

УДК 621.787.6.004

DOI: 10.30987/article_5bb4b1fba80963.30794778

А.В. Киричек¹, д.т.н., **Д.Л. Соловьев**², д.т.н.,
А.В. Хандожко¹, д.т.н., **С.О. Федонина**¹, магистр техники и технологии
(¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия октября, 7)

(²ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет», 600000, г. Владимир, ул. Горького 87)
E-mail: avkbgtu@gmail.com; murstin@yandex.ru

Технологическое обеспечение параметров несущего слоя деформационным и комбинированным упрочнением

Перспективным направлением развития упрочняющей обработки является комбинированное упрочнение поверхностным пластическим деформированием с последующей цементацией. Рассмотрены возможности создания многослойной гетерогенной структуры с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками комбинированным воздействием волной деформации и цементацией. Представлены результаты исследования волнового деформационного упрочнения наплавленного металла, позволяющего обеспечить существенно более высокий уровень механических и эксплуатационных свойств материала по сравнению с прокатом. Полученные результаты позволяют рекомендовать волновое деформационное упрочнение и комбинированные технологии на его основе для повышения эксплуатационных свойств деталей машин широкой номенклатуры.

Ключевые слова: волна деформации; удар; сталь; цементация; микротвердость; глубина упрочнения; степень упрочнения; поверхностный слой.

A.V. Kirichek¹, Dr. Sc. Tech., **D.L. Soloviyov**², Dr. Sc. Tech.,
A.V. Khandozhko¹, Dr. Sc. Tech., **S.O. Fedonina**¹, M. Tech.&Technology
(¹FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, October 50-th Anniversary Boulevard, Bryansk, 241035)
(²FSBEI HE "Vladimir State University", 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

Technological support of carrying layer parameters by deformation and combined strengthening

A promising direction of strengthening development is a combined strengthening by a surface plastic deformation with the further case hardening. There are considered possibilities for the creation of a multilayer heterogeneous structure with high strength and operation characteristics by a combined impact with a deformation wave and case hardening. The investigation results of the wave deformation strengthening of deposited metal allowing the support of a considerably higher level of material mechanical and operation properties as compared with rolled metal are presented. The results obtained allow recommending a wave deformation strengthening and combined technologies on its basis for operation properties increase of machinery in a wide range.

Keywords: deformation wave; blow; steel; case hardening; micro-hardness; strengthening depth; strengthening degree; surface layer.

Современный уровень развития техники предъявляет все более высокие требования к статической и циклической прочности, несущей способности, контактной выносливости деталей машин и механическим свойствам ма-

териалов, из которых они изготавливаются. Научно-технологические изделия должны успешно эксплуатироваться не только в благоприятной для человека среде обитания, но и в условиях пустыни, арктических морозов, гор, вулкани-

ческой деятельности, вакуума, глубин мирового океана, в радиоактивных, морских и других агрессивных средах. Непрерывно растут требования к надежности, увеличению дальности автономного перемещения, грузоподъемности, размерам изделий.

Материалы и изделия из них в ряде случаев работают в условиях одновременного действия нескольких критических факторов: предельно высоких и предельно низких температур, критическом градиенте температур, воздействии агрессивных сред, высоких давлений, интенсивных вибраций. В таких случаях особенно важно полностью раскрыть потенциал материала за счет использования наиболее эффективных упрочняющих технологий. Не случайно на современном этапе развития науки и техники проблемой, требующей первоочередного решения, признана необходимость кратного повышения эксплуатационных свойств материалов и изделий.

Для соответствия самым разным условиям эксплуатации металлический материал должен иметь не только высокий предел текучести и предел прочности, но и высокий предел усталости, быть прочным, пластичным и вязким одновременно. В связи с необходимостью обеспечения всей совокупности свойств все большее распространение получают многослойные гетерогенные материалы, как с однородными, так и с композиционными слоями из твердых включений в пластичной фазе.

В процессе эксплуатации всегда наиболее нагружен поверхностный слой детали, который во многом определяет надежность и ресурс работы всей детали, к нему предъявляют повышенные требования по прочностным характеристикам. В настоящее время интенсивно развиваются технологические способы и технические средства упрочняющей обработки, позволяющие кардинально изменять свойства, структуру и фазовый состав поверхностного слоя. Технологический подход является экономически наиболее эффективным при обеспечении заданных прочностных и эксплуатационных свойств, и при необходимости достижения высоких результатов должен рассматриваться в первую очередь.

