

ГЕТЕРОГЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ*

*Афонин А.Н., д.т.н., профессор кафедры технологии и оборудования
в металлургии и машиностроении (af@au.ru)*

*Ларин А.И., старший преподаватель кафедры технологии и оборудования
в металлургии и машиностроении*

*Макаров А.В., к.т.н., доцент, зав. кафедрой технологии и оборудования
в металлургии и машиностроении*

**Старооскольский технологический институт, филиал ННТУ «МИСиС»
(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42)**

Аннотация. Установлено, что повысить эксплуатационные характеристики деталей горно-металлургических машин можно путем формирования гетерогенно-упрочненного поверхностного слоя. Рассмотрены методы формирования гетерогенной структуры поверхностным пластическим деформированием (ППД). Указана важность выявления характера влияния параметров гетерогенно упрочненного слоя на эксплуатационные характеристики деталей машин. Проведено моделирование процесса гетерогенного упрочнения ППД методом конечных элементов. Даны рекомендации по применению гетерогенного упрочнения ППД для упрочнения тяжело нагруженных деталей. Установлено, что применение различных способов ППД позволяет в широких пределах варьировать степень, глубину и равномерность упрочнения деталей машин. При этом срок службы ответственных тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях усталостного нагружения, за счет гетерогенного упрочнения их поверхностного слоя может быть увеличен в 1,5 раза и более.

Ключевые слова: гетерогенное упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, усталостная прочность, моделирование, метод конечных элементов, горно-металлургические машины, качество.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-11-823-827

Горно-металлургические машины работают в весьма тяжелых условиях и имеют большое количество деталей, подвергающихся усталостному нагружению. Примерами подобных деталей являются детали редукторов и передач, резьбовые соединения, валки и др. Установлено [1 – 3], что значительное повышение эксплуатационных свойств деталей машин может быть достигнуто путем формирования на их рабочих поверхностях чередующихся участков высокой и низкой твердости – гетерогенной структуры. Чередование в гетерогенном слое упрочненных твердых участков с менее упрочненными вязкими способствует торможению развития микротрещин и повышению усталостной прочности материала [1]. 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].

Известен успешный опыт формирования гетерогенных структур методами химико-термической обработки, комбинированной с другими методами физи-

ко-химического воздействия [1], а также нанесением покрытий [3]. В то же время, одним из наиболее эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик деталей машин является упрочнение их с помощью поверхностного пластического деформирования (ППД) [4 – 6]. Широкие технологические возможности ППД позволяют с его помощью получать гетерогенно упрочненные структуры. При этом для получения гетерогенно упрочненных структур могут быть использованы различные методы ППД.

Гетерогенно упрочненная структура может быть получена применением динамических (ударных) методов ППД, в частности статико-импульсной обработки (СИО) [7]. Статико-импульсная обработка осуществляется в условиях сочетания периодического динамического и постоянного статического воздействия деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность. Динамическое (ударное) воздействие позволяет создавать большие напряжения в пятне контакта инструмента и заготовки при сравнительно небольшой затраченной мощности, а статический поджим способствует более эффективной передаче ударного импульса в обрабатываемую поверхность. Для генерации ударных импульсов при СИО может использоваться

* Исследования проводятся в рамках государственного задания 723.

гидравлический генератор ударных импульсов [7], отличающийся высоким КПД. Нагружение инструмента с помощью ударной системы, состоящей из бойка и волновода, позволяет формировать импульсы заданной формы, что обеспечивает оптимальные условия для протекания процесса пластической деформации. Глубина упрочнения при СИО может достигать 10 мм и более при степени упрочнения до 100 % и более [7, 8].

Сравнение результатов исследования сопротивления контактной усталостной износу поверхности образцов, представляющих собой цилиндрические ролики диаметром 40 мм с витками кольцевой резьбы, изготовленные из стали 40Х и подвергнутых СИО, с аналогичными исследованиями износа образцов, полученных накатыванием со статическим нагружением инструмента и шлифованных, показало, что износостойкость образцов, полученных СИО, в 1,7 раза выше, чем накатанных, и в 3,1 раза выше, чем шлифованных (рис. 1).

Сравнительная объемная усталостная прочность цилиндрических образцов из стали 40Х, диаметром 17 мм и длиной 225 мм, на которых имелась шейка диаметром 11 мм с двумя кольцевыми канавками треугольного профиля углом 90° и шагом 2 мм, полученными различными методами, приведена на рис. 2. Из диаграммы видно, что СИО обеспечивает выносливость в 1,2 раза больше, чем накатывание с радиальной подачи и в 2,8 раза больше, чем нарезание резцом.

