

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.787.6.004

doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-21-26

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Сергей Владимирович Баринов✉

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия
box64@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-446X>

Аннотация

Разными исследователями был отмечен тот факт, что на механические и эксплуатационные свойства обрабатываемых изделий оказывают влияние их габаритные размеры и форма (масштабный эффект). Технология волнового деформационного упрочнения (ВДУ) появилась относительно недавно и некоторые ее возможности, в том числе масштабный эффект, до конца не изучен. В статье решаются задачи по установлению влияния габаритных размеров и форм образцов на результаты упрочнения после ВДУ. Оценивается изменение степени и глубины упрочнения обработанных ВДУ

образцов разных размеров и форм. Новизна работы заключается в установлении взаимосвязи между формами и размерами образцов и эффективностью упрочнения. Полученные в результате проведенных исследований выводы позволили установить допустимые границы, при которых необходимо учитывать влияние геометрических размеров на результаты упрочнения при ВДУ.

Ключевые слова: упрочнение, степень, глубина, форма, размеры, микротвердость, эффективность, детали, оборудование.

Ссылка для цитирования:

Баринов С.В. Масштабный эффект волнового деформационного упрочнения / С.В. Баринов // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 9. – С. 21-26. doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-21-26.

Original article

Open Access Article

SCALE EFFECT OF WAVE DEFORMATION HARDENING

Sergey Vladimirovich Barinov✉

Vladimir State University, Vladimir, Russia
box64@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-446X>

Abstract

Various researchers have noted the fact that the mechanical and operational properties of the processed products are influenced by their overall dimensions and shape (scale effect). The technology of wave deformation hardening (VDH) has appeared relatively recently and some of its possibilities, including scale effect, have not been fully studied. The paper solves the problems of determining the influence of the overall dimensions and shapes of samples on the results of hardening after VDH. The change in the degree and depth of hardening of VDH-treated samples of differ-

ent sizes and shapes is estimated. The novelty of the work is in finding the connection between the shapes and sizes of samples and the effectiveness of hardening. The conclusions obtained as a result of the conducted research allowed to find acceptable limits at which it is necessary to take into account the influence of geometric dimensions on the results of hardening during VDH.

Keywords: hardening, degree, depth, shape, dimensions, microhardness, efficiency, parts, equipment.

Reference for citing:

Barinov SV. Scale effect of wave deformation hardening. Transport Engineering. 2024;9:21-26. doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-21-26.

Введение

В разных отраслях промышленности используют машины и оборудование, состоящие из деталей различных габаритных размеров. При их проектировании, разработке технологий изготовления, в преобладающем большинстве случаев применяется общий подход, как к небольшим деталям, так и к крупногабаритным. Однако, ряд исследователей, в своих работах определили влияние габаритных размеров (масштабного эффекта) на изменение механических и эксплуатационных свойств.

Так, *Mailander R.* и *Bawersfeald W.* [1] при кручении образцов из стали Cr-Ni-W ($\sigma_B = 91 \text{ кг/мм}^2$) установили, что с увеличением их диаметров с 14 до 45 мм происходит снижение предела усталости на 29 %.

Lehr E. на конференции по вопросам расчета и конструирования деталей машин, предложил использовать зависимость снижения величины усталостной прочности исходя из диаметра образцов от 10 до 300 мм [2]. Данный график представлен на рис. 1, где за 100 % взято значение предела усталости образца $\varnothing 10 \text{ мм}$. Данную зависимость автор назвал предположительной, так как он ее построил на основании обобщения литературных источников.