Весьма заманчиво решение проблемы за счет нанесения на рабочие поверхности деталей машин функциональных и защитных покрытий, толщина которых, как правило, составляет десятые или сотые доли миллиметра. Однако детали и элементы наукоемких изделий различного назначения работают не только в кинематических парах трения, но и при различных схемах нагружения, включающих растяжение, сжатие, изгиб, циклическое нагружение, сложнонапряженное состояние.

При этом наиболее нагруженная точка сложнонапряженного в процессе эксплуатации изделия, работающего в тяжелых и экстремальных условиях нагружения, как правило, находится на некоторой глубине, в подповерхностном слое материала. В этом случае

несущая способность материала определяется не только твердостью тонкого модифицированного поверхностного слоя, но и свойствами подповерхностного слоя, точнее, соотношением свойств поверхностного слоя и несущего подповерхностного слоя (часто соотношением твердостей). Для повышения эксплуатационных свойств необходимо более глубокий упрочненный слой, толщина которого составляет более 1 мм, а при экстремальных условиях эксплуатации до 6 мм.

С целью достижения таких уникальных свойств необходимо не только обеспечить упрочнение тонкого поверхностного слоя глубиной 5...100 мкм, но и создать более глубокий градиентный упрочненный переходный слой, свойства которого будут иметь промежуточные значения между свойствами тонкого поверхностного слоя и основы. Для повышения нагрузочной способности необходима многоуровневая организация тонких поверхностных слоев и подслоев, позволяющая обеспечивать последовательный переход концентраторов напряжений от меньшего структурного уровня к большему. Несущие поверхностные объемы материала должны быть многослойными, гетерофазными [1].

Направленному поиску прогрессивных технологий создания градиентного гетерогенного материала с повышенными конструктивными и функциональными свойствами, армированного частицами (областями) высокопрочной фазы, которые окружены пластичными и вязкими прослойками, препятствует сложившийся стереотип необходимости равномерного упрочнения поверхностного слоя. Сложившиеся представления объясняются неоднозначным влиянием пластичных прослоек на прочностные свойства гетерогенного материала.

Известно, что свойства гетерогенных материалов в значительной степени определяются не только свойствами каждого компонента, но и соотношением компонентов в композиции, формой, пространственным расположением, ориентацией частиц более прочной фазы в пластичной матрице. На механические свойства гетерогенных материалов с многоуровневой организацией структуры, наряду со свободной поверхностью и послойными внутренними границами, оказывают влияние внутренние межзеренные и межфазные границы, наличие межслойных и межфазных диффузионных зон. Нерациональный выбор параметров многоуровневой структуры может привести к снижению уровня механических свойств по сравнению с гетерогенной градиентной или послойной организацией структуры материала.

Появляются новые эффективные технологии создания в поверхностном слое гетерогенной структуры с регулярными градиентными областями. Для этой цели хорошо подходят не только технологии химико-термического (азотирование, цементация), и поверхностного термического упрочнения (закалка токами высокой частоты, лазерное

упрочнение, плазменная обработка, обработка термофрезой), но и электромеханическая обработка, способы обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД), микродуговое оксидирование, способ электроэрозионного синтеза покрытий.

Наиболее перспективными являются технологии, относящиеся к пластическому деформированию. Только поверхностным упрочнением материала пластическим деформированием возможно получение плавного характера эпюры микротвердости с размытой границей упрочненной и неупрочненной зон. Методы ППД хорошо сочетаются с другими упрочняющими воздействиями, позволяя выстраивать технологии комбинированного упрочнения [2, 3].

Пластическая деформация служит эффективным инструментом получения слоистой анизотропной структуры, продольное или поперечное расположение волокон которой оказывает кардинальный эффект на свойства изделий. Использование пластической деформации при обработке гетерогенных материалов помимо собственно формообразования изделия, позволяет эффективно управлять формой, расположением, ориентацией включений в матричной фазе, изменять напряженное состояние границ раздела фаз, которые существенно влияют на эксплуатационные свойства изделий.

