

Моделирование глубины упрочнения деталей из серого чугуна при обработке поверхностным пластическим деформированием

А.Б. Никишкина, В.В. Булычев

Калужский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Аннотация: В статье исследуется вопрос возможности обработки поверхностным пластическим деформированием серого чугуна и исследование его глубины упрочнения с целью управления напряженно - деформированным состоянием поверхностей деталей. Проведено моделирование, расчеты приближены к реальной ситуации, используется трехмерная конечно - элементная модель. Полученные данные проанализированы методом наименьших квадратов построены графики.

Ключевые слова: серый чугун, поверхностное пластическое деформирование, билинейная диаграмма деформирования, глубина вдавливания, сферический индентор.

Чугун занимает одно из важнейших мест среди конструкционных материалов, так как обладает хорошими литейными свойствами, низкой температурой плавления, повышенной теплопроводностью, а наличие графитных включений обуславливает его хорошие антифрикционные свойства. Чугун находит широкое применение при изготовлении таких ответственных изделий, как блоки цилиндров, детали тормозной системы автомобиля, коленчатые валы, шестерни привода маслонасоса, картеры задних мостов, валы, диски сцепления, поршневые кольца [1].

Одним из эффективных и ресурсосберегающих методов упрочнения деталей машин различного назначения является технология обработки поверхностно-пластическим деформированием (ППД). К технологиям обработки ППД относят, в частности, такие процессы, как дробеструйная обработка, обкатывание шариками или роликами [2, 3], дорнование, чеканка, и др. [4, 5]. Однако большинство работ, касающихся исследования и практического использования данных технологий, связано с их рассмотрением применительно к обработке стальных деталей [3-5].

Процессы обработки ППД деталей из чугунов исследованы менее полно. Как представляется, основной причиной сниженного интереса к применению данной технологии для упрочнения деталей из чугунов может быть повышенная вероятность растрескивания упрочняемых поверхностей из-за повышенной хрупкости чугуна по сравнению со сталями [6]. При этом существенные различия физико-механических свойств чугунов, вызванные особенностями их структур, размерами и формами графитовых включений, приводят к противоречивым экспериментальным результатам глубины упрочнения и реализуемыми при этом степенями пластической деформации.

Так, в [7] при ультразвуковом (УЗ) пластическом деформировании (ПД) образцов из серого чугуна СЧ21 глубина упрочнения составила 0,3 мм, в [8] при электромеханической обработке образцов из серого чугуна СЧ18 глубина упрочненного слоя – 0,11мм. А в [9] приведены сведения о том, что в результате применения чеканки серый чугун упрочняется на глубину свыше 13 мм. В [10] отмечена достаточная пластичность серого чугуна в условиях мягкого нагружения, а в [1] отмечается пластичность у серого чугуна — 27% при 975 °С.

Самые высокие значения предельной степени деформации зафиксированы у высокопрочного чугуна (76% при 1000 °С) [1].

В [11] при осевом сжатии цилиндрического образца, состоящего из нескольких сопряженных втулок из разных материалов (малопластичного и из высокопластичного) установили, что при деформировании составного образца «чугун СЧ20 – латунь Л63» накопленная деформация чугунного образца составила 39%. Следующий опыт был проведен для составленного из трех втулок образца: «медь М1 – чугун СЧ20 – медь М1». В этом случае была достигнута еще большая пластическая деформация до разрушения 78%.

Таким образом, возможная степень пластического деформирования может варьироваться в широких диапазонах и составлять от 5% до 70%, что

связано, как отмечается в работах [7, 8, 10], прежде всего с особенностями графитных включений. В литературных источниках также не выявлено зависимостей, описывающих влияние диаметра индентора на значение глубины наклепа.

В связи с этим, целью статьи является исследование взаимосвязи степени пластического деформирования, диаметра индентора и соответствующим этим значениям глубин упрочнения деталей из серого чугуна.

