

УДК 621.787

DOI: 10.30987/article_5c3db110295005.79568346

А.Н. Афонин, А.И. Ларин, А.В. Макаров, Е.М. Мартынов

ГЕТЕРОГЕННАЯ РЕЖУЩЕ-ДЕФОРМИРУЮЩАЯ ОБРАБОТКА ППД ВОЛНИСТОГО РЕЛЬЕФА

Предложено использовать для повышения эксплуатационных свойств точных и нежестких деталей комбинированную режущо-деформирующую обработку поверхностным пластическим деформированием, позволяющую формировать гетерогенную структуру поверхностного слоя. Проведено моделирование гетерогенного

упрочнения режущо-деформирующей обработкой ППД методом конечных элементов в программе DEFORM 2D.

Ключевые слова: гетерогенное упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, ППД, режущо-деформирующая обработка, метод конечных элементов.

A.N. Afonin, A.I. Larin, A.V. Makarov, E.M. Martynov

WAVY TOPOGRAPHY HETEROGENEOUS CUTTING AND DEFORMING TREATMENT WITH SURFACE-PLASTIC DEFORMATION

To increase the operating ability of precise and flexible parts there is offered for use a combined cutting and deforming treatment with surface plastic deformation (SPD) allowing the formation of heterogeneous structures in a surface layer. The method consists in running a wavy topography cut on a blank.

The simulation of heterogeneous strengthening by a cutting and deforming treatment with SPD through a finite element method in DEFORM 2D program is carried out. With the aid of the simulation it is

established that the most efficient is triangle topography cutting with a right angle before SPD topography ensuring the highest deformation in the surface layer of the blank to be strengthened, and hence, strengthening at rolling-ins absence. The experimental investigations confirming simulation results are carried out.

Key words: heterogeneous strengthening, surface-plastic deformation, SPD, cutting deformation, cutting and surface treatment, finite element method.

Установлено, что добиться существенного повышения эксплуатационных свойств деталей машин можно с помощью формирования на их рабочих поверхностях гетерогенной структуры, состоящей из чередующихся участков высокой и низкой твердости [1-3]. Наличие в поверхностном слое твердых упрочненных участков, чередующихся с менее упрочненными вязкими, способствует торможению развития микротрещин и, следовательно, повышению усталостной прочности материала [1; 2]. При абразивном изнашивании поверхности твердые включения в пластичной основе затрудняют контакт абразивных частиц с материалом основы, что позволяет многократно увеличить износостойкость по сравнению с равномерно упрочненным поверхностным слоем [3].

Известно, что существенно повысить усталостную прочность деталей машин можно с помощью обработки поверхностным пластическим деформированием

(ППД) [4; 5]. Особенно эффективным является применение гетерогенного упрочнения ППД [2; 4]. Для получения гетерогенных структур при упрочнении точных и нежестких деталей целесообразно использовать комбинированную режущо-деформирующую обработку ППД [6]. При реализации режущо-деформирующей обработки ППД на упрочняемой поверхности заготовки вначале нарезается волнистый рельеф (рис. 1). Затем деталь подвергается обкатыванию гладким цилиндрическим роликом с целью сглаживания рельефа и формирования гладкой рабочей поверхности детали. При деформировании металл перемещается роликом из выступов нарезанного рельефа во впадины. Рельеф на заготовке при этом располагается относительно номинального размера детали таким образом, чтобы объем его выступов был равен объему впадин.

Степень и равномерность упрочне-

ния при режуще-деформирующей обработке ППД будут зависеть от параметров волнистого рельефа: его формы, шага P , высоты h . Влияние размеров деформирующего инструмента менее значительно. С точки зрения технологии нарезания наиболее предпочтительными являются профили рельефа треугольной и круглой формы.

Эквивалентные деформации при ППД волнистого рельефа с различной формой профиля, полученные при моделировании процесса с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [7], приведены на рис. 2. Для моделирования ППД с помощью МКЭ использовалась программа DEFORM 2D.