При упрочнении СИО и другими динамическими способами ППД, упрочненный слой формируется в результате нанесения множества пластических отпечатков с заданным перекрытием. Поэтому степень, глубина и равномерность наклепа поверхностного слоя будет зависеть от размеров пластических вмятин и от степени (коэффициента) их перекрытия [2, 7, 9]

$$K = 1 - \frac{s}{\delta f 60},$$

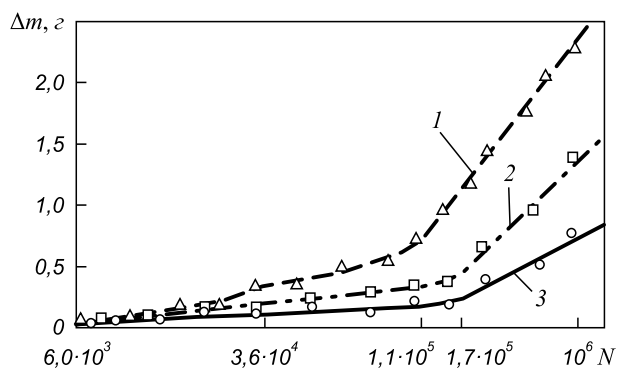


Рис. 1. Зависимость изменения массы образцов от количества циклов нагружения при контактом износе:
1 – шлифование; 2 – накатывание; 3 – СИО

Fig. 1. Dependence of changes of samples weight from the number of loading cycles in contact wear:

1 – grinding; 2 – roll forming; 3 – static-pulse processing

где s – скорость подачи, мм/мин; f – частота ударов, Гц; δ – размер пластического отпечатка, мм.

Диапазон изменения K составляет от $-\infty$ до 1, однако практическое значение имеет варьирование K в диапазоне $-1 \leq K \leq 1$.

Выявить характер распределения полей напряжений и деформаций при пластическом деформировании можно с помощью моделирования процесса методом конечных элементов (МКЭ) [10 – 15]. При моделировании инструмент принимается идеально жестким телом, заготовка жестко-пластичной. Закон упрочнения материала заготовки задается в виде мультимодальной зависимости.

На рис. 3 показаны поля эквивалентных деформаций в упрочненной СИО поверхности заготовки из стали 45, полученные путем моделирования. Распределение эквивалентных деформаций позволяет судить о степени упрочнения деформированной детали. Полученные результаты с достаточной степенью точности соответствуют результатам экспериментальных исследований [8].

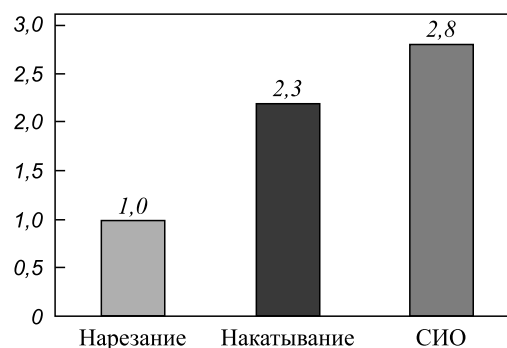


Рис. 2. Сравнительная усталостная прочность образцов, имеющих концентратор напряжений, полученный различными методами

Fig. 2. Comparative fatigue strength of samples with concentrator of stresses produced by different methods

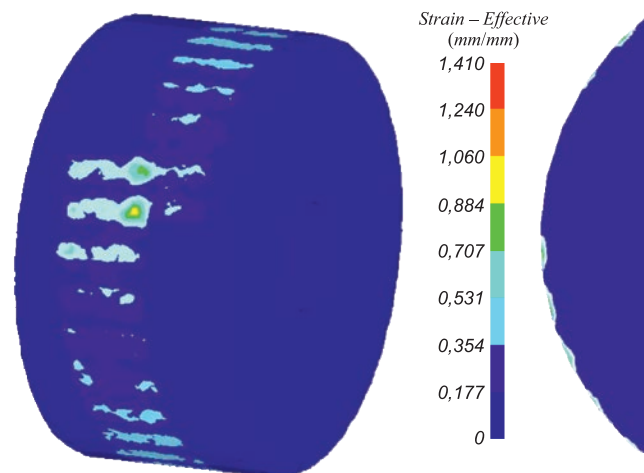


Рис. 3. Эквивалентные деформации при СИО ППД ($K = 0$)