Данные зависимости находили посредством математического моделирования напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов в прикладном пакете Ansys [12, 13]. Рассматривался случай вдавливания сферического индентора в деталь в виде параллелепипеда с размерами сторон 30x30x15 мм. В качестве материала индентора принята сталь ШХ15. В качестве материала детали – серый чугун.

Принятые при моделировании физико-механические свойства серого чугуна приведены в табл. №1.

Таблица №1

Свойства модели

Свойство	Значение
Модуль Юнга	$E = 1,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент Пуассона	0,22
Плотность	$7200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Используемая билинейная диаграмма материала упрочняемой детали представлена на рис.1 [14].

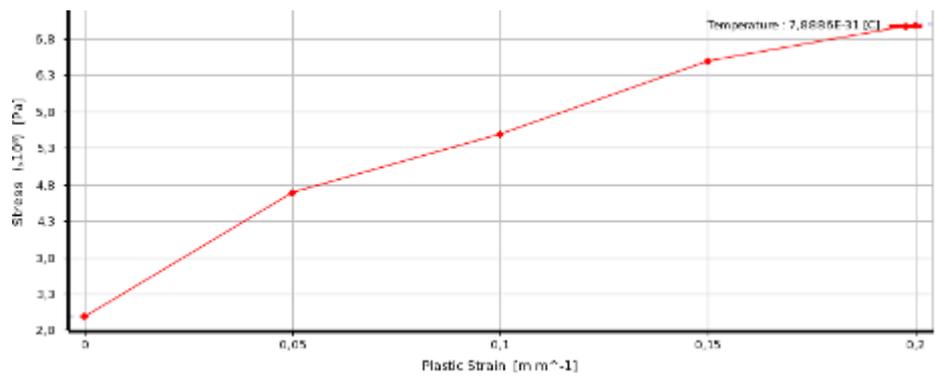


Рис.1. - Билинейная диаграмма для чугунного образца

Конечно - элементная сетка генерировалась методом Hex Dominant Method. Конечными элементами служили гексаэдры, размеры которых варьировались в диапазоне от 0,1 мм до 1,4 мм (рис.2).

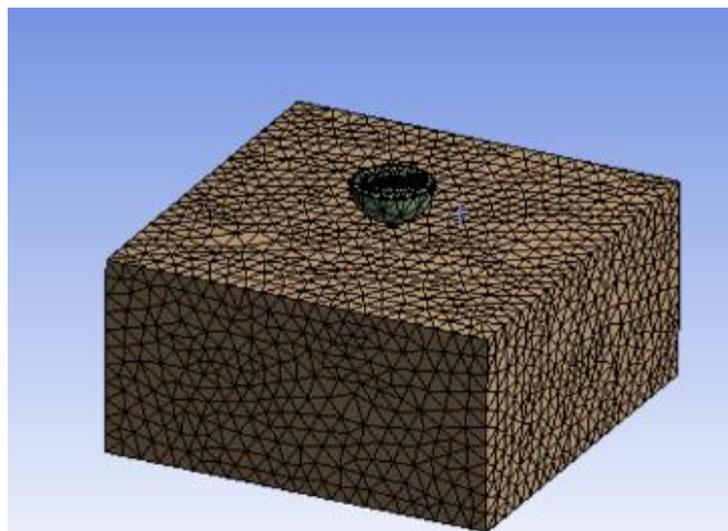


Рис.2. – Конечно- элементная модель внедрения сферического индентора в чугунный образец

Моделирование осуществлялось для случаев вдавливания сферических инденторов диаметрами 4, 6, 8 и 10 мм. Анализ напряжённо-деформированного состояния выполнялся для глубин вдавливания, соответствующих значениям пластической деформации в диапазоне $\varepsilon = 0,1 \dots 0,7$ с шагом 0,1. Связь между глубиной вдавливания индентора h_1 и степенью пластической деформации ε находили по зависимости [15].

$$\varepsilon = 2\sqrt{\frac{h_1}{D} - \left(\frac{h_1}{D}\right)^2}, \quad (1)$$

где D – диаметр индентора,

h_1 – глубина вдавливания.