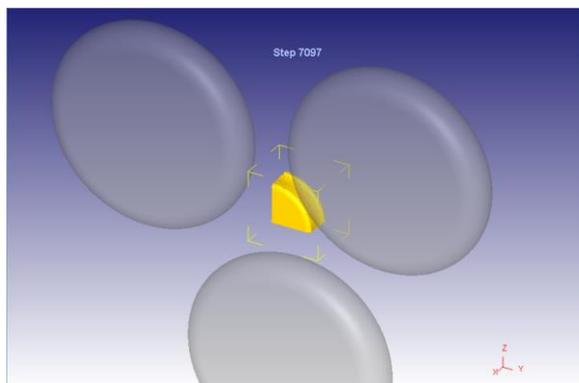
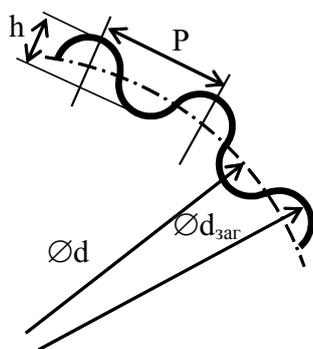


Рис. 1. Схема гетерогенного упрочнения режуще-деформирующей обработкой ППД

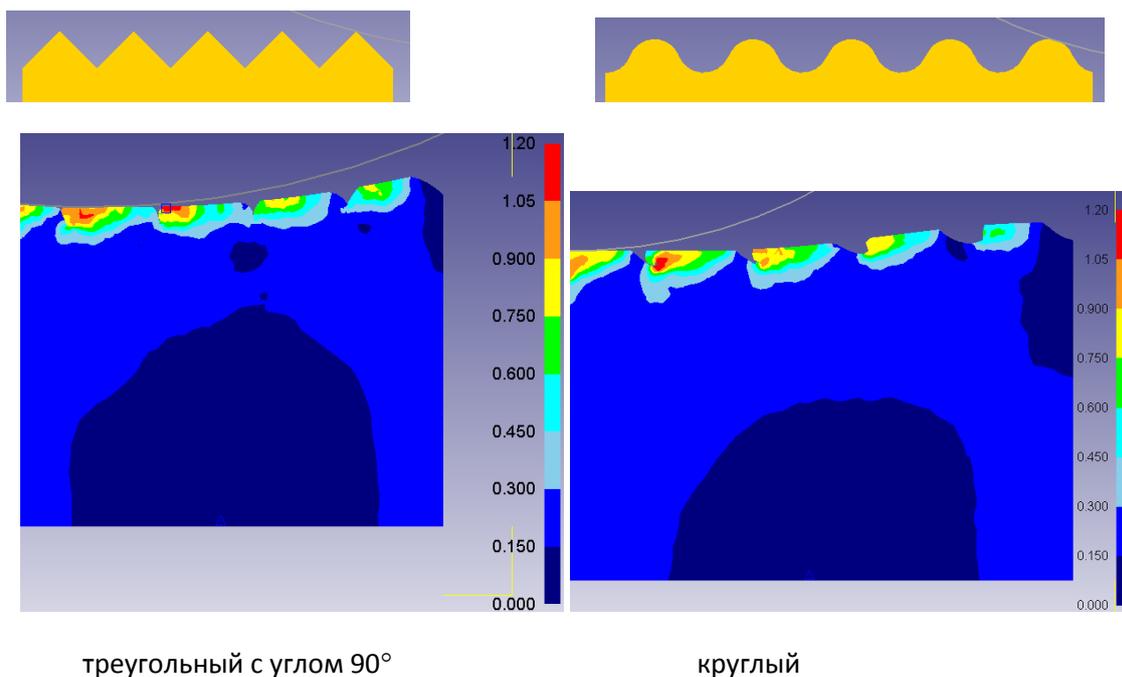


Рис. 2. Эквивалентные деформации при ППД волнистого рельефа с различной формой профиля