Fig. 3. Equivalent strain at static-pulse processing at a SPD ($K = 0$)

Количественно равномерность упрочнения может быть определена по графику распределения эквивалентных деформаций под упрочненной СИО поверхностью, используя понятие опорной длины кривой упрочнения (по аналогии с опорной длиной шероховатости поверхности на профилограмме). Пример такого графика распределения эквивалентных деформаций на глубине 0,2 мм в упрочненной СИО цилиндрической заготовке из стали 45 представлен на рис. 4.

Управлять степенью, глубиной и равномерностью упрочнения при СИО можно с помощью энергии и частоты деформирующих импульсов, скорости подачи заготовки и размеров деформирующего инструмента (для роликов – диаметра и длины).

Существенным недостатком динамических методов ППД, в том числе и СИО, является сложность их практической реализации, связанная с необходимостью применения специального дорогостоящего оборудования. Кроме того, применение динамических методов ППД затруднительно при упрочнении точных и нежестких деталей. Данных недостатков лишены методы ППД со статическим нагружением инструмента. В связи с этим, для получения гетерогенных структур при упрочнении

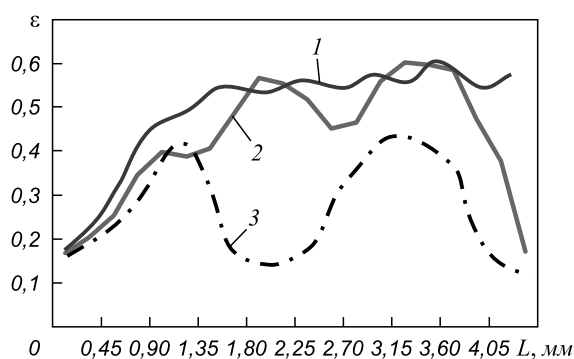


Рис. 4. Распределение эквивалентных деформаций под упрочненной СИО поверхностью при K :
1 – 0,5; 2 – 0; 3 – (–1)

Fig. 4. The distribution of equivalent strain under surface hardened by static-pulse processing K :
1 – 0,5; 2 – 0; 3 – (–1)

точных и нежестких деталей можно использовать комбинированную режуще-деформирующую обработку.

При реализации режуще-деформирующей обработки ППД на упрочняемой поверхности детали формируется волнистый рельеф в направлении, перпендикулярном направлению главного движения (рис. 5). Затем деталь подвергается пластическому деформированию с целью формирования гладкой поверхности. Деформирование должно осуществляться накатниками с жестко закрепленными роликами, выставленными на номинальный размер упрочняемой поверхности ($d_{\text{ном}}$ на рис. 5).

Конструкция многороликового накатника может быть выполнена таким образом, чтобы создать замкнутую систему сил, исключаящую изгиб нежесткой заготовки. При деформировании металл перемещается роликами из выступов нарезанного рельефа во впадины. Рельеф при этом располагается относительно номинального размера таким образом, чтобы объем выступов был равен объему впадин. Степень и равномерность упрочнения будут зависеть от параметров волнистого рельефа: шага P , высоты h и формы. Влияние формы и размеров инструмента менее значительно.

Шаг рельефа при ППД не должен превышать 1 мм, а высота 0,5 мм. Чем больше высота рельефа, тем выше неравномерность упрочнения, однако при деформировании чрезмерно острого рельефа возможно образование складок-закатов.

Волнистый рельеф может нарезаться резцом на металлорежущих станках, имеющих возможность автоматизации радиального перемещения инструмента: токарных станках с числовым программным управлением, токарно-затыловочных станках и др. При этом для управления параметрами рельефа желательно наличие жесткой кинематической связи между главным движением и движениями подачи. Сообщение резцу радиальной и осевой подачи позволит обеспечить требуемую неравномерность упрочнения в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях.

