

Расчет глубины залегания напряжений сжатия при вдавливании сферического индентора

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 расчета глубины залегания напряжений сжатия при применении сферического индентора с целью повышения усталостной прочности деталей из стали. Выведена зависимость для предварительной оценки залегания остаточных напряжений в зависимости от диаметра лунки после вдавливания сферического индентора. Приведены результаты расчетов аналитических и численных методов для диаметров сферического индентора 4, 6, 8, 10 мм и различной степени пластической деформирования для определения глубины залегания напряжений сжатия, сопоставлены с известными данными, вычислена погрешность.

Ключевые слова: сферический индентор, билинейная диаграмма деформирования, пластическое деформирование, глубина вдавливания, напряжение сжатия.

Введение

Процессы обработки поверхностно-пластическим деформированием (ППД) широко применяются в машиностроении с целью повышения износостойкости, контактной и усталостной прочности тяжело нагруженных деталей машин. К технологиям обработки ППД относят, в частности, такие процессы, как дробеструйная обработка, обкатывание шариками или роликами [1-3], дорнование, чеканка [4, 5], и др. Результат обработки ППД часто оценивается по повышению твердости на поверхности и в подповерхностных слоях металла обрабатываемой детали. Как показано в работах [1, 2, 6] на примере экспериментальных данных, степень упрочнения металла сильно зависит как от начальной структуры металла, так и конкретных условий и режимов обработки ППД, что затрудняет ее расчетную оценку.

Для ориентировочного прогнозирования глубины упрочнения h в работе [6] приведена зависимость:

$$h = 1,5d, \tag{1}$$

где d - диаметр отпечатка.

Однако при разработке процессов обработки ППД с целью повышения усталостной прочности, а не износостойкости, основным фактором, требующим прогнозирования, является не глубина залегания упрочненных слоев металла, а глубина залегания остаточных напряжений сжатия.

Возможность применения выражения (1), а также известных экспериментальных данных по влиянию режимов обработки на глубину упрочнения для прогнозирования глубины залегания остаточных напряжений сжатия в настоящее время малоисследована. Для изучения этого вопроса в представленной статье выполнено численное моделирование глубины залегания остаточных напряжений сжатия при обработке ППД и результаты моделирования сопоставлены с известными данными, касающимися глубины залегания слоев металла повышенной твердости.

Аналитические расчеты и численное моделирование

Рассмотрим расчетную схему обработки ППД, поясненную на рис.1.

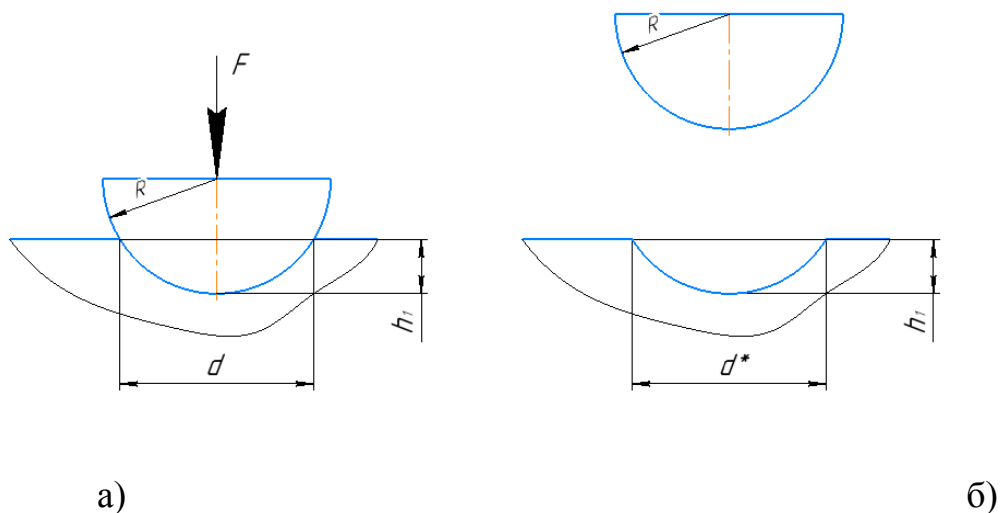


Рис. 1. — Схема вдавливания сферического индентора:

а) в материал внедряется индентор; б) материал после вдавливания индентора.