Механические свойства материала модели (сталь 45) заданы выбором соответствующей диаграммы пластичности из встроенной базы DEFORM. Скорость накатывания при моделировании составляла 5 мм/с. Диаметр инструмента был принят равным 10 мм, шаг нарезаемого рельефа - 1 мм. Поскольку деформации от резания значительно меньше деформаций, возникающих при пластическом деформи-

ровании [8], предварительное моделирование нарезания не производилось, а форма нарезанного профиля задавалась соответствующей начальной геометрией заготовки.

Распределение эквивалентных деформаций на глубине 0,1 мм под поверхностью детали при обкатывании круглого и треугольного профиля для 4 крайних левых витков (рис. 2) приведено на рис. 3. Из

рис. 2 и 3 видно, что треугольный профиль обеспечивает большую степень деформации и, следовательно, упрочнения по сравнению с круглым. Наибольшая степень деформации при этом обеспечивается более острым профилем. Однако при обкатывании острого профиля возможно образование на поверхности заготовки складок - закатов. В связи с этим наиболее предпочтительным для гетерогенного упрочнения режуще-деформирующей обработкой ППД

представляется использование предварительно нарезанного рельефа треугольного профиля с углом 90° . Шаг рельефа не должен превышать 1,5 мм, а высота - 0,7 мм. Наружный диаметр заготовки может быть предварительно рассчитан исходя из равенства объемов до и после деформирования, а затем уточнен путем обкатывания пробной ступенчатой заготовки [9; 10].