Разработана технология упрочнения металлических деталей машин ударными волнами деформации [4 – 6]. Для волнового деформационного упрочнения (ВДУ) используется генератор импульсов, основными элементами которого является боек и волновод. При упрочнении боек ударяет по волноводу, статически поджатому к упрочняемой поверхности (рис. 1). В результате в ударной системе «боек – волновод» генерируются плоские акустические волны, которые характеризуются законом изменения сил (амплитудой волны деформации) во времени, максимальным значением сил, временем действия сил (длительности волны деформации) и энергией волны деформации.

Эти характеристики зависят от геометрии соударяющихся бойка и волновода, свойств их материалов и скорости соударения. Период такой волны называют ударным импульсом. Форма ударного импульса, поступающего в очаг деформации, т.е. область контакта инструмента с упрочняемым материалом, определяет эффективность динамического нагружения.

Предварительное статическое поджатие волновода способствует наиболее полному использованию импульсной нагрузки для пластического деформирования упрочняемого материала. Форма ударных импульсов максимально адаптируется к свойствам материала и условиям нагружения, что увеличивает КПД процесса, расширяет технологические возможности обработки, позволяя создавать глубокий упрочненный слой.

Современный уровень упрочняющих технологий позволяет обеспечивать динамическими методами обработки ППД глубину упрочненного слоя до 1,0 мм, а статическими методами – до 3,0 мм. Волновое деформационное воздействие позволяет модифицировать материал на глубину от 0,1...0,3 до 10 мм в зависимости от свойств исходного материала и режимов обработки, отличается управляемым армированием внутренних слоев металла чередующимися областями повышенной твердости и повышенной вязкости с размытыми границами фаз, что способствует кратному увеличению несущей способности и ресурса изделия.

Важной особенностью волнового деформационного упрочнения является возможность точного регулирования передаваемой энергии заданному участку поверхности упрочняемого металла, причем размеры такого участка могут быть от 1,0...2,0 до 50 мм. Эта особенность позволяет в широком диапазоне регулировать требуемую глубину, степень и равномерность упрочнения. Посредством волнового деформационного воздействия появляется возможность создавать композиционный гетерогенно упрочненный слой, отличающийся наличием регулярных макроскопических градиентных областей с модифицированным структурно-фазовым состоянием [1, 7].

Проведенными исследованиями установлено, что технология волнового деформационного упрочнения, применяемая как самостоятельно, так и совместно с цементацией, позволяет сформировать в монолитном металлическом материале многослойную естественно армированную структуру, обеспечивающую одновременно высокую прочность при сохранении высокой вязкости материала (см. рис. 1).

Создание в сплошном материале гетерогенно модифицированной структуры создает хорошие условия для сопротивления циклическим нагрузкам, поскольку вязкий материал тормозит развитие хрупкой микротрещины, сформировавшейся в несущей твердой составляющей. Кроме того, твердые и мягкие составляющие однородного материала не имеют ярко выраженных границ областей с измененными свойствами, что исключает возможность дополнительной концентрации напряжений и зарождения усталостных трещин.

Комбинированная технология, сочетающая волновое деформационное упрочнение и последующую цементацию, экономически более выгодно относительно упрочнения только цементацией. Предварительное волновое деформационное упрочнение способствует интенсификации диффузионных процессов в процессе цементации и позволяет достичь более высоких значений концентрации углерода в диффузионной зоне. В результате средняя скорость цементации повышается в 5 – 6 раз (рис. 2). Появляется возможность сокращения времени и энергетических затрат, связанных с процессом науглероживания.

