

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.787.6.004

doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-18-23

ВОЗМОЖНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ВОЛНЫМ ДЕФОРМАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Андрей Викторович Киричек^{1✉}, Дмитрий Львович Соловьев², Александр Васильевич Яшин³, Сергей Александрович Силантьев⁴, Анастасия Олеговна Фони́на⁵

¹ Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

^{2,3,4,5} Владимирский государственный университет, Муром, Россия

¹ avkbgtu@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

² murstin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4475-319X>

³ yashin2102@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3186-1300>

⁴ ppdsio@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3524-385X>

⁵ korastiv.230399@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6782-6718>

Аннотация

В настоящее время развитие промышленности требует создания новых упрочняющих технологий, позволяющих расширить рациональную область их применения. Достаточно перспективным является применение способов комбинированного упрочнения, позволяющих изменять физико-механические свойства поверхностного слоя в процессе последовательных внешних воздействий, имеющих различную физическую природу: последовательное пластическое деформирование и внешнее термическое воздействие.

Поэтому целью проведенных исследований является создание комплексной технологии комбинированного деформационного и термического упрочнения.

Предварительное пластическое деформирование предлагается осуществлять методом волнового деформационного упрочнения, при котором повышение свойств достигается формированием структурных несовершенств кристаллической решетки материала под воздействием пролонгированных ударных импульсов со значительной энергией и длительностью. Использование таких импульсов способствует более полно-

му протеканию пластической деформации упрочняемого металла и формированию более глубокого упрочненного поверхностного слоя, чем традиционные способы деформационного упрочнения. Предлагаемая комбинированная технология, заключающаяся в использовании волнового деформационного упрочнения перед термообработкой, позволяет получить высокую твердость и пластичность в поверхностном слое, обеспечивает дополнительный ресурс для повышения эксплуатационных характеристик детали.

Новизна работы заключается в комплексной разработке способа комбинированного волнового деформационного и термического упрочнения поверхностного слоя легированных сталей. Проведенные исследования способа показали высокую эффективность технологии комбинированного деформационного волнового и термического упрочнения для различных марок легированных сталей.

Ключевые слова: упрочнение, волна, деформация, обработка, твердость, пластичность, вязкость, поверхностный слой.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-29-01460

Ссылка для цитирования:

Киричек А.В. Возможности комбинированного упрочнения металлических материалов волновым деформационным воздействием и последующей термической обработкой / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, А. В. Яшин, С. А. Силантьев, А. О. Фони́на // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 11. – С. 18 – 23. doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-18-23.

Original article

Open Access Article

POSSIBILITIES OF COMBINED METAL HARDENING WITH WAVE DEFORMATION AND SUBSEQUENT HEAT TREATMENT

Andrey Viktorovich Kirichuk¹, Dmitry Lvovich Solovyov², Aleksandr Vasilyevich Yashin³, Sergey Aleksandrovich Silantsev⁴, Anastasia Olegovna Fonina⁵

¹ Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

^{2,3,4,5} Vladimir State University, Murom, Russia

¹ avkbgtu@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

² murstin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4475-319X>

³ yashin2102@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3186-1300>

⁴ ppdsio@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3524-385X>

⁵ korastiv.230399@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6782-6718>

Abstract

Nowadays, industry development requires making new strengthening technologies that allow expanding the rational scope of their application. It is quite promising to use methods of combined hardening that allow changing the physical and mechanical properties of the surface layer during successive external actions having different physical nature: sequential plastic deformation and external thermal effects.

Therefore, the objective of the conducted study is to make a complex technology of combined deformation and thermal hardening.

Preliminary plastic deformation is proposed to be carried out by the method of wave deformation hardening, in which the improvement of properties is achieved by forming structural imperfections of the crystal lattice of the material under the action of prolonged shock pulses of significant energy and duration. The use of these pulses contributes to a more complete

plastic deformation of the hardened metal and the formation of a deeper hardened surface layer than with traditional methods of deformation hardening. The proposed combined technology, consisting in the use of wave deformation hardening before thermal treatment, allows to obtain high hardness and plasticity in the surface layer, provides an additional resource to increase the operational characteristics of the part.

The novelty of the work is in the complex development of a method for combined wave deformation and thermal hardening of the surface layer of alloy steels. The conducted studies of the method have shown the high efficiency of the technology of combined deformation wave and thermal hardening for various grades of alloy steels.

Keywords: hardening, wave, deformation, treatment, hardness, plasticity, viscosity, surface layer.