Сферический индентор диаметром D вдавливаются в поверхность на глубину h_1 , при этом поверхность физического контакта индентора и материала детали ограничивается окружностью диаметром d . После удаления индентора образуется остаточная лунка диаметром d^* , обусловленная пластическим деформированием материала детали. Следует иметь в виду, что из-за наличия упругой деформации диаметр и глубина лунки после удаления индентора оказываются несколько меньше, чем при внедренном инденторе:

$$d^* < d$$

$$h^* < h.$$

Однако, при выполнении расчетов этим обстоятельством часто пренебрегают, что дает возможность рассчитывать диаметр и глубину лунки из геометрических построений, пояснённых на рисунке 1, а:

$$d^* \approx d = 2\sqrt{Dh_1 - h_1^2}, \quad (2)$$

В случае $D \gg h$ можно пренебречь вкладом величины h_1^2 и выражение (2) принимает вид:

$$d' \approx 2\sqrt{Dh}, \quad (3)$$

Относительную погрешность Δ расчета глубины внедрения, вызванную заменой d на d' найдем из зависимости

$$\Delta = \frac{|d - d'|}{d}. \quad (4)$$

Подставив в (4) зависимости (2) и (3) и учитывая, что:

$$\sqrt{Dh_1} > \sqrt{Dh_1 - h_1^2},$$

получили

$$\Delta = \frac{\sqrt{Dh_1}}{\sqrt{Dh_1 - h_1^2}} - 1. \quad (5)$$

Введем коэффициент глубины внедрения:

$$k = \frac{h_1}{D}. \quad (6)$$

Тогда:

$$h_1 = kD. \quad (7)$$

Подставив (7) в (5) после сокращений, получим:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{1-k}} - 1 \quad (8)$$

Используя (8), получим зависимость для определения значения k , позволяющего использовать в расчетах более простую зависимость (9) с заданной погрешностью Δ .

$$k = \frac{1}{(1-\Delta)^2} - 1. \quad (9)$$

Так, например, для возможности использования формулы (9) с погрешностью не более 5% необходимо, чтобы $k = 0,108$.

Глубину залегания остаточных напряжений найдем используя зависимость (1) и содержащиеся в работе [1] рекомендации, согласно которым глубина залегания остаточных напряжений превышает толщину наклепанного слоя и находится с ним в соотношении 1,1...1,3. С учетом сказанного, глубина залегания остаточных напряжений составит:

$$h = (1,65...1,95)d. \quad (10)$$

Из (10) и (2) получим

$$h = (3,3...3,9)\sqrt{Dh_1 - h_1^2}$$

Применяя упрощенную зависимость (3), получим:

$$h = (3,3...3,9)\sqrt{Dh_1}. \quad (11)$$

Численное моделирование распределения напряжений в детали при внедрении в нее сферического индентора выполнено в прикладном пакете ANSYS [7, 8]. В качестве материала индентора принята сталь ШХ15, в

качестве материала детали - низкоуглеродистую сталь. Была принята билинейная диаграмма деформирования материала детали. Примененная билинейная диаграмма для низкоуглеродистой стали приведена на рис.2.