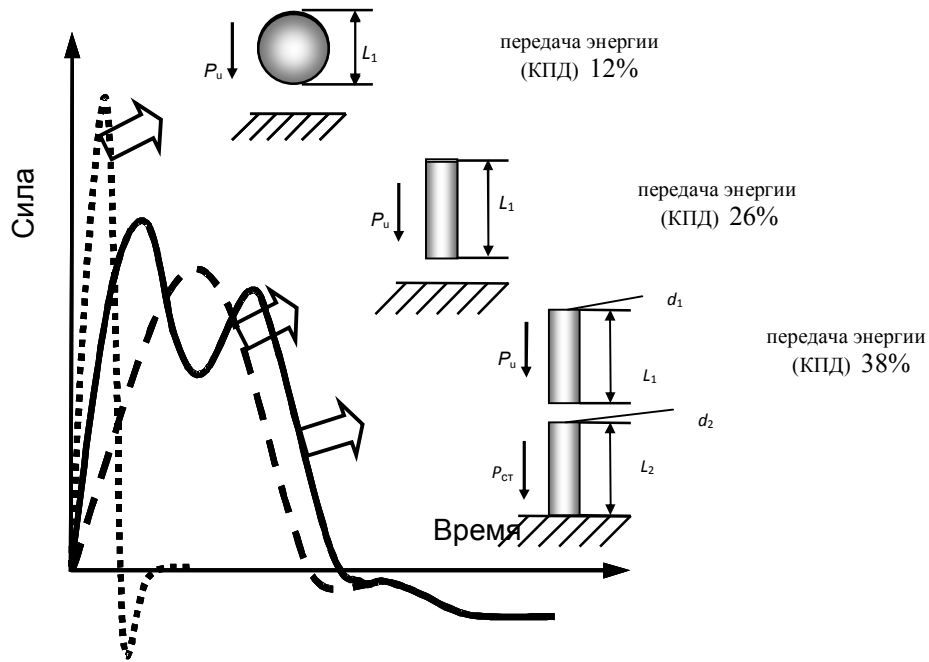


Рис. 1. Упрочнение ударными волнами деформации:

P_u – импульсная нагрузка; $P_{ст}$ – статическая нагрузка; L_1, L_2 – длина бойка и волновода; d_1, d_2 – диаметр поперечного сечения бойка и волновода

Характер эпюр распределения твердости по глубине и вдоль модифицированной поверхности после комбинированного упрочнения отличается от эпюр, полученных только после упрочнения волнами деформации и полученных только цементацией. Верхняя часть модифицированного слоя также как после упрочнения только цементацией имеет достаточно равномерную структуру (рис. 3).

Твердость вдоль поверхности практически не изменяется, но при этом постепенно уменьшается по глубине. Ниже расположен слой, в котором твердость в большей степени изменяется вдоль поверхности и в меньшей – по глубине, постепенно переходящий в нецементованную сердцевину. Твердый равномерно модифицированный поверхностный слой «опирается» на более мягкий гетерогенно модифицированный подслой. Таким образом, структура упрочненного слоя после комбинированной обработки волной деформации и цементации может быть определена как «плита на сваях».

Для стали 10ХСНД (исходная твердость 209 HV) после комбинированного упрочнения максимальная твердость поверхностного слоя составила 710...750 HV, глубина цементации без волнового деформационного упрочнения составила 0,8 мм, после комбинированного упрочнения достигала 2,1 мм. Ударная вязкость без упрочнения составила 150 Дж/м², после комбинированного упрочнения – 24...60 Дж/м².

Для стали 15ХС2Н2Г (исходная твердость 250 HV) после волнового деформационного упрочнения степень упрочнения была повышена на 25...30 %, глубина упрочненного поверхностного слоя достигала 3,5 мм, после комбинированного упрочнения максимальная твердость поверхностного слоя составила 750...780 HV, глубина цементации без волнового деформационного упрочнения составила 0,5 мм, после комбинированного упрочнения достигала 2,1 мм. Ударная вязкость без упрочнения составила 67 Дж/м², после комбинированного упрочнения – 18...27 Дж/м².

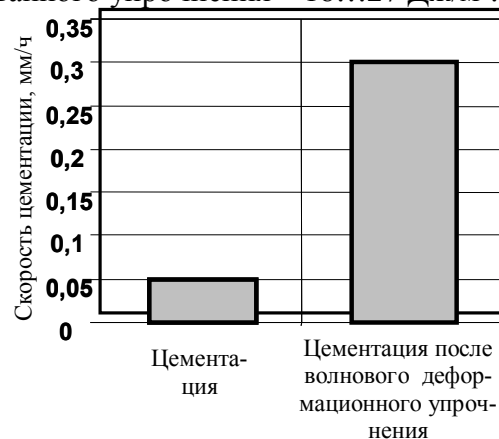


Рис. 2. Скорость цементации в зависимости от способа упрочнения

Проведенные эксплуатационные испытания показали повышение контактной выносливости образцов, гетерогенно упрочненных волной деформации, по сравнению с неупрочнен-

ными в 2–7 раз, а упрочненных комбинированной технологией, включающей предварительное воздействие волной деформации с по-

следующей цементацией – до 2,5 раз по сравнению с образцами только после цементации [7 – 10].