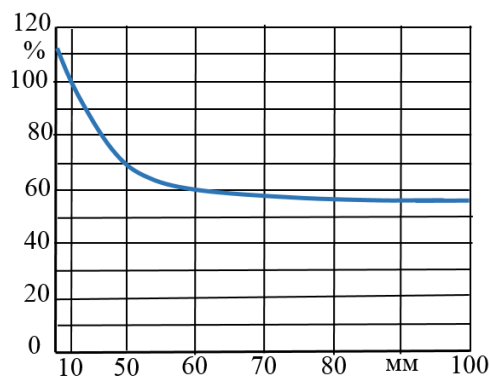


Рис. 1. Зависимость снижения величины усталостной прочности исходя из диаметра образцов [2]

Fig. 1. Dependence of the reduction in the value of fatigue strength based on the diameter of the samples [2]

В работе [3] Афанасьев Н.Н. установил, что уменьшение диаметров образцов с 27 до 7,5 мм приводит к повышению прочности до 5 %. Так же отмечено снижение пределов усталости в работе [4] при увеличении диаметров с 9,5 до 30 мм образ-

цов из углеродистой стали до 10,5 %, из стали Cr-Ni-W до 16,8.

Влияние формы образцов на эксплуатационные свойства установлены в работе [5]. В ней отмечено, что при одинаковом контактном давлении, цилиндрическая форма (1) образца по сравнению со сферической (2), обеспечивает повышение долговечности от 2 до 5 раз с ростом их диаметра с 4 до 10 мм (рис. 2).

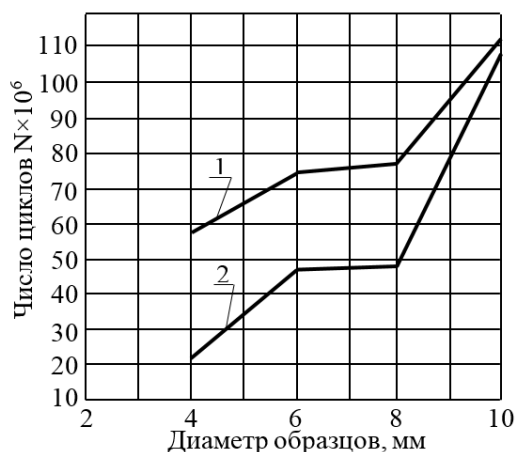


Рис. 2. Изменение долговечности образцов в зависимости от их диаметра и формы:

- 1 - цилиндрические образцы;
- 2 - сферические образцы [5, 6]

Fig. 2. Change in durability of samples depending on their diameter and shape:

1 - cylindrical samples; 2 - spherical samples [5, 6]

Таким образом, на основании небольшого числа приведенных работ можно сделать вывод о необходимости учета масштабного эффекта изделий перед их проектированием, либо на стадии повышения параметров их качества за счет упрочнения.

Технология волнового деформационного упрочнения разработана относительно недавно, её возможности до конца не исследованы, в том числе влияние масштабного эффекта, воздействие которого предположительно стоит ожидать в связи с волновой природой данного способа.

ВДУ отличается способом сообщения энергии в очаг деформации ударом через промежуточное звено [7]. Акустическая волна деформации поступает в обрабатываемый материал в виде потока импульсов. Эта волна отражается от всех участков обрабатываемого изделия с раз-

ной акустической жесткостью, а также от углов, полостей. В результате суммирования всей совокупности разнонаправленных прямых и обратных многократно отраженных волн деформации одномоментно в каждой точке изделия возникают волновые состояния, определяющие степень упрочнения материала. ВДУ может обеспечить глубину упрочнения до 15 мм и сформировать, гетерогенно упрочненную структуру в обрабатываемом изделии, наличие кото-

рой благоприятно влияет на эксплуатационные свойства изделий. Особенности воздействия волн деформации на изделия разных габаритных размеров полностью не исследованы [8].

Целью данной работы является исследование влияния масштабного эффекта при волновом деформационном упрочнении, на примере изменения габаритных размеров и форм образцов.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Исследование влияния форм и габаритных размеров проводилось на образцах из стали 45, являющейся своеобразным эталоном в промышленности. Упрочнение проводилось по центральной части образцов с энергией удара 70 Дж, коэффициентом перекрытия $K = 0,4$, частотой удара 9 Гц, в качестве инструмента использовался стержневой ролик $\varnothing 25$ мм и шириной 30 мм. Для исследования влияния форм образцов на результаты упрочнения использовались треугольные, цилиндрические и прямоугольные заготовки. Они

имели одинаковую толщину 10 мм и объем 10000 мм³.