За глубину залегания остаточных напряжений сжатия считали глубину, на которой напряжения сжатия превышали предел текучести для серого чугуна, принятого 200 МПа.

Для каждого диаметра индентора результаты численного эксперимента были аппроксимированы параболическими зависимостями вида:

$$h = a\varepsilon^2 + b\varepsilon + c, \quad (2)$$

где

h – глубина залегания остаточных напряжений сжатия,

ε – деформация,

a, b, c – коэффициенты, находимые методом наименьших квадратов.

Результаты расчётов коэффициентов a, b, c сведены в табл. №2.

Таблица №2

Результаты расчётов коэффициентов

D	4	6	8	10
a	-3,411	-9,038	-16,68	-22,37
b	14,78	20,94	31,35	36,6
c	0,0001	0,0001	-0,00023	-0,00033
Индекс корреляции	0,997	0,998	0,999	0,996

Из таблицы №2 видно, что значения коэффициентов c составляют величины порядка 10^{-4} , что позволяет исключить ее из рассмотрения. Очевидно также, что из физического смысла решаемой задачи $c = 0$, так при $\varepsilon = 0$ глубина h должна быть также равна 0. С учетом этого для диаметра индентора 4 мм получили зависимость:

$$h = -3,411\varepsilon^2 + 14,78\varepsilon. \quad (3)$$

Для диаметра индентора 6 мм получили зависимость:

$$h = -9,038\varepsilon^2 + 20,94\varepsilon. \quad (4)$$

Для диаметра индентора 8 мм получили зависимость:

$$h = -16,68\varepsilon^2 + 31,35\varepsilon. \quad (5)$$

Для диаметра индентора 10 мм получили зависимость:

$$h = -22,37\varepsilon^2 + 36,6\varepsilon. \quad (6)$$

Сопоставление результатов численного эксперимента и полученных функциональных зависимостей (3-6) представлены на рис. 3.

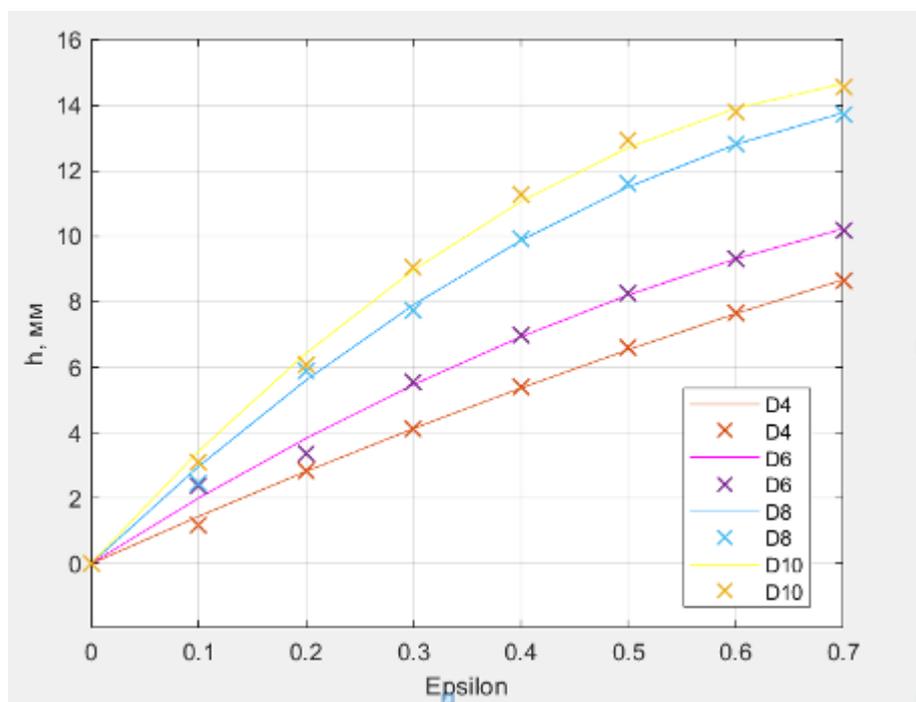


Рис.3. – Влияние степени пластического деформирования на глубину наклепа

Анализ результатов вычислений показывает, что коэффициенты a и b монотонно возрастают с увеличением диаметра индентора D .

