонент и интенсивности временных напряжений в очаге упругопластической деформации. Установлена связь между напряженно-деформированным состоянием в зоне деформации и изменением ключевых параметров обработки.

Установлено, что интенсивность временных напряжений σ_i^{ep} и глубина их формирования увеличивается с ростом силы нагружения. В тоже время, зависимость величины интенсивности временных напряжений σ_i^{ep} и глубины упрочнённого слоя от диаметра шарика противоположная. То есть, увеличение диаметра деформирующего элемента при постоянном усилии приводит к уменьшению контактных напряжений и снижению глубины распространения пластической деформации.

Максимальные временные напряжения формируются при обработке шариком $d_{\text{ш}} = 4$ мм с рабочим усилием $F_{\text{раб}} = 160$ Н и составляют $\sigma_i^{ep} = 721$ МПа

при наибольшей глубине их залегания $h = 0,23$ мм. В тоже время, с точки зрения упрочнения наиболее подходящими параметрами обработки являются параметры при которых напряжения в очаге деформации максимально близки к пределу прочности $\sigma_i^{6p} \rightarrow \sigma_s$, при таком условии достигается максимальное значение пластической деформации. Путём экстраполяции полученных данных можно установить, что при $d_{\text{ин}} = 4$ мм такому условию соответствует усилие $F_{\text{раб}} = 195$ Н, глубина упрочнённого слоя при этом составит $h = 0,32$ мм.

Список литературы

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко и др.; под общ.ред. С.А. Чижика и М.Л.Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 377 с
2. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
3. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. – 504 с.
4. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2-х томах. Т. 1 / Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.
5. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
6. Прикладная теория пластичности: монография / Ф.М. Митенков, И.А. Волков, Л.А. Игумнов и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 284 с.
7. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
8. Оптимальное проектирование затворов трубопроводной арматуры: монография / П.М. Огар, В.А. Тарасов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 216 с.
9. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Курвева Я.В. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Часть 2. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 148 с.
10. 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, vol. 11, iss. 10, pp. 1627.
11. Зайдес С.А., Хо К.М., Май Н.Д. Влияние секториального радиуса деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние в зоне контакта с цилиндрической поверхностью // iPolytech Journal. 2021, vol. 25(6), pp. 696-707.
12. Hou Ning, Bai Lidong, Ye Chao, Niu Xiaoxia, Wang Minghai, Huang Shutao, Wang Qijia. An analytical model for predicting the depth of subsurface plastic deformation during cutting titanium alloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024, vol. 132, pp. 1-10. DOI: 10.1007/s00170-024-13449-3.

Сведения об авторах:

Зайдес Семён Азикович – д.т.н., профессор;

Пятовский Артур Сергеевич – аспирант.