Для исследования воздействия габаритных размеров на результаты упрочнения использовались прямоугольные образцы, у которых варьировалась длина от 50 до 150 мм (также как у характерного диапазона на диаграмме *Lehr E* [2]), ширина от 20 до 40 мм, толщина от 10 до 20 мм.

После упрочнения образцы разрезались вдоль середины упрочненной области, и в полученном сечении измерялась микротвердость.

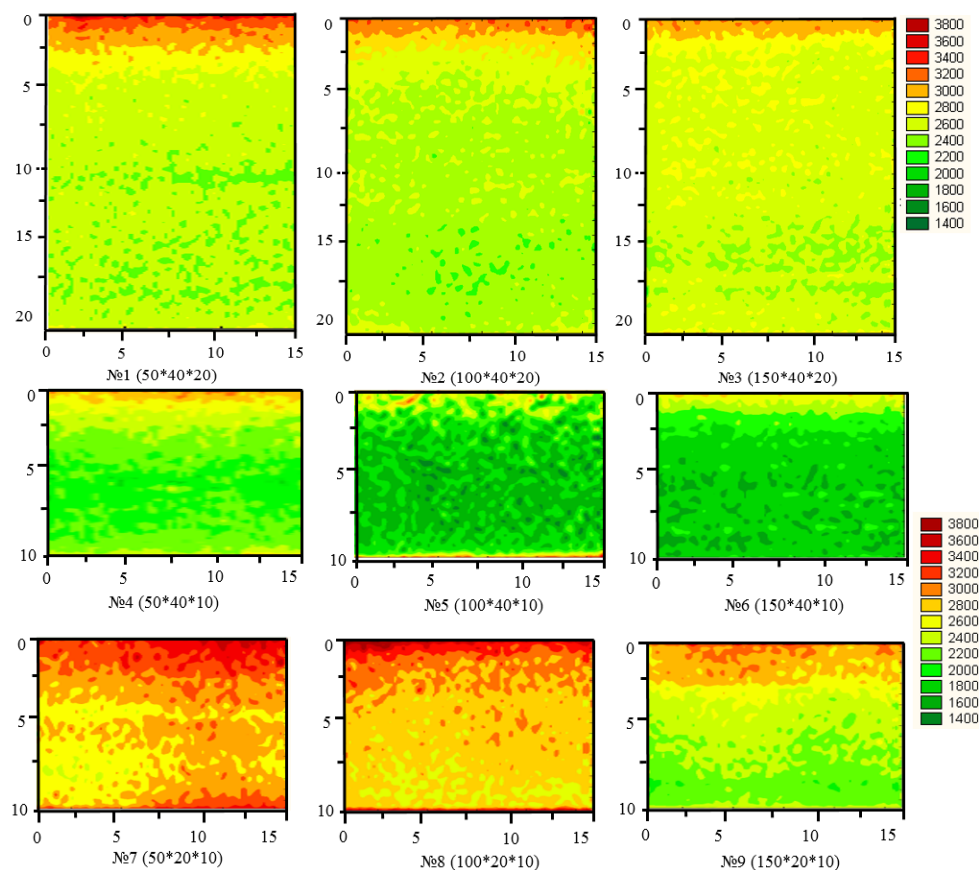


Рис. 3. Карты распределения микротвердости
Fig. 3. Microhardness distribution maps

Результаты. Изменение формы образцов

В результате исследования микротвердости в сечении образцов разных форм показали отличные результаты. Так, у образцов прямоугольной формы отмечено получение в поверхностном слое наибольшей степени упрочнения 38 % и глубины упрочнения 4 мм. Степень упрочнения цилиндрических и треугольных форм составила 32 и 25 %, а глубина упрочнения 2,8 и 2 мм, соответственно.

Карты распределения микротвердости в вырезанных сечениях после упрочнения образцов разных геометрических форм представлены на рисунке 3. На них явно видно влияние геометрических размеров на формируемое упрочнение, выполненное с одним и тем же режимом ВДУ (рис. 4).

