

УДК 621.787.6.004
DOI: 10.12737/20244

А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, Д.Е. Тарасов

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМБИНИРОВАННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ

Описан способ комбинированного упрочнения металлических деталей машин, заключающийся в предварительном деформационном упрочнении ударными волнами и последующей цементации, в результате чего формируется упрочненный

поверхностный слой, обладающий одновременно высокой твердостью и запасом пластичности.

Ключевые слова: долговечность, упрочнение, волна деформации, цементация, твердость, пластичность, поверхностный слой.

A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, D.E. Tarasov

MACHINERY LIFE INCREASE BY COMBINED STRENGTHENING

The reason of failure of many machine parts is contact fatigue. To increase contact-fatigue wear resistance it is necessary to create a surface layer possessing increased stress-strain properties which are formed by strengthening. The most effective methods of strengthening are those creating a surface layer with simultaneous high hardness and large reserve of plasticity. One of such methods is combined strengthening at which a surface to be strengthened is affected preliminarily by deformation shock waves forming a deep work-hardened layer and then its case hardening is carried out. As a result of this process a strengthened surface layer is formed which consists of hard uniform-

ly strengthened carburized layer and a softer heterogeneously strengthened sublayer alternating hard and soft areas depending on strengthening modes with shock waves. The operational researches of samples obtained by the offered combined strengthening have shown high efficiency of the method for life increase under conditions of contact cyclic loads which can increase considerably a range of machine parts to be strengthened.

Key words: longevity (life), strengthening, strain wave, case-hardening, hardness, plasticity, surface layer.

Введение

Долговечность большого количества деталей машин связана с повышением их выносливости к действию контактных циклических нагрузок. При изнашивании на рабочих поверхностях этих деталей возникают выкрашивания, которые приводят к повышенным вибрациям и шуму, а в дальнейшем к поломке детали и всего механизма. Для увеличения сопротивления поверхностного слоя деталей действию контактных циклических нагрузок необходимо использование упрочняющей обработки, обеспечивающей его высокую твердость. Однако повышение твердости при контактных нагрузках увеличивает риск хрупкого разрушения, поэтому одновременно с высокой твердостью упрочненный поверхностный слой должен обладать определенным запасом пластичности.

Одним из решений данной проблемы является создание в поверхностном слое

гетерогенно упрочненной структуры с определенным распределением твердых и мягких (вязко-пластичных) участков. Ее преимуществом является то, что при действии циклических контактных нагрузок происходит торможение вязким и пластичным материалом хрупкой трещины, зародившейся в твердой структурной составляющей. Кроме того, глубина упрочненного поверхностного слоя должна исключать его деформацию и продавливание, т.е. напрямую зависит от испытываемых деталей контактных нагрузок. Поэтому для тяжелонагруженных деталей необходимо достаточно глубокий упрочненный слой, достигающий 5-6 мм и более.

В настоящее время не существует универсальных технологий, позволяющих одинаково эффективно обеспечивать упрочнение материала в широком диапазоне глубин поверхностного слоя (от несколь-

ких микрометров до 6-8 мм). В связи с этим целесообразно применение комбинированных, взаимно сочетаемых и дополняющих друг друга технологий, имеющих различную физическую природу упрочнения и в совокупности обеспечивающих заданную эпюру изменения свойств градиентного поверхностного слоя.

Для повышения контактной выносливости хорошо зарекомендовало себя упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД), которое создает наклепанный поверхностный слой с высокой твердостью (до 6500 МПа) и сжимающими остаточными напряжениями, благоприятно влияющими при действии циклических нагрузок. Упрочненный поверхностный слой после ППД имеет плавный переход к неупрочненному металлу, что исключает появление концентраторов напряжений на границах и, соответственно, возникновение усталостных трещин. Кроме того, преимуществами использования ППД являются возможность обработки деталей любых размеров и конфигураций, возможность местного упрочнения участка детали, технологичность, простота осуществления, возможность механизации и автоматизации процесса.