Funding: the work is carried out with the support of the grant of the Russian Academy of Sciences No. 22-29-01460

Reference for citing:

Kirichuk AV, Solovyov DL, Yashin AV, Silantsev SA, Fonina AO. Possibilities of combined metal hardening with wave deformation and subsequent heat treatment. *Transport Engineering*. 2022; 11:18-23. doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-18-23.

Введение

Упрочняющая обработка является важной технологической операцией, которая отвечает за обеспечение высоких эксплуатационных характеристик деталей машин. Известно большое количество технологических способов упрочнения, оказывающих благоприятное воздействие на изменение свойств материала несущего поверхностного слоя деталей, каждый из которых имеет свою определенную область применения. Современный уровень

техники предъявляет все более высокие требования к надежности и ресурсу деталей машин, которые не всегда могут быть обеспечены известными способами упрочнения. В этой связи перспективным является развитие комбинированных упрочняющих технологий. Причем наиболее эффективно показали себя технологии, сочетающие воздействие на упрочняемый материал разной физической природы.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Анализ существующих способов комбинированного упрочнения показал высокую эффективность совместного при-

менения поверхностного пластического деформирования (ППД) и химико-термической обработки [1-4]. Использова-

ние ППД перед цементацией, повышает плотность дислокаций, интенсифицирует диффузионные процессы и позволяет достигнуть более высоких значений концентрации углерода в диффузионной зоне. Появляется возможность сокращения времени и энергетических затрат, связанных с процессом науглероживания, а поверхностный слой, упрочненный предварительным ППД и последующей цементацией, имеет дополнительные ресурсы для повышения эксплуатационных характеристик деталей.

В настоящее время известен комбинированный способ повышения прочностных характеристик металлических материалов – предварительная термомеханическая обработка (ПТМО), который заключается в предварительной пластической деформации исходной структуры и последующей термической обработке (ТО) [5, 6]. ПТМО может проводиться по двум вариантам:

- холодная пластическая деформация с последующей закалкой и отпуском;
- холодная пластическая деформация, затем термическая обработка, облегчающая сохранение влияния наклепа после двойной перекристаллизации, с последующей закалкой и отпуском.

Для пластического деформирования при ПТМО обычно используются методы объемной пластической деформации, такие как волочение, прокатка (особенно эффективна применительно к трубам) и др., которые обеспечивают образование дислокационной структуры устойчивой при нагреве. Однако объемное пластическое деформирование существенно ограничивает возможности такого упрочнения, поскольку может использоваться только для деталей постоянной геометрической формы. Предварительное упрочнение метода-

Результаты

Для более полного представления возможностей комбинированной обработки: предварительное ВДУ и последующее ТО (закалка, отпуск) – проведен комплекс экспериментальных исследований твердости и ударной вязкости образцов из различных сталей.

ми ППД для ПТМО не использовалось. Применение методов ППД позволит значительно расширить номенклатуру упрочняемых деталей.

Разработанный способ волнового деформационного упрочнения (ВДУ) статико-импульсной обработкой обладает увеличенным набором технологических факторов и широким диапазоном технологических возможностей. При ВДУ упрочненный поверхностный слой формируется под действием комбинированной статической и динамической нагрузки. Предупредное статическое поджатие инструмента к обрабатываемой поверхности позволяет пролонгировать действие ударных импульсов за счет использования отраженных волн деформации и более полно передавать энергию удара в очаг деформации. Форма ударных импульсов регулируется геометрическими параметрами ударной системы, состоящей из бойка и волновода, на конце которого крепится деформирующий инструмент. Ударная система рассчитывается в соответствии с волновой теорией так, чтобы генерировать ударный импульс с формой, которая позволяет передавать максимальное количество кинетической энергии удара данному упрочняемому материалу. По сравнению с другими известными способами ППД, ВДУ позволяет обеспечивать большую глубину (до 6-10 мм) и значительную степень упрочнения поверхностного слоя. [7-10] Также в результате волнового деформационного воздействия происходит интенсивное измельчение структуры, возрастает количество структурных несовершенств в поверхностном слое материала, что будет оказывать влияние на конечные физико-механические параметры и эксплуатационные характеристики после упрочняющей ТО (закалка+отпуск).

Так, для стали 30ХГСА (исходная твердость $HV = 2790$ МПа, исходная ударная вязкость $KCU = 148$ Дж/см²) установлено, что упрочнение только ТО позволяет повысить твердость до 3290 МПа, при этом ударная вязкость снижается до 113 Дж/см² (рис. 1). При комбинированном

упрочнении ВДУ+ТО твердость повышается до 3290 МПа, ударная вязкость снижается до 116 Дж/см². Следовательно, применение ВДУ способствует повышению твердости после комбинированного ВДУ+ТО до 25 %, относительно упрочнения только ТО, при сохранении ударной вязкости относительно полученной упрочнением только ТО.