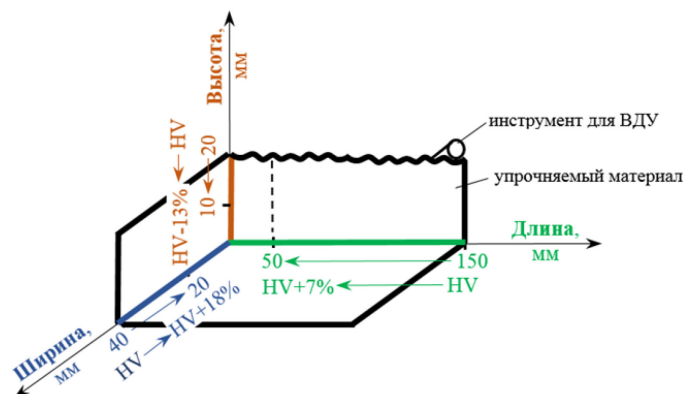


Рис. 4. Взаимосвязь между размерами образца и изменением микротвердости (HV) после ВДУ

Fig. 4. Relationship between sample size and change in microhardness (HV) after WSH

Изменение длины образцов

Так, после увеличения длины с 50 до 100 мм, в образцах с габаритными размерами (мм) 100×40×20; 100×40×10; 100×20×10 установлено уменьшение твердости, соответственно, на 7,2 %, 7,1 % и 5,9 %. В образцах 100×40×20 и 100×20×10 наблюдается упрочнение на всю толщину, минимально достижимая твердость составила 2400 МПа.

После увеличения длины до 150 мм, в образцах 150×40×20; 150×40×10; 150×20×10 твердость упала, соответственно, на 7,2 %, 7,1 % и 5,9 % и составила, соответственно, 3000 МПа, 2600 МПа и 3200 МПа. В образцах 150×40×20 и 150×20×10 наблюдается полное упрочнение, минимально достижимая твердость практически не изменилась и составила, соответственно, 2400 МПа и 2200 МПа.

Изменение толщины образцов

После увеличения толщины с 10 до 20 мм у образцов 50×40×20; 100×40×20; 150×40×20 возросла максимальная твердость, соответственно, на 12,5 %, 13,3 % и 13,3 %. Также, с увеличением толщины, в образцах 50×40×20; 100×40×20; 150×40×20

отмечено появление сплошного упрочнения всего поверхностного слоя, минимально достижимая твердость которого составила, соответственно, 2200 МПа, 2400 МПа и 2400 МПа.

Изменение ширины образцов

После увеличения ширины с 20 до 40 мм у образцов 50×40×10; 100×40×10;

150×40×10 твердость упала, соответственно, на 17,6 %, 18,7 % и 18,7 % и составила,

соответственно, 2800 МПа, 2600 МПа и 2600 МПа. Увеличение ширины с 20 до 40 мм в образцах 50×40×10; 100×40×10;

Заключение

1. Установлено, что при равных объемах и толщине образцов, одинаковых режимах ВДУ, прямоугольная форма обеспечивает большую степень упрочнения (до 38 %), чем треугольная (до 25 %) и цилиндрическая (до 32 %).

2. Установлено, что при равных объемах образцов и одинаковых режимах ВДУ, геометрические размеры обрабатываемого изделия оказывают влияние на формируемые параметры упрочнения поверхностного слоя. Установлено, что увеличение (рис.4):

– длины образцов с 50 до 150 мм в среднем приводит к падению их твердости на 6,7 %;

150×40×10 привело также и к уменьшению глубины упрочнения, соответственно, на 52 %, 85 % и 86 %.

– толщины образцов с 10 до 20 мм приводит к повышению их твердости в среднем на 13 %;

– ширины образцов с 20 мм до 40 мм приводит к снижению твердости в среднем на 18,3 %.