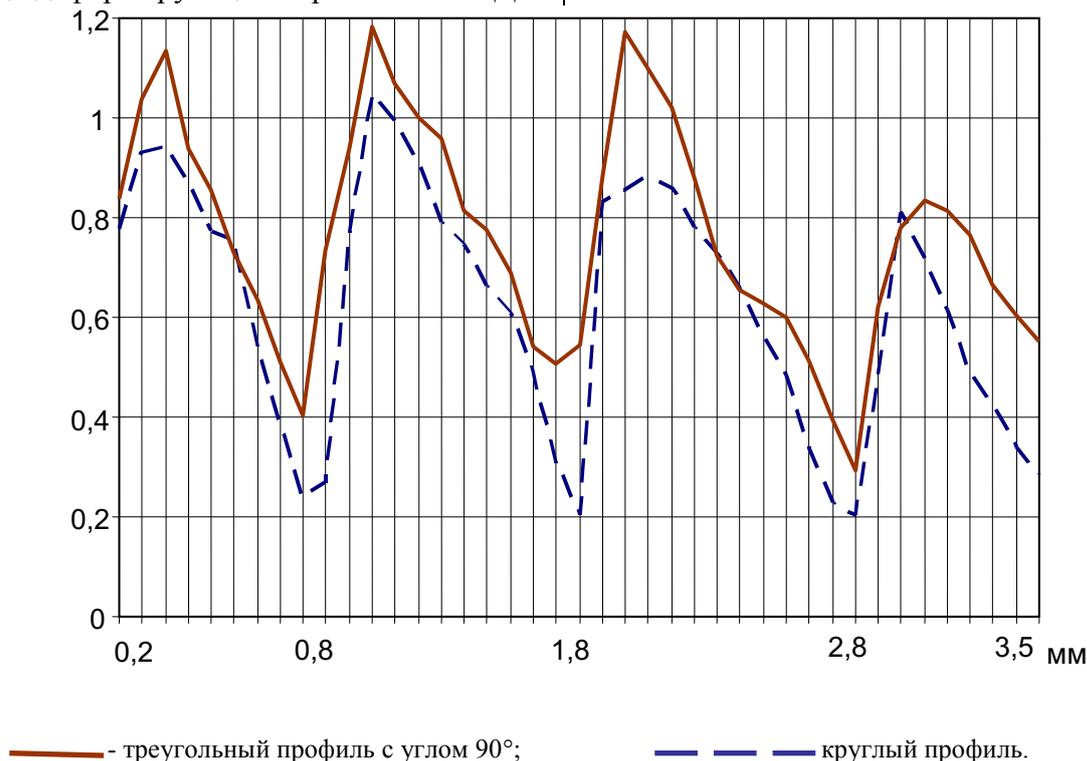


Рис. 3. Распределение эквивалентных деформаций на глубине 0,1 мм под поверхностью образца

Для проведения экспериментальных исследований технологических процессов упрочнения ППД разработана и изготовлена экспериментальная накатная головка (рис. 4). Головка имеет три равномерно расположенных по окружности свободно вращающихся деформирующих ролика. Благодаря этому в головке создается замкнутая система сил, обеспечивающая отсутствие изгиба нежестких заготовок и передачи сил деформирования на шпиндель станка. Диапазон возможных диаметров заготовок составляет 10...60 мм. Настройка головки на размер производится подбором диаметров роликов. Головка может использоваться на станках сверлильной и токарной групп.



Рис. 4. Экспериментальная накатная головка на токарном станке

Фотография (с увеличением в 10 раз) нарезанного на образце диаметром 20 мм треугольного рельефа с шагом 1 мм и углом профиля 60° до и после обкатывания

экспериментальной головкой приведена на рис. 5. Геометрия поверхности в целом соответствует полученной при моделировании процесса с помощью МКЭ. В частности, результаты натурального эксперимента

подтверждают предположение о том, что обкатывание остроугольного профиля может приводить к образованию на поверхности заготовки закатов.

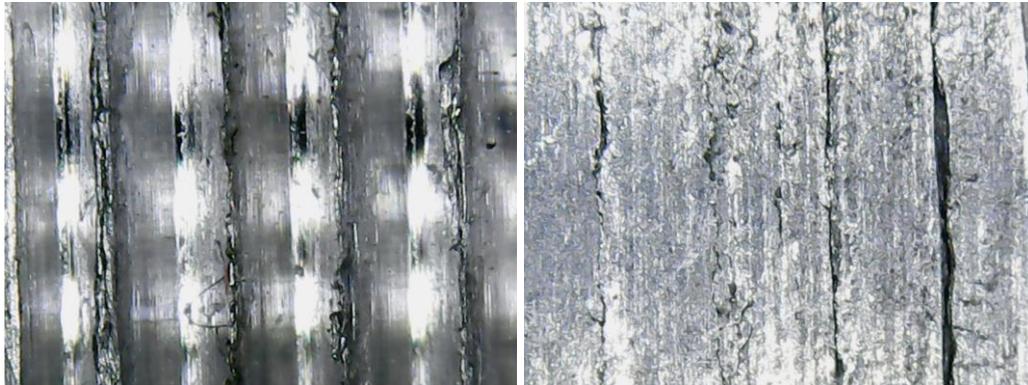


Рис. 5. Нарезанный на образце рельеф до и после обработки ППД (увеличено в 10 раз)

Профилограмма поверхности образца после обкатывания представлена на рис. 6. Шероховатость поверхности R_a после ППД треугольного рельефа составляет по-

рядка 2 мкм. Волнистость получаемой после обкатывания поверхности незначительна. Данные результаты следует признать удовлетворительными.

