

УДК 621.787.6.004

DOI: 10.12737/article_5971db7fe454d8.56390820

А.В. Киричек, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7),

Д.Л. Соловьев, д.т.н., **С.А. Силантьев**, к.т.н.

(Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета)

E-mail: avk.57@yandex.ru; murstin@yandex.ru

Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей

Перспективным направлением развития упрочняющей обработки является комбинированное упрочнение поверхностным пластическим деформированием с последующей химико-термической обработкой, в частности цементацией. Рассмотрены технологические возможности комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных малоуглеродистых низколегированных сталей на примере стали 10ХСНД. Установлено, что полученные в результате комбинированного упрочнения результаты, сопоставимы с результатами упрочнения цементуемых легированных сталей, применяемых для изготовления тяжело нагруженных деталей машин.

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

A.V. Kirichek, D. Eng.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University" 7, October 50 Years Avenue, Bryansk, 241035),

D.L. Soloviyov, D. Eng.,

S.A. Silantiev, Can. Eng.

(Murom Institute (Branch) of Vladimir State University)

Technology of combined strengthening by wave deformation and case-hardening of structural low-alloy steels

The promising direction of strengthening development is a combined strengthening with surface plastic deformation with the further chemical-thermal treatment, in particular, with case-hardening. The technological possibilities of combined strengthening by a deformation wave with the further case-hardening of structural mild low-alloy steels by the example of steel 10ChSND are considered. It is defined that the results, obtained as a result of combined strengthening, are comparable with the results of strengthening of case-hardened alloy steels used for manufacturing heavy loaded parts of machines.

Keywords: deformation wave; blow; steel; carbonization; hardness; strengthening depth; strengthening degree; surface layer.

В процессе эксплуатации изделий всегда наиболее нагружен поверхностный слой. Поэтому в технологии машиностроения большое внимание уделяется способам упрочнения, изменяющих свойства поверхностного слоя. Одним