3. Установлено, что при рассмотрении возможности ВДУ крупногабаритных изделий, для получения адекватных (предсказуемых) результатов, предварительные исследования должны проводиться на образцах габаритными размерами не менее (д×ш×в) 150×40×20 мм. В случае обработки изделий размерами менее 150×40×20 мм необходимо делать коррекцию на результаты исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mailander R., Bawersfeeld W. Einfluss der probengrosse und probenform auf die dreh-schwingungsfestigkeit von stahl. technische mitteilungen krupp, H.5, S. 143, 1937.
2. Bautz W., Lehr E. aussprache zu den Vortragen F. Rotscher, W. Kuntze und E. Lehr. Bericht under die tagung des fachausschusses fur maschinenelemente in aachen, S. 29, 1935-1936.
3. Афанасьев Н.Н. Приближенный расчет коэффициента концентрации напряжений, Журнал технической физики, 1936, т. VI, вып.7, стр. 1153-1161.
4. Ужик Г.В. О влиянии абсолютных размеров деталей машин на их прочность. Сб. «Вопросы расчета и конструирования деталей машин», Изд. АН СССР, М., 1942. 190 с.
5. Сахонько И. М. Контактная выносливость закаленной стали в зависимости от геометрических параметров соприкасающихся тел. Ин-ститут машиноведения АН СССР, 1961, 12 с.
6. Баринов, С. В. Повышение сопротивления контактному выкрашиванию гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой : специальность 05.02.08 "Техноло-

гия машиностроения", 05.03.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Баринов Сергей Владимирович, Орловский государственный технический университет. Орел, 2009. 166 с. Место защиты: Орловский государственный технический университет. Текст: непосредственный.

7. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / И. Р. Асланян, С. В. Баринов, В. Ф. Безъязычный [и др.]. Том II. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – 584 с. – ISBN 978-5-8038-1739-0.
8. Киричек, А. В. Особенности влияния конечных размеров детали на распределение микротвердости в поверхностном слое при его упрочнении волной деформации / А. В. Киричек, С. В. Баринов, А. В. Яшин // Физика и технология наноматериалов и структур : сборник научных статей 2-й Международной научно-практической конференции: в 2-х томах, Курск, 24-26 ноября 2015 года. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2015. С. 165-170.

REFERENCES

1. Mailander R, Bawersfeeld W. Einfluss der probengrosse und probenform auf die dreh-schwingungsfestigkeit von stahl. technische mitteilungen krupp. 5:143, 1937.

2. Bautz W, Lehr E. Aussprache zu den Vortragen F. Rotscher, W. Kuntze und E. Lehr. Bericht under die tagung des fachausschusses fur maschinenelemente in Aachen. 29:1935-1936.

3. Afanasyev NN. Approximate calculation of the stress concentration coefficient. *Journ of Technical Physics*. 1936;VI(7):1153-1161.
4. Uzhik GV. On the influence of the absolute dimensions of machine parts on their strength. *Collection of scientific papers: Issues of Calculation and Design of Machine Parts*; 1942.
5. Sakhonko IM. Contact endurance of hardened steel depending on the geometric parameters of the contacting bodies. *Institute of Mechanical Engineering of the USSR Academy of Sciences*; 1961.
6. Barinov SV. Increasing resistance to contact staining by heterogeneous deformation hardening by

static-pulse treatment [dissertation]. [Orel (RF)]: Orel State Technical University; 2009.

7. Aslanyan IR, Barinov SV, Bezylazny VF. *Handbook on the processes of surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2022.
8. Kirichek AV, Barinov SV, Yashin AV. Features of the influence of the part final dimensions on the distribution of microhardness in the surface layer during its hardening by a deformation wave. *Collection of Scientific Articles of the 2nd International Scientific and Practical Conference, November 24-26, 2015: Physics and Technology of Nanomaterials and Structures*; Kursk: University Book; 2015.

Информация об авторе:

Баринов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета, ID ORCID 0000-0002-1341-446X; тел: (49234) 7-71-41.

Barinov Sergey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Vladimir State University, ID ORCID 0000-0002-1341-446X; phone: (49234) 7-71-41.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 26.07.2024; одобрена после рецензирования 30.07.2024; принята к публикации 26.08.2024. Рецензент – Киричек А.В., доктор технических наук, профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 26.07.2024; approved after review on 30.07.2024; accepted for publication on 26.08.2024. The reviewer is Kirichek A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Long-term Development at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.