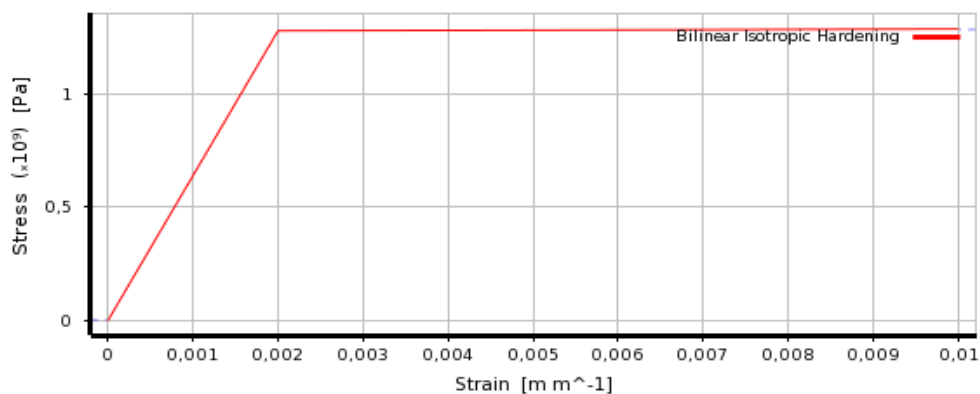


Рис.2. — Билинейная диаграмма для низкоуглеродистой стали

Расчетная модель представлена на рис.3

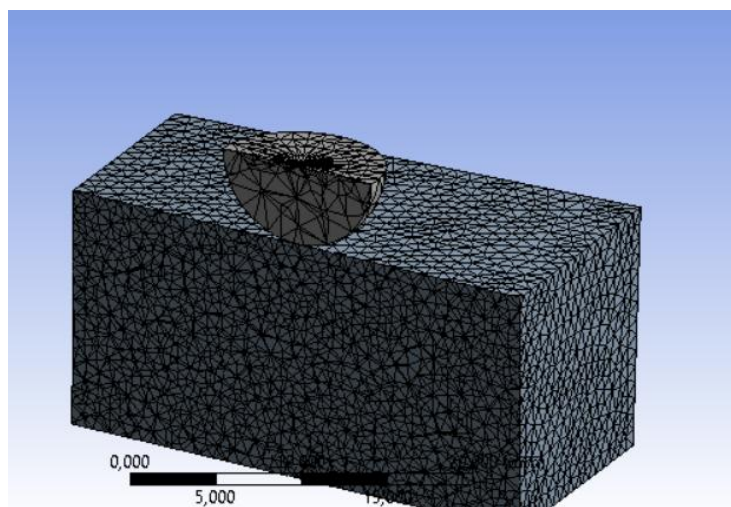


Рис. 3— Расчетная модель внедрения сферического индентора в деталь

В качестве детали был взят параллелепипед с размерами сторон 30x30x15мм. Конечно-элементная сетка генерировалась методом Hex Dominant Method [9, 10]. Конечными элементами служили гексаэдры, размеры которых варьировались в диапазоне 0,1мм-1,4мм. Были исследованы случаи вдавливания индентора с диаметрами 4, 6, 8, 10 мм. В качестве граничных условий задавалась глубина вдавливания индентора h_1 . При применении инденторов различного диаметра диапазоны варьирования

глубины вдавливания выбирались такими, чтобы пластическая деформация находилась в диапазоне $\varepsilon = 0,3...0,7$ [5].

Зависимость между h_1 и ε нашли следующим образом. Известно [5], что:

$$\varepsilon = \frac{d}{D}. \quad (12)$$

Подставив в (2) зависимость (11) после преобразований, получим:

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

или с учетом (9):

$$\varepsilon = 2\sqrt{k - k^2}. \quad (13)$$

Тогда:

$$k = 0,5 - 0,5\sqrt{1 - \varepsilon^2}.$$

Отсюда для указанного диапазона варьирования ε глубина внедрения индентора будет находиться в диапазоне:

$$h_1 = (0,023...0,143)D \quad (14)$$

Глубина залегания остаточных напряжений h соответствовала области, где рассчитанные напряжения сжатия превышали предел текучести для рассматриваемого материала.

Графики зависимости степени пластического деформирования от глубины внедрения индентора и его диаметра $\varepsilon = f(h_1, D)$, полученные аналитически и численным методом приведены на рис.4.