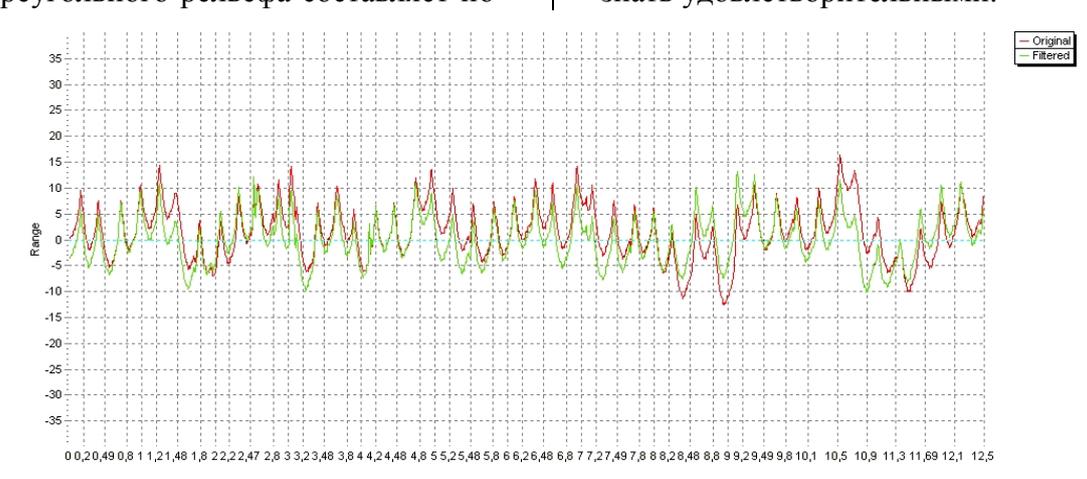


Рис. 6. Профилограмма поверхности образца после обкатывания

В результате проведенных исследований разработаны и апробированы инструмент, оснастка и технология гетерогенного упрочнения цилиндрических поверхностей режуще-деформирующей обработкой ППД. Основными размерами заготовки при данном виде обработки являются шаг и высота нарезанного рельефа и наружный диаметр заготовки. Наиболее предпочтительным для гетерогенного упрочнения режуще-деформирующей обработкой ППД представляется использование предварительно нарезанного релье-

фа треугольного профиля с углом 90° и шагом до 1,5 мм.

Экспериментальные исследования режуще-деформирующей обработки ППД доказали возможность ее реализации и подтвердили адекватность моделирования процесса с помощью МКЭ.