Для стали 10ХСНД (исходная твердость $HV = 2090$ МПа, исходная ударная вязкость $KCU = 196$ Дж/см²), для которой обычно упрочняющая обработка не при-

меняется, установлено, что упрочнение ТО позволяет повысить твердость до 2280 МПа, при этом ударная вязкость повышается до 251 Дж/см² (рис. 1). При комбинированном упрочнении ВДУ+ТО твердость повышается до 2900 МПа, ударная вязкость составляет 227 Дж/см². Следовательно, применение ВДУ способствует повышению твердости после комбинированного ВДУ+ТО до 27 %, относительно упрочнения только ТО, при этом ударная вязкость повышается до 16 % относительно неупрочненной стали.

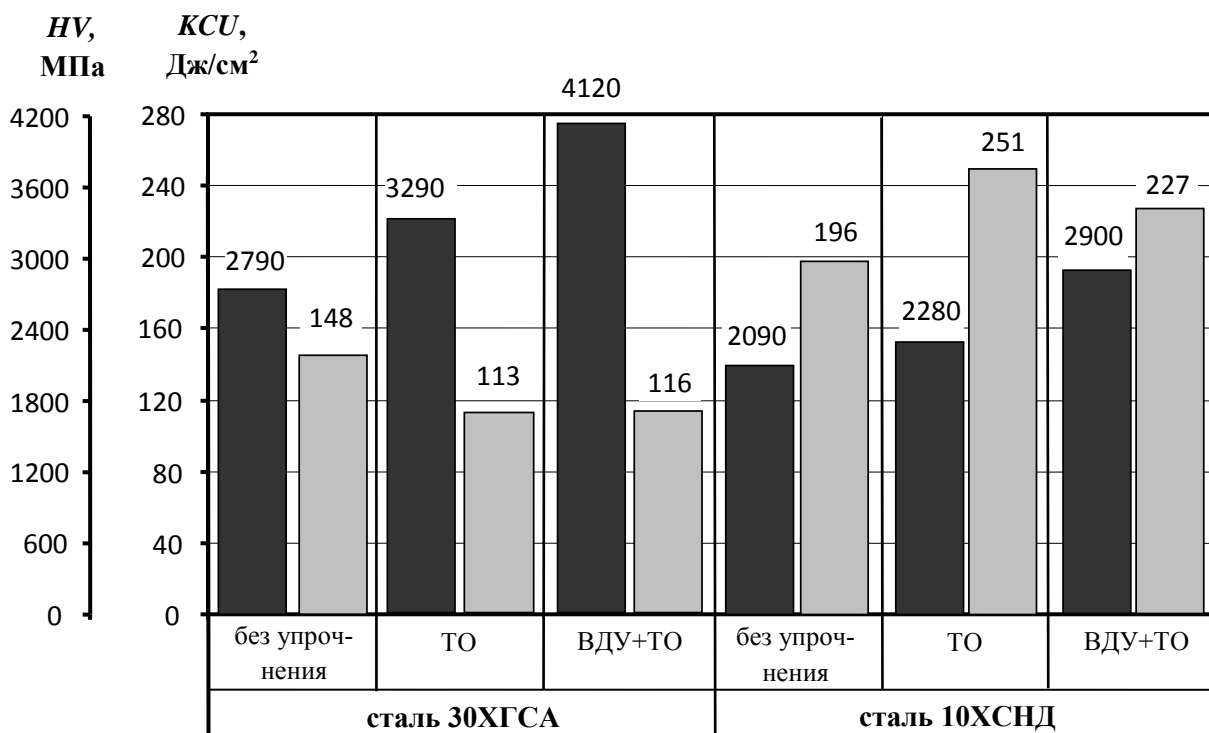


Рис. 1. Твердость и ударная вязкость без упрочнения и после ТО и ВДУ+ТО для сталей 30ХГСА и 10ХСНД
 Fig. 1. Hardness and toughness without hardening and after maintenance and VDU+ TO for steels 30HGSA and 10HSND

Заключение

ППД, в частности ВДУ это один из способов, который позволяет более реализовать потенциальные возможности других упрочняющих технологий, с которыми применяется при комбинированном упрочнении. Комбинированная обработка, заключающаяся в использовании волнового деформационного упрочнения перед термообработкой, позволяет достигнуть более высоких значений степени упрочнения в поверхностном слое. Для ряда сталей (например, сталь 10ХСНД) поверхностный слой после комбинированного упрочнения