Обсуждение результатов исследований

На основании анализа исследований комбинированного упрочнения ППД и цементацией установлено, что наибольший эффект достигается при сочетаниях режимов, обеспечивающих примерно равную толщину упрочненного ППД и диффузионного, полученного при цементации, слоев [1]. Широко используемые способы ППД (обкатывание, выглаживание, дробеструйная обработка) не всегда позволяют создавать упрочненный слой глубиной не меньше, чем цементация. Кроме того, перечисленными способами сложно регулировать равномерность упрочнения, которая, как указывалось выше, оказывает достаточно большое влияние на долговечность деталей при действии контактных циклических нагрузок.

Предлагаемый авторами способ ППД – статико-импульсная обработка (СИО) –

Поверхностное пластическое деформирование позволяет полнее реализовать потенциальные возможности других технологий, поэтому широко применяется в комбинированном упрочнении. Достаточно перспективным является комбинированное упрочнение ППД с последующей химико-термической обработкой, в частности цементацией. Объясняя физику этого процесса, можно отметить, что образующиеся в процессе насыщения поверхности углеродом структурные элементы, их количество и характер расположения будут зависеть и от исходного структурного состояния поверхностного слоя, а точнее от энергетического состояния атомов, которое существенно меняется в результате обработки ППД. Использование ППД перед цементацией 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. Поверхностный слой, упрочненный комбинированной обработкой ППД и цементацией, может иметь дополнительные ресурсы для повышения эксплуатационных характеристик детали.

позволяет воздействовать на упрочняемый материал ударными волнами, формируя деформированные участки на большой глубине, что дает более широкие возможности при регулировании свойств упрочненного поверхностного слоя [2-5]. Для генерирования ударных волн используется ударная система «боек – волновод». Ударные волны характеризуются законом изменения сил во времени, а период такой волны называют ударным импульсом. Эти характеристики зависят от геометрических параметров соударяющихся бойка и волновода, свойств их материалов и скорости соударения. Особенностью способа является то, что форма ударных импульсов максимально адаптирована к упрочняемому материалу и условиям нагружения, что позволяет более эффективно использовать кинетическую энергию ударов. Статиче-

ская составляющая нагрузки предназначена для наиболее полного использования импульсной.

Под действием ударных импульсов на поверхности формируются пластические отпечатки, форма и размеры которых, в соответствии с заданной кратностью, определяют глубину, степень и равномерность упрочнения поверхностного слоя, шероховатость поверхности. Глубина упрочненного поверхностного слоя, полученного в результате воздействия ударными волнами деформации, может достигать 6-8 мм и более, твердость – до 6500 МПа.

Технология СИО позволяет достаточно точно регулировать равномерность упрочнения, создавая как равномерно, так и гетерогенно упрочненную структуру [6-10]. Регулирование равномерности достигается за счет перекрытия пластических отпечатков, полученных в результате действия на материал ударных импульсов, которое оценивается через коэффициент перекрытия

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

где δ – размер отпечатка, мм; S – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин; f – частота ударов, Гц.

Если $K = 0$, то край одного отпечатка граничит с краем другого; если $0 < K < 1$, то отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место.

Проведены экспериментальные исследования по созданию упрочненного поверхностного слоя комбинированной обработкой волнами деформации и цементацией. Технологический цикл комбинированной обработки состоял из следующих операций: предварительной механической обработки, упрочнения волной деформации, цементации, финишной механической обработки.

В качестве образцов для исследований были выбраны пластины из легированных низкоуглеродистых цементуемых сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А, которые используются для изготовления ответственных тяжело нагруженных деталей машин (шестерни, червяки, шлицевые валы, эле-

менты подшипников качения, втулки, кулачковые муфты, направляющие, шкворни, пальцы, валики и т.д.), работающих под действием контактных циклических нагрузок. К таким деталям предъявляются требования высокой поверхностной твердости, а также прочности, пластичности и вязкости сердцевины.

Нагружение волной деформации осуществлялось с энергией $A = 25$ Дж. В качестве инструментов использовались стержневые ролики диаметром 10 мм и шириной $b_p = 5...7$ мм. Соответственно удельная энергия ударных импульсов ($a = A / b_p$) составляла 3,57...5 Дж/мм. Коэффициент перекрытия пластических отпечатков изменялся от 0,2 до 0,6.