Регрессионный анализ значений коэффициентов a, b от диаметра показал, что данные связи могут быть описаны линейными зависимостями. В результате получили следующие зависимости:

$$a = -3,226D + 9,7069. \quad (7)$$

Коэффициент корреляции $|r_{xy}| = 0,998$, ошибка аппроксимации $\bar{A} = 4,331\%$

$$b = 3,7935D - 0,637. \quad (8)$$

Коэффициент корреляции $r_{xy} = 0,992$, ошибка аппроксимации $\bar{A} = 3,6\%$

Подставив (7) и (8) в (2) получили:

$$h = (-3,226D + 9,7069)\varepsilon^2 + (3,7935D - 0,637)\varepsilon. \quad (9)$$

На рис.4 представлена поверхность, описываемая уравнением (9).

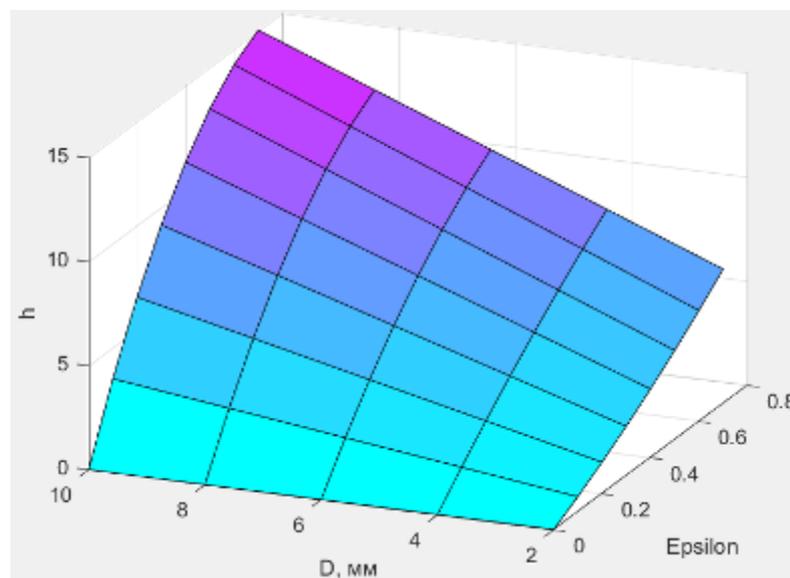


Рис.4. – Влияние степени пластического деформирования и диаметра бойка на глубину наклепа

Полученная зависимость (9) указывает на значительное влияние на глубину наклепа не только степени деформации, но и диаметра индентора. Так, при степени деформирования 0,2, увеличение диаметра индентора с 2 мм до 10 мм приводит к увеличению глубины с 1,52 мм до 6,56 мм, т.е. на 43,1%. А при степени деформирования 0,4, увеличение диаметра индентора с 2 мм до 10 мм приводит к увеличению глубины с 3,29 мм до 11,309 мм., т.е. на 34,3%.

Проведенные исследования и полученная зависимость позволяет повысить точность прогнозирования результатов обработки ППД чугуна с учетом допускаемых значений пластического деформирования. Так, с целью увеличения глубины наклепа малопластичных материалов, можно рекомендовать применение инденторов большего диаметра.

Выводы:

1. Посредством математического моделирования выявлена нелинейная зависимость глубины упрочнения серого чугуна от степени деформации при вдавливании сферического индентора.
2. Увеличение диаметра индентора способствует значительному росту глубины упрочнения при одной и той же степени пластической деформации.
3. Получена математическая зависимость, позволяющая рассчитать глубину упрочнения в зависимости от степени деформации и диаметра индентора.

Литература

1. Покровский, А. И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / Минск: Беларус. навука, 2010. 256 с.