ВДУ+ТО, получает дополнительный ресурс повышения эксплуатационных характеристик детали, заключающийся в одновременном повышении твердости и ударной вязкости. Использование предлагаемого комбинированного упрочнения расширяет технологический потенциал традиционной термообработки сталей. Появляется возможность использования более дешевых марок легированных сталей, которые позволяют обеспечивать требуемых уровень механических свойств и эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Новые технологии обработки поверхностным пластическим деформированием. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012;8:36-42.
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Тарасов Д.Е. Повышение долговечности деталей машин комбинированной упрочняющей обработкой. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016;2(50):52-58
3. Киричек А.В., Тарасов Д.Е. Перспективные методы комбинированного упрочнения на основе статико-импульсной обработки ППД. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007;10(34):44-47.
4. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А. Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей. *Научные технологии в машиностроении*. 2017;8:30-35
5. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов (в 2-х томах). М.: Металлургия, 1968. 1172 с.
6. Ивашко В.С., Буйкус К.В., Саранцев В.В. Современные технологии при восстановлении уз-

лов и деталей автомобилей. Минск: Изобретатель, 2011. 279 с.

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. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Технологические возможности статико-импульсной обработки. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2006;8:3-5
9. Киричек А.В., Силантьев С.А., Соловьев Д.Л. Адаптация промышленных мотолов для деформационного упрочнения деталей машин. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012;3-2 (293):94-98
10. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А., Баринов С.В., Яшин А.В. Технологические возможности управления эффективной глубиной наклепа поверхностного слоя волновым деформационным упрочнением. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021;2(194):73-76.

REFERENCES

1. Kirichek AV, Solovyov DL. New technologies of surface plastic deformation treatment. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2012;8:36-42.
2. Kirichek AV, Solovyov DL, Tarasov DE. Machinery life increasing by combined strengthening. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2016;2(50):52-58
3. Kirichek AV, Tarasov DE. Promising methods of combined strengthening based on static-pulse PDT machining. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2007;10(34):44-47.
4. Kirichek AV, Solovyov DL, Silantyev SA. Technology of combined strengthening by deformation wave and case-hardening of structural low-alloy steels. *Science-intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2017;8:30-35
5. Bernstein ML. *Thermomechanical machining of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya; 1968.
6. Ivashko VS, Buykus KV, Sarantsev VV. *Modern technologies for the restoration of car components and parts*. Minsk: Izobretatel; 2011.

7. Kirichek AV, Solovyov DL, Lazutkin AG. *Technology and equipment of static-pulse treatment by surface plastic deformation*. Library of production engineer. Moscow: Mashinostroenie; 2004.
8. Kirichek AV, Solovyov DL. *Technological possibilities of static-pulse treatment*. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2006;8:3-5
9. Kirichek AV, Silantyev SA, Solovyov DL. *Adaptation of industrial motor cycles for deformation hardening of machine parts*. **Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology**. 2012;3-2 (293):94-98
10. Kirichek AV, Solovyov DL, Silantyev SA, Barinov SV, Yashin AV. *Technological possibilities of controlling the effective depth of the surface layer strengthening by wave deformation hardening*. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2021;2(194):73-76.

Информация об авторах:

Киричек Андрей Викторович – профессор, доктор технических наук, тел. (4832) 51-51-38, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета.

Соловьев Дмитрий Львович – профессор, доктор технических наук, тел. (49234) 77-1-44, профессор кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета.

Яшин Александр Васильевич – кандидат технических наук, тел. (49234) 77-1-44, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета.

Силантьев Сергей Александрович – кандидат технических наук, тел. (49234) 77-1-44, доцент кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета.

Фонина Анастасия Олеговна – тел. (49234) 77-1-44, студент Владимирского государственного

университета.

Kirichek Andrey Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Long-term Development at Bryansk State Technical University, phone: (4832) 51-51-38.

Engineering Technology at Vladimir State University, phone: (49234) 77-1-44.

Solovyov Dmitry Lvovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Vladimir State University, phone: (49234) 77-1-44.

Silantsev Sergey Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Vladimir State University, phone: (49234) 77-1-44.

Yashin Aleksandr Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanical

Fonina Anastasia Olegovna – Student at Vladimir State University, phone: (49234) 77-1-44.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

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

Статья поступила в редакцию 30.07.2022; одобрена после рецензирования 05.09.2022; принята к публикации 25.10.2022. Рецензент – Мокрицкий Б.Я., доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 30.07.2022; approved after review on 05.09.2022; accepted for publication on 25.10.2022. The reviewer is Mokritsky B.Ya, Doctor of Technical Sciences, Professor at Komsomolsk-na-Amure State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.