Процесс газовой цементации выполнялся в механизированной камерной безмуфельной печи со встроенными закалочными баками. Значения температур процесса: цементации – 930°C; подстуживания – 550°C; печи повторного нагрева – 840°C; закалочного масла МС-20 – 150°C; моечного раствора – 80°C; отпускной печи – 180°C. Продолжительность процесса (время диффузии) – 8 часов. Поверхностная твердость, измеренная на образцах-свидетелях для выбранных заготовок из сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А, составила 57 HRC. Глубина цементованного слоя составила 2 и 3 мм для образцов из сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А соответственно. Следовательно, средняя скорость цементации при использовании предварительного упрочнения ударными волнами достигала 0,25...0,3 мм/ч, тогда как для сталей без предварительного ППД обычно составляет около 0,05 мм/ч [1].

Финишная механическая обработка заключалась в шлифовании поверхностей и позволяла удалить неровности от пластических отпечатков, образованные в результате действия волн деформации.

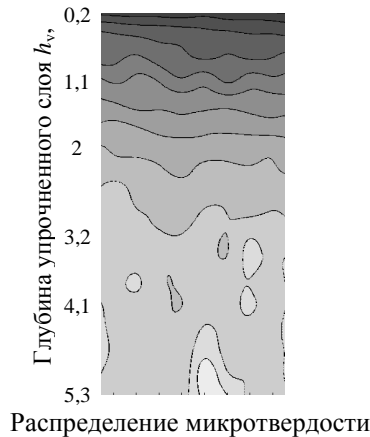
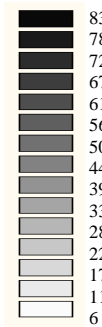
На полученных образцах проведены исследования микротвердости по глубине и вдоль упрочненного поверхностного слоя (рис. 1).

Характер эпюр распределения твердости по глубине и вдоль упрочненной поверхности после комбинированного уп-

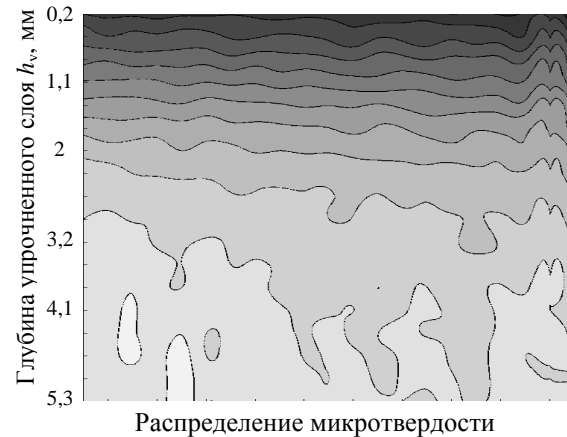
рочнения отличается от характера эпюр, полученных после цементации. Верхняя часть упрочненного слоя и в том и в другом случае имеет достаточно равномерную

структуру. Твердость вдоль поверхности практически не изменяется, но при этом постепенно уменьшается по глубине.

Степень упрочнения $\Delta HV, \%$



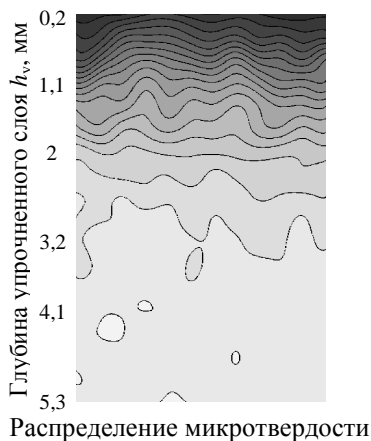
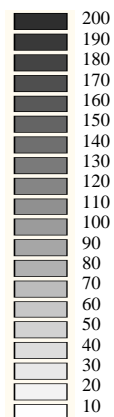
Упрочнение цементацией