сталь 10ХСНД

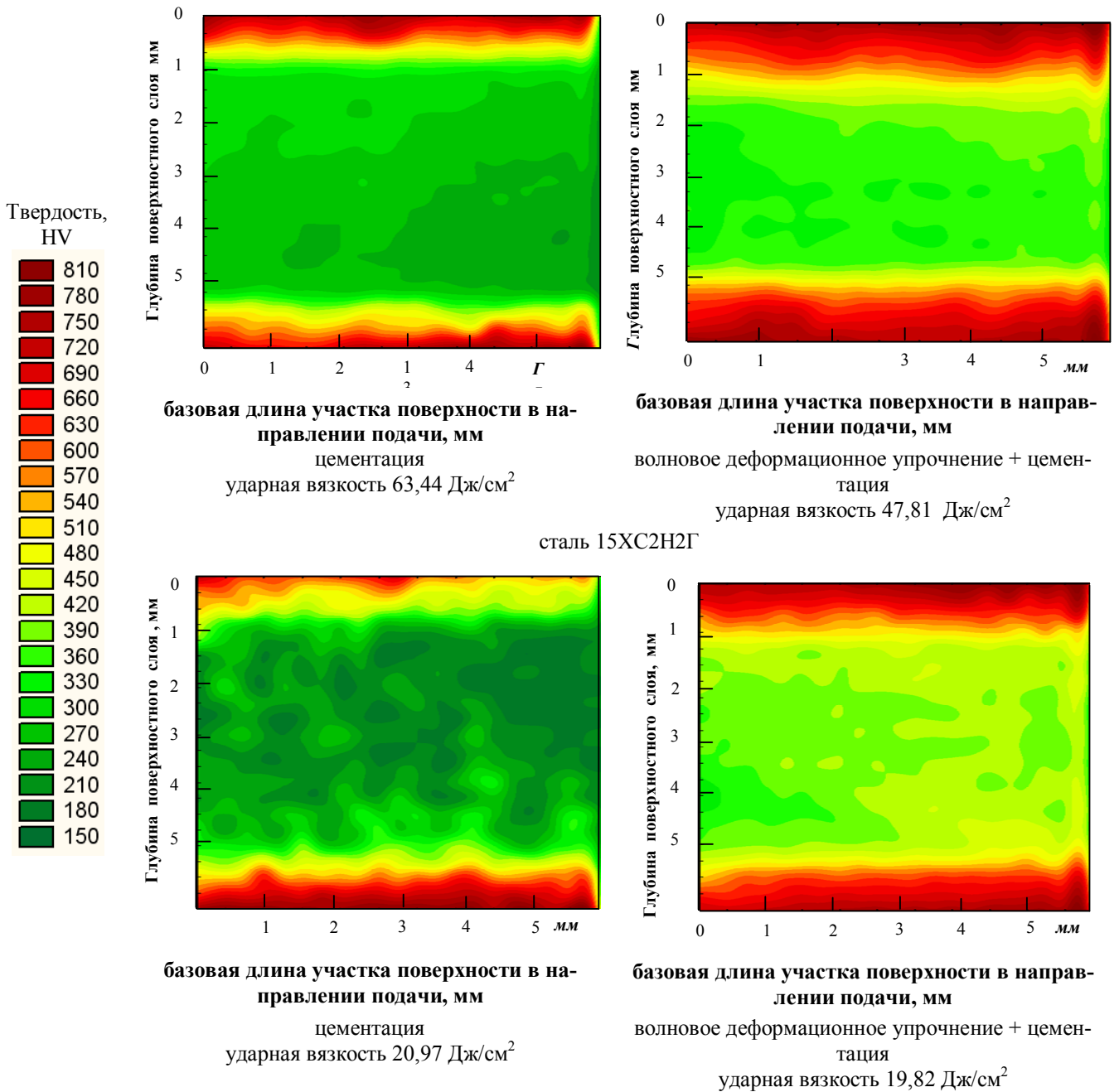


Рис. 3. Карта упрочнения поверхностного слоя

Проведены исследования волнового деформационного упрочнения наплавленного металла, в результате которых установлено, что в упрочненном материале, в отличие от неупрочненного, отсутствуют поры и скрытые полости. Характерные размеры фазовых элементов материала, полученного по технологии с упрочнением, уменьшаются в несколько раз. Расположение и форма фазовых элементов структуры материала имеет более изотропный характер.