Результаты моделирования ППД волнистого рельефа шагом 0,5 мм на заготовке из стали 45 показаны

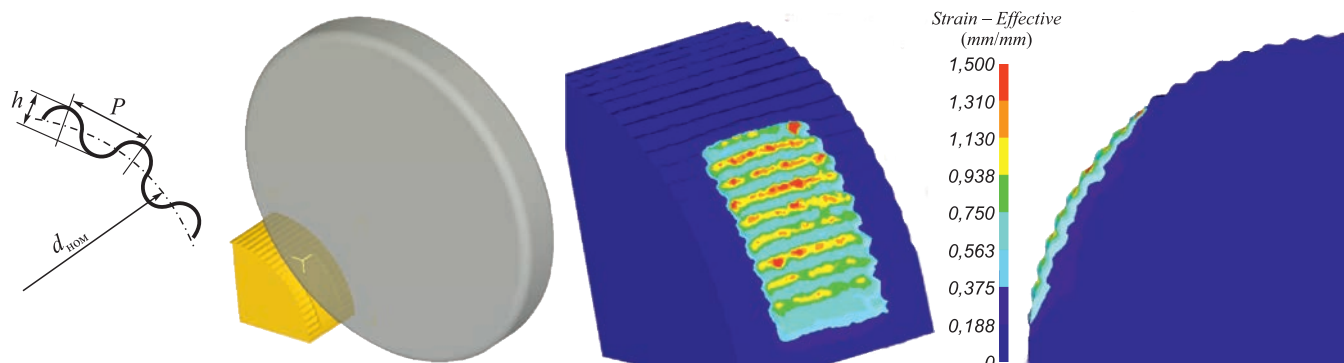


Рис. 5. Эквивалентные деформации при ППД волнистого рельефа

Fig. 5. Equivalent strain at SPD of undulating terrain

на рис. 5. Из приведенных полей деформаций можно сделать вывод о том, что максимальная глубина и степень упрочнения при ППД волнистого рельефа соответствует глубине и степени упрочнения при ППД со статическим нагружением инструмента гладких поверхностей. Силы деформирования при этом несколько ниже.

Гетерогенное упрочнение может быть получено не только при упрочнении ППД, но при поверхностном пластическом формообразовании, например получении резб и зубьев СИО или режуще-деформирующей обработкой с выборочной схемой деформирования [16].

Таким образом, применение различных способов ППД позволяет в широких пределах варьировать степень, глубину и равномерность упрочнения деталей машин. Существующие методы гетерогенного упрочнения ППД могут быть использованы для повышения эксплуатационных характеристик самых разнообразных деталей горно-металлургического оборудования, работающих в различных условиях. При этом срок службы ответственных тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях усталостного нагружения, за счет гетерогенного упрочнения их поверхностного слоя может быть увеличен в 1,5 раза и более.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов Г.П., Картонова Л.В., Худошин А.А. Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макроструктуры // Строительные и дорожные машины. 1997. № 1. С. 33 – 34.
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой // СТН. 2007. № 12. С. 28 – 31.
3. Смелянский В.М., Земсков В.А. Технологическое повышение износостойкости деталей методом электроэрозионного синтеза покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 27 – 35.
4. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
5. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безязычный, Ю.В. Панфилов и др. / Под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
6. Hogan B. Longer Life with Low Plasticity Burnishing // Manufacturing Engineering, Dec. 2001. P. 34 – 38.
7. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
8. Бушенин Д.В., Киричек А.В., Афонин А.Н. Сравнение твердости резбовых профилей, полученных пластическим деформированием различными методами // Вестник машиностроения. 1999. № 10. С. 40 – 43.
9. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В. Разработка параметров для описания гетерогенно-упрочненной структуры // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 1/285. С. 63 – 66.
10. Киричек А.В., Афонин А.Н. Исследование напряженно деформированного состояния резбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов // СТН. 2007. № 7. С. 21 – 25.
11. Chang Y. Y. Modeling of metal cutting and ball burnishing – prediction of tool wear and surface properties. PhD Thesis. – Ohio State University, 2004. – 282 p.
12. Dixit P.M., Dixit U.S. Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods – London: Springer – Verlag, 2008. – 599 p.
13. Kattan P.I., Voyiadjis G.Z. Damage Mechanics with Finite Elements. – Berlin: Springer, 2001. – 113 p.
14. Klocke F., Bäcker V., Wegner H., A. Timmer A. Innovative FE-analysis of the roller burnishing process for different geometries // X International Conference on Computational Plasticity, CIMNE, Barcelona, 2009. P. 1 – 4.
15. Mohammadi F., Sedaghati R., Bonakdar A. Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. February. Vol. 70. Issue 5 – 8. P. 1337 – 1354.
16. Афонин А.Н. Схемы деформирования при режуще-деформирующей обработке резб // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2/292. С. 3 – 8.