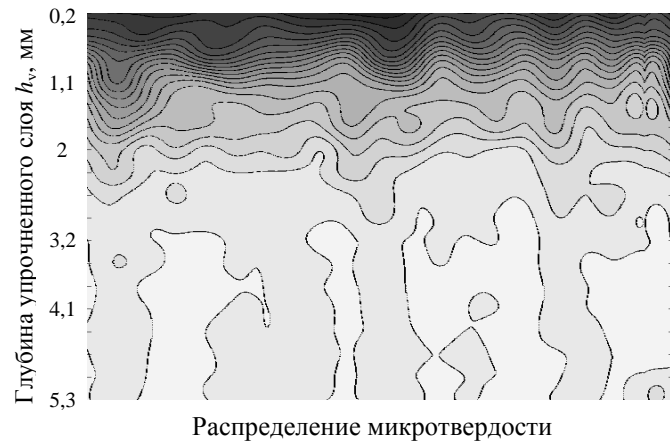
$a = 5 \text{ Дж/мм}; K = 0,4 + \text{цементация}$

а)

Степень упрочнения $\Delta HV, \%$



Упрочнение цементацией



$a = 5 \text{ Дж/мм}; K = 0,4 + \text{цементация}$

б)

Рис. 1. Изменение степени упрочнения по глубине и вдоль упрочненного слоя, полученного комбинированной обработкой волной деформации и цементацией: а – сталь 20Х2Н4А; б – сталь 18ХГТ

Ниже расположен слой, в котором твердость в большей степени изменяется вдоль поверхности и в меньшей – по глубине, постепенно переходящий в нецементованную сердцевину, т.е. твердый, равномерно упрочненный поверхностный слой «опирается» на более мягкий гетерогенно упрочненный подслой. Таким образом, структура упрочненного слоя после комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией может быть определена как «плита на сваях».

Установлено, что параметры равномерно и гетерогенно упрочненных поверхностных слоев изменяются в зависимости от режимов воздействия волной деформации.

Использование при комбинированном упрочнении предварительного воздействия волной деформации для стали 20Х2Н4А способствовало повышению максимальной степени упрочнения на 25 %, тогда как у стали 18ХГТ увеличения максимальной степени упрочнения за счет

предварительного воздействия волной деформации не наблюдалось. Причем максимальная степень упрочнения увеличилась только при режимах, когда воздействие волной деформации осуществлялось с высоким коэффициентом перекрытия $K = 0,6$, т.е. было получено большее количество дефектов кристаллической решетки упрочняемого материала, способствующих лучшему проникновению углерода в поверхностный слой при цементации.

Сформированный гетерогенно упрочненный подслои чередует твердые участки вытянутой формы по глубине упрочнения. С увеличением коэффициента перекрытия пластических отпечатков, полученных при воздействии волной деформации, в диапазоне $0,2 \dots 0,6$ степень упрочнения твердых и мягких участков увеличивается соответственно в 1,75 и 2,2 раза для стали 20X2H4A и в 1,2 и 1,14 раза для стали 18ХГТ, а ширина твердых участков (измеряемая вдоль упрочняемой поверхности) и расстояние между ними уменьшаются. С увеличением удельной энергии ударных волн от 3,57 до 5 Дж/мм высота вытянутых по глубине упрочнения твердых участков увеличивается до 3 раз, степень упрочнения твердых и мягких участков повышается соответственно в 1,4 и 1,6 раза (в большей степени для стали 20X2H4A).

Проведены исследования долговечности упрочненных образцов при действии контактных циклических нагрузок.

Для оценки долговечности образцов после упрочнения был принят параметр – сопротивление контактному выкрашиванию, позволяющее сравнить величину выкрашиваний на поверхности, упрочненной комбинированной обработкой, относительно поверхности, упрочненной только цементацией:

$$\Delta I = \frac{S_d}{S_{д0}} \frac{\sum S_0}{\sum S},$$

где $\sum S$ и $\sum S_0$ – суммарная площадь выкрашиваний соответственно на участке, упрочненном комбинированной обработкой и цементацией, мм^2 ; S_d и $S_{д0}$ – площадь дорожки катания контртел (шаров) соответственно на участке,

упрочненном комбинированной обработкой и цементацией, мм^2 .

Таким образом, величина ΔI характеризует повышение долговечности поверхностного слоя от предварительного воздействия (перед цементацией) волной деформации.