Микротвердость материала, наплавленного

с упрочнением, более чем в 2 раза больше микротвердости материала, наплавленного без упрочнения, а пределы прочности и текучести материала выше в 1,5 раза. В целом, уровень механических свойств наплавленного и упрочненного материала существенно выше аналогичных у проката.

Полученные результаты исследований позволяют рекомендовать волновое деформационное упрочнение и включающие его комбинированные технологии для широкого спектра областей применения, предназначенных для

повышения эксплуатационных характеристик различных деталей машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л. Перспективы кратного повышения эксплуатационных свойств естественным армированием металлических материалов при технологическом обеспечении многоуровневой гетерогенной структуры // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 3-10.
2. Папшев, Д.Д., Пронин, А.М., Кубышкин, А.Б. Эффективность упрочнения цементованных деталей машин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 8. – С. 61-64
3. Лахтин, Ю.М., Арзамасов, Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
4. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Волобуев, А.В. Инновационная статико-импульсная обработка // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 1(01). – С. 43-48
5. Kirichek, A.V., Solov'ev, D.L., Silant'ev, S.A. Influence of regimes of static-pulse processing on uniformity of superficial layer hardening // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obработка Metallov Davleniem), (2), 2004. pp. 13-17.
6. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Расширение технологических возможностей упрочняющей обработки металлических материалов волновым деформационным воздействием // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 11(41). – С. 28-35.
7. А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7. – С.9-15.
8. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки / В.Н. Беляев, В.П. Иванов, А.Р. Ингеманссон, А.Н. Исаев, А.В. Киричек и др. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. – 403 с.
9. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Тарасов Д.Е. Упрочнение железоуглеродистых сплавов комбинированной обработкой волной деформации и цементацией // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 12. – С. 36-39.
10. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Повышение долговечности деталей машин комбинированной

упрочняющей обработкой // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (50). С. 52-58.

REFERENCES

1. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L. Outlooks for operation properties multiple increase by natural reinforcement of metal materials at technological support of multi-level heterogeneous structure // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2014. – No. 4(112). – pp. 3-10.
2. Papshev, D.D., Pronin, A.M., Kubyshkin, A.B. Effectiveness of Case-Hardened Machinery Strengthening // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1990.- No. 8. – pp. 61-64.
3. Lakhtin, Yu.M., Arzamasov, B.N. *Chemical-Thermal Treatment of Metals*. – М.: Metallurgy, 1985. – pp. 256.
4. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Volobuev, A.V. Innovation static-pulse treatment // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – No. 1(01). – pp. 43-48.
5. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Silantiev, S.A. Static-pulse mode impact upon surface layer hardening uniformity // *Forging and Stamping Production (Metal Plastic Working)*, (2), 2004. pp. 13-17.
6. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L. Technological potentialities expansion in metal strengthening with wave deformation impact // *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No. 11(41). – pp. 28-35.
7. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Barinov, S.V., Silantiev, S.A. Contact endurance increase in machinery by heterogeneous deformation strengthening with static-pulse treatment // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2008. – No. 7. – pp. 9-15.
8. *Efficient Technologies of Surface Plastic Deformation and Combined Treatment* / V.N. Belyaev, V.P. Ivanov, A.R. Ingemansson, A.N. Isaev, A.V. Kirichek et al. – М.: “Spectrum” Publishing House, 2014. – pp. 403.
9. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Tarasov, D.E. Iron-carbon alloy strengthening by combined treatment of deformation wave and case-hardening // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2013. – No. 12. – pp. 36-39.
10. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Tarasov, D.E. Machinery life increase by combined strengthening // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No. 2(50). Pp. 52-58.

Рецензент д.т.н. С.А. Зайдес

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 01.09.2018. Выход в свет 31.10.2018.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+