Выполнение приведенных рекомендаций позволит обеспечить существенное (до полутора раз) повышение усталостной прочности тяжело нагруженных поверхностей деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, Г.П. Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макро-структуры / Г.П. Иванов, Л.В. Картонова, А.А. Худошин // *Строительные и дорожные машины*. - 1997. - № 1. - С. 33-34.
2. Киричек, А.В. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // *СТИН*. - 2007. - № 12. - С. 28-31.
3. Смелянский, В.М. Технологическое повышение износостойкости деталей методом электроэрозионного синтеза покрытий / В.М. Смелянский, В.А. Земсков // *Упрочняющие технологии и покрытия*. - 2005. - № 1. - С. 27-35.
4. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004. - 288 с. - (Б-ка технолога).
5. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2 т. / под общ. ред. А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение, 2014.
6. Афонин, А.Н. Гетерогенное упрочнение деталей горно-металлургических машин поверхностным пластическим деформированием / А.Н. Афонин, А.И. Ларин, А.В. Макаров // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. - 2015. - Т. 58. - № 11. - С. 823-828.
7. Mohammadi, F. Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process / F. Mohammadi, R. Sedaghati, A. Bonakdar // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2014. - Vol. 70. - Is. 5-8. - P. 1337-1354.
8. Киричек, А.В. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки: кол. моногр. / А.В. Киричек, С.К. Амбросимов, А.Р. Ингеманссон [и др.]; под ред. А.В. Киричека. - М.: Спектр, 2011. - 328 с.
9. Киричек, А.В. Резьбонакатывание / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. - М.: Машиностроение, 2009. - 312 с. - (Б-ка технолога).
10. Лапин, В.В. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев / В.В. Лапин, М.И. Писаревский, В.В. Самсонов, Ю.И. Сизов. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. - 228 с.
1. Ivanov, G.P. Parts wear-resistance increase by formation of regular heterogeneous structure / G.P. Ivanov, L.V. Kartonova, A.A. Khudoshin // *Construction and Road Machinery*. - 1997. - No.1. - pp. 33-34.
2. Kirichek, A.V. Heterogeneous structure formation in material by static-pulse processing / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov // *STIN*. - 2007. - No.12. - pp. 28-31.
3. Smelyansky, V.M. Wear-resistance increase in parts by coating electro-erosion synthesis / V.M. Smelyansky, V.A. Zenskov // *Ordering Technologies and Coatings*. - 2005. - No.1. - pp. 27-35.
4. Kirichek, A.V. *Technology and Equipment of Static-Pulse Processing with Surface Plastic Deformation* / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, A.G. Lazutkin. - M.: Mechanical Engineering, 2004. - pp. 288. - (Technologist's Library).
5. *Finish-Strengthening Technology and Tools of Parts with Surface-Plastic Deformation*: reference book: in 2 Vol. / under the general editorship of A.G. Suslov. - M.: Mechanical Engineering, 2014.
6. Afonin, A.N. Heterogeneous strengthening of mining machines by surface plastic deformation / A.N. Afonin, A.I. Larin, A.V. Makarov // *College Proceedings. Ferrous Metallurgy*. - 2015. - Vol.58. - No.11. - pp. 823-828.
7. Mohammadi, F. Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process / F. Mohammadi, R. Sedaghati, A. Bonakdar // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2014. - Vol. 70. - Is. 5-8. - P. 1337-1354.
8. Kirichek, A.V. *Efficient Technologies of Burnishing, Broaching and Deformation-Cutting Treatment*: authors' group monograph / A.V. Kirichek, S.K. Ambrosimov, A.R. Ingemansson [et al.]; under the editorship of A.V. Kirichek. - M.: Spectrum, 2011. - pp. 328.
9. Kirichek, A.V. *Thread Rolling* / A.V. Kirichek, A.N. Afonin. - M.: Mechanical Engineering, 2009. - pp. 312. - (Technologist's Library)
10. Lapin, V.V. *Thread-, Worm-, Slot- and Teeth Rolling* / V.V. Lapin, M.I. Pisarevsky, V.V. Samsonov, Yu.I. Sizov. - L.: Mechanical Engineering, Leningrad Branch, 1986. - pp. 228.

Статья поступила в редакцию 10.10.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Белгородского государственного
технического университета им. Шухова
Дуюн Т.А.

Статья принята к публикации 25.12.18.

Сведения об авторах:

Афонин Андрей Николаевич, д.т.н., профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий НИТУ «БелГУ», г. Белгород, e-mail: afonin@bsu.edu.ru.

Ларин Анатолий Иванович, аспирант кафедры ТОММ СТИ НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол, e-mail: larin.a.i@yandex.ru.

Afonin Andrey Nikolaevich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Science of Materials and nano-Technologies RU "BelSU", Belgorod, e-mail: afonin@bsu.edu.ru.

Larin Anatoly Ivanovich, Post graduate student of the Dep. "ТОММСТИ НИТУ" "MISIS", Sary Oskol, e-mail: larin.a.i@yandex.ru.

Макаров Алексей Владимирович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой ТОММ СТИ НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол, e-mail: makarov.av@mail.ru.

Мартынов Евгений Михайлович, аспирант кафедры ТОММ СТИ НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол, e-mail: larin.a.i@yandex.ru.

Makarov Alexey Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Head of the Dep. ТОММ СТИ НИТУ", "MISIS", Sary Oskol, e-mail: makarov.av@mail.ru.

Martynov Evgeny Mikhailovich, Post graduate student of the Dep. "ТОММ СТИ НИТУ", "MISIS", Sary Oskol, e-mail: larin.a.i@yandex.ru.