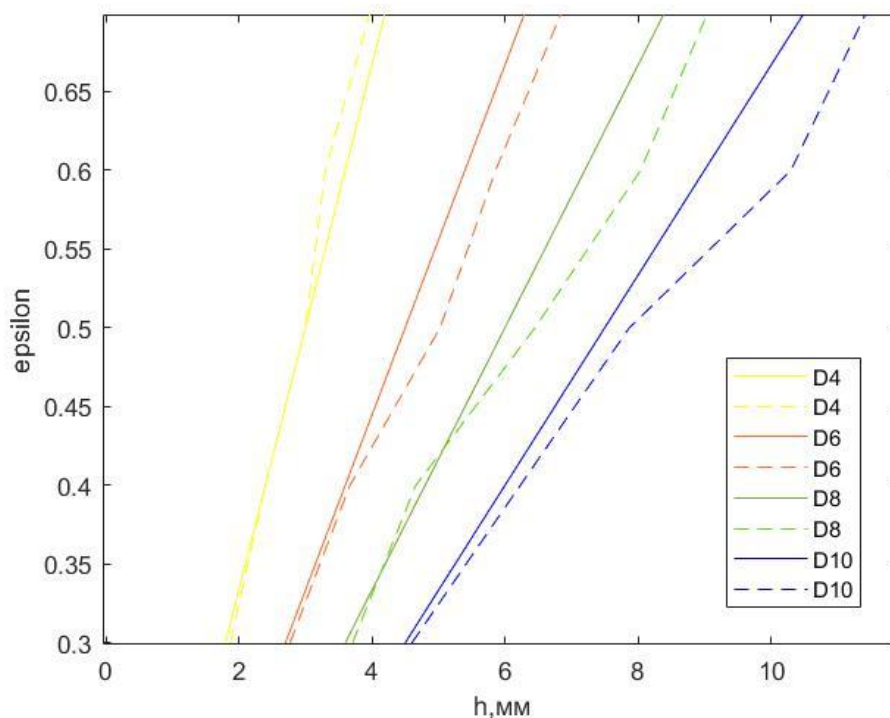


Рис. 4— Влияние глубины внедрения индентора и его диаметра на степень пластического деформирования

Как видно из рис. 4, на котором сплошными линиями обозначены графики для различных диаметров бойка, полученные по формулам из (1), а пунктирными обозначены графики, полученные по результатам численного моделирования, с увеличением степени пластического деформирования и диаметра бойка, расхождение между результатами увеличивается.

Выводы

Сопоставление результатов аналитических расчетов и численного моделирования показало, что для стали погрешность расчета глубины залегания остаточных напряжений по формуле (1) увеличивается с увеличением диаметра индентора и степени пластического деформирования и может достигать 15%.

Таким образом, зависимость (11) может быть рекомендована для предварительной оценки глубины залегания остаточных напряжений в зависимости от диаметра лунки после вдавливания сферического индентора.

Для более точного учета свойств материала детали и условий внедрения индентора целесообразно применять численное моделирование в прикладных пакетах.

Литература

1. Папшев Д.Д. Отделочно – упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
2. Овсеенко Е. С. Поверхностный слой мало жестких деталей, упрочненных методами поверхностного пластического деформирования // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 2(160). С. 52-55.
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. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
6. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
7. Кочетков А. В. Обзор исследований отделочно-упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования // Интернет-журнал Науковедение, 2013. № 4(17) URL: naukovedenie.ru/PDF/36tvn413.pdf

8. Павленко А.П. Аналитические и численные методы прочностного анализа и проектирования автомобильных конструкций: учеб. пособие для студентов вузов / Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. 129 с.
9. Fischer-Cripps A. C. Nanoindentation // Springer, New York, 2002. 216 p
10. Yastrebov V. A. Numerical Methods in Contact Mechanics // ISTE, London, 2013. 295 p.

References

1. Papshev D.D. Otdelchno – uprochnjajushhaja obrabotka poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Finishing - hardening treatment by surface plastic deformation]. Moskva, Mashinostroenie, 1978. 152 p.
2. Ovseenko, E. S. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. 2011. № 2(160). pp. 52-55.
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. Balter M.A. Uprochnenie detalej mashin [Hardening of machine parts]. 2-e izd. Moskva, Mashinostroenie, 1978. 184 p.
6. 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.
7. Kochetkov, A. V. Obzor issledovanij otdelchno-uprochnjajushhej obrabotki metodom poverhnostnogo plasticheskogo deformirovanija [Overview of Surface Plastic Hardening Studies]. URL: naukovedenie.ru/PDF/36tvn413.pdf (accessed 24/08/22)
8. Pavlenko A.P. Analiticheskie i chislennye metody prochnostnogo analiza i proektirovanija avtomobil'nyh konstrukcij: ucheb. posobie dlja studentov vuzov



[Analytical and numerical methods of strength analysis and design of automotive structures: tutorials. Manual for university students]. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 2015. 129 p.

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

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