Анализ результатов проведенных испытаний показал, что при упрочнении стали 20X2H4A в исследуемом диапазоне режимов предварительное воздействие волной деформации позволяет повысить долговечность в 1,3...2,5 раза ($\Delta I = 1,3 \dots 2,5$), при упрочнении стали 18ХГТ – в 0,8...1,5 раза (рис. 2). Максимальная величина ΔI получена для стали 20X2H4A при упрочнении с $K = 0,4$ и $a = 5$ Дж/мм, а для стали 18ХГТ – при $K = 0,4$ и $a = 4,17$ Дж/мм. Минимальное значение ΔI получено для стали 20X2H4A при упрочнении с $K = 0,4$ и $a = 4,17$ Дж/мм, а для стали 18ХГТ – при $K = 0,2$ и $a = 5$ Дж/мм.

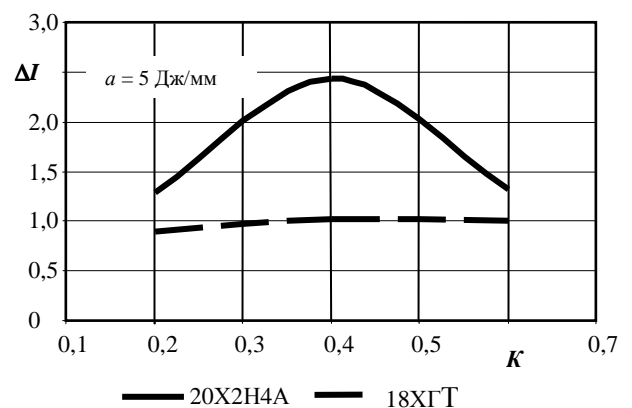
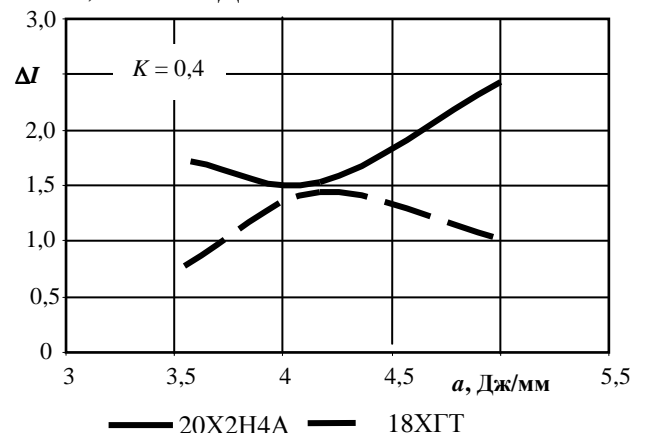


Рис. 2. Зависимость сопротивления контактному выкрашиванию от параметров упрочнения волной деформации: удельной энергии ударных импульсов a и коэффициента перекрытия пластических отпечатков K

Заключение

Установлена возможность осуществления процесса комбинированного упрочнения, который заключается в предварительном воздействии на материал волнами деформации и его последующей цементации. Упрочнение волной деформации, в отличие от известных способов поверхностного пластического деформирования, способствует созданию упрочненного поверхностного слоя с большой глубиной (до 5-8 мм) и упорядоченным чередованием твердых и мягких (вязко-пластичных) областей и, соответственно, новым эксплуатационным возможностям упрочненного материала. При комбинированном упрочнении формируются равномерно упрочненный верхний слой и гетерогенно упрочненный подслой, параметры которых (соотношение их твердости и толщины, а

также чередование твердых и мягких участков полученной гетерогенной структуры) определяют долговечность упрочненного материала.

Установлено, что применение перед цементацией предварительного воздействия на упрочняемую поверхность волнами деформации позволяет повысить ее долговечность при действии контактных циклических нагрузок до 2,5 раза.

Применение предварительного упрочнения ударными волнами деформации позволило сократить время и энергетические затраты, связанные с процессом науглероживания, и ускорить процесс цементации до 6 раз. Это особенно важно при получении глубоких (до 5 мм и более) науглероженных слоев.