Поступила 3 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 11, pp. 823–827.

HETEROGENEOUS HARDENING OF MACHINES PARTS BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION

A.N. Afonin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering” (af@au.ru)

A.I. Larin, Senior Lecturer of the Chair “Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering”

A.V. Makarov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering”

Sary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS” (42, Makarenko, Sary Oskol, Belgorod Region, 309516, Russia)

Abstract. The operational characteristics of the components of mining and metallurgical machinery can be improved by forming the heteroge-

neous-hardened surface layer. The article considers the forming methods of heterogeneous structure by surface plastic deformation (SPD). The importance of identifying the nature of the influence of parameters of heterogeneous hardened layer on the performance of machine parts are indicated. Modeling of the process of heterogeneous hardening of SPD of the finite element method was executed. The authors give recommendations about application of heterogeneous hardening of SPD for hardening the heavy-duty parts. It was found that the use of different methods of SPD allows widely vary the degree of depth and the uniformity of the hardening of machine parts. Therefore, this increase in operation life of responsible highly loaded parts operating under fatigue loading due to hardening of the heterogeneous surface layer may reach 1.5 times or more.

Keywords: heterogeneous hardening, surface plastic deformation, fatigue strength, simulation, finite elements, mining and metallurgical machinery, quality.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-11-823-827

REFERENCES

1. Ivanov G.P., Kartanova L.V., Khudoshin A.A. Increase of wear resistance of parts by creating a regular heterogeneous macrostructure. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 1997, no. 1, pp. 33–34. (In Russ.).
2. Kirichek A.V., Solov'ev D.L. Creating heterogeneous surface structures by static-pulsed treatment. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 3, pp. 277–279.
3. Smelyanskii V.M., Zemskov V.A. Technological improvement of wear resistance of parts by electroerosion synthesis of fusion coating. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2005, no. 1, pp. 27–35. (In Russ.).
4. Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: Spravochnik* [Hardening and finishing of details by surface plastic deformation: Reference book]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987. 328 p. (In Russ.).
5. Suslov A.G., Bez'yazychnyi V.F., Panfilov Yu.V. etc. *Inzheneriya poverkhnosti detalei* [Engineering of details surface]. Suslov A.G.ed. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008. 320 p. (In Russ.).
6. Hogan B. Longer Life with Low Plasticity Burnishing. *Manufacturing Engineering*, Dec. 2001, pp. 34–38.
7. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Lazutkin A.G. *Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impul'snoi obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Biblioteka tekhnologa* [Technology and equipment for static pulse processing by surface plastic deformation. The library of technician]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004. 288 p. (In Russ.).
8. Bushenin D.V., Kirichek A.V., Afonin A.N. The comparison of hardness of threaded profiles obtained by various methods of plastic deformation. *Vestnik mashinostroyeniya*, 1999, no. 10, pp. 40–43. (In Russ.).
9. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Barinov S.V. The design of parameters for description of the heterogeneously hardened structure. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2011, no. 1/285, pp. 3–66. (In Russ.).
10. Kirichek A.V., Afonin A.N. Investigation of stress strain state of thread rolling tool and blank by finite element method. *STIN*. 2007, no. 7, pp. 21–25. (In Russ.).
11. Chang Yen Yung. *Modeling of metal cutting and ball burnishing – prediction of tool wear and surface properties. Yen Yung Chang. – PhD Thesis*. Ohio State University, 2004. 282 p.
12. Dixit P.M., Dixit U.S. *Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods*. London: Springer–Verlag, 2008. 599 p.
13. Kattan P.I., Voyiadjis G.Z. *Damage Mechanics whit Finite Elements*. Berlin: Springer, 2001. 113 p.
14. Klocke F., Bäcker V., Wegner H., Timmer A. *Innovative FE-analysis of the roller burnishing process for different geometries*. X International Conference on Computational Plasticity, CIMNE, Barcelona, 2009, pp. 1–4.
15. Mohammadi F., Sedaghati R., Bonakdar A. Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, February 2014, Volume 70, Issue 5–8, pp. 1337–1354.
16. Afonin A.N. Schemes of deformation at cutting-deforming processing of threads. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2012, no. 2/292, pp. 3–8. (In Russ.).

Acknowledgements. The research were carried out in the framework of the state task no. 723.

Received December 3, 2014