2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
3. Зайдес С. А. Состояние технологии поверхностного пластического деформирования в России // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2015. № 2(43). С. 18-21.
4. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
5. Папшев Д.Д. Отделочно – упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
6. Ицкович Г.М. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1966. 512 с.
7. Рахимянов Х.М., Никитин Ю.В. Роль ультразвукового пластического деформирования в формировании структуры поверхностного слоя при комбинированной обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 1(54). С. 39-44.
8. Михальченков А.М., Тюрева А.А. Особенности методов исследований механических свойств серого чугуна (макро-, микротвердость и другие испытания). Брянск. Издательство БГСХА, 2010 г. 128 с.
9. Леонтьев, Л. Б. Формирование параметров поверхностного слоя чугунных деталей поверхностным пластическим деформированием // Металлообработка. 2003. № 3(15). С. 28-31.
10. Трибунская Р. М. Концепция фракталов в оценке механизма упрочнения деталей из серого чугуна методами поверхностного пластического деформирования // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы Третьей международной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2021. С. 128-131
11. Цеханов Ю.А. Метод определения пластичности малопластичных материалов в условиях высокого гидростатического давления // Вестник



Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 3. С. 155-164.

12. Yastrebov V. A. Numerical Methods in Contact Mechanics // ISTE, London, 2013. 295 p.

13. Fischer-Cripps A. C. Nanoindentation // Springer, New York, 2002. 216 p

14. Одинг И. А. Энциклопедический справочник "Машиностроение". Т.4/ Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. 1947. 449 с.: ил.

15. Никишкина А. Б., Булычев В.В. Расчет глубины залегания напряжений сжатия при вдавливании сферического индентора // Инженерный вестник Дона, 2022, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7827.

References

1. Pokrovskij, A. I. Gorjachaja plasticheskaja deformacija chuguna: struktura, svojstva, tehnologicheskie osnovy [Hot plastic deformation of cast iron: structure, properties, technological foundations]. Minsk: Belarus. navuka, 2010. 256 p.
2. Odincov L.G. Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem: Spravochnik. [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation: Reference book.] Moskva, Mashinostroenie, 1987. 328 p.
3. Zajdes, S. A. Obrabotka sploshnyh i sloistyh materialov. 2015. № 2(43). pp. 18-21.
4. Smeljanskij V.M. Mehanika uprochnenija detalej mashin poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Mechanics of hardening machine parts by surface plastic deformation]. Moskva, Mashinostroenie, 2002. 300 p.
5. Papshev D.D. Otdelchno – uprochnjajushhaja obrabotka poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Finishing - hardening treatment by surface plastic deformation]. Moskva, Mashinostroenie, 1978. 152 p.



6. Ickovich G.M. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. M.: Vysshaja shkola, 1966. 512 p.
7. H. M. Rahimjanov Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty). 2012. № 1(54). pp. 39-44.
8. Mihal'chenkov A.M., Tjureva A.A. Osobennosti metodov issledovanij mehanicheskikh svojstv serogo chuguna (makro-, mikrotverdost' i drugie ispytaniya) [Features of methods for studying the mechanical properties of gray cast iron (macro-, microhardness and other tests)] Bryansk. Izdatel'stvo BGSMA, 2010. 128 p.
9. Leont'ev, L. B. Metalloobrabotka. 2003. № 3(15). pp. 28-31.
10. Tribunskaya R. M. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: materialy Tret'ej mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Petropavlovsk-Kamchatskij: KamchatGTU 2021. pp. 128-131.
11. Cekhanov YU.A. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. T. 17. № 3. pp. 155-164.
12. Yastrebov V. A. Numerical Methods in Contact Mechanics. ISTE, London, 2013. 295 p.
13. Fischer-Cripps A. C., Nanoindentation. Springer, New York, 2002. 216 p.
14. Oding I. A. Enciklopedicheskij spravochnik "Mashinostroenie" [Encyclopedic reference book "Engineering"]. T.4 Moskva: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noj literatury. 1947. 449 p.: il.
15. Nikishkina A. B., Bulychev V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7827.