Исследования проводились при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-08-00112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев, В.Н. 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.: Спектр, 2014. – 403 с.
2. Лазуткин, А.Г. Механика нагружения поверхности волной деформации / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьев. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 149 с.
3. Kirichek, A.V. The methods of dynamic surface strengthening by plastic deformation / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2001. – Is. 7. – P. 28-32.
4. Kirichek, A.V. Deformation Wave Hardening of Metallic Materials / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.Yu. Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2014. – Vol. 6 (3).
5. Kirichek, A.V. Influence of regimes of static-pulse processing on uniformity of superficial layer hardening / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, S.A. Silant'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2004. – Is. 2. – P. 13-17.
6. Kirichek, A.V. Properties and Technology for Quasi-Composite Blanket Using Natural Reinforcement of the Metal by Strain Affected Areas / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5 (4).
7. Киричек, А.В. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // СТИН. – 2007. – №12. – С. 28-31.
8. Kirichek, A.V. Creating heterogeneous surface structures by static-pulsed treatment / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28 (3). – P. 277-279.
9. Kirichek, A.V. Nanostructure Changes in Iron-Carbon Alloys as a Result of Impulse Deformation Wave Action / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5 (4).
10. Kirichek, A.V. Production of Quasicomposite Surface Layer of a Metal Material by Shock Wave Strain Hardening / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.Yu. Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2014. – Vol. 6 (3).
1. Belyaev, V.N. Effective Technologies for Surface Plastic Deformation and Combined Working / V.N. Belyaev, V.P. Ivanov, A.R. Ingemansson, A.N. Isayev, A.V. Kirichek [et al.]. – M.: Spectrum, 2014. – pp. 403.
2. Lazutkin, A.G. Loading Mechanics of Wave Deformation Surface / A.G. Lazutkin, A.V. Kirichek, Yu.S. Stepanov, D.L. Soloviyov. – M.: Mechanical Engineering-1, 2005. – pp. 149.
3. Kirichek, A.V. The methods of dynamic surface strengthening by plastic deformation / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2001. – Is. 7. – P. 28-32.

- chek, D.L. Solov'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2001. – Is. 7. – P. 28-32.
4. Kirichek, A.V. Deformation Wave Hardening of Metallic Materials / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.Yu Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2014. – Vol. 6 (3). – P. 03.
 5. Kirichek, A.V. Influence of regimes of static-pulse processing on uniformity of superficial layer hardening / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, S.A. Silant'ev // Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem). – 2004. – Is. 2. – P. 13-17.
 6. Kirichek, A.V. Properties and Technology for Quasi-Composite Blanket Using Natural Reinforcement of the Metal by Strain Affected Areas / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5 (4). – P. 04.
 7. Kirichek, A.V. Formation of Material Heterogeneous Structure by Static-Pulse Working / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov // STIN. – 2007. – №12. – pp. 28-31.
 8. Kirichek, A.V. Creating heterogeneous surface structures by static-pulsed treatment / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28 (3). – P. 277-279.
 9. Kirichek, A.V. Nanostructure Changes in Iron-Carbon Alloys as a Result of Impulse Deformation Wave Action / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5 (4). – P. 04.
 10. Kirichek, A.V. Production of Quasicomposite Surface Layer of a Metal Material by Shock Wave Strain Hardening / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.Yu. Altuhov // Journal of Nano and Electronic Physics. – 2014. – Vol. 6 (3). – P. 03.

Статья поступила в редколлегию 12.05.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Бишутин С.Г.

Сведения об авторах:

Киричек Андрей Викторович, д.т.н., профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, тел.: (4832)51-51-38, e-mail: avk.57@yandex.ru.

Соловьев Дмитрий Львович, д.т.н., профессор Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета, тел.: (49234) 77-1-44, e-mail: murstin@yandex.ru.

Тарасов Дмитрий Евгеньевич, к.т.н., АО «Ливнынасос», тел.: (48677) 7-76-15, e-mail: tde82@yandex.ru.

Kirichek Andrey Viktorovich, D.Eng., Prof., Pro-Rector for Promising Development Bryansk State Technical University, Phone: (4832)51-51-38, e-mail: avk.57@yandex.ru.

Soloviyov Dmitry Lvovich, D.Eng., Prof., Murom Institute (Branch) of Vladimir State University, Phone: (49234) 77-1-44, e-mail: murstin@yandex.ru.

Tarasov Dmitry Yevgenievich, Can.Eng., “Livny-pump” Co., Phone: (48677) 7-76-15, e-mail: tde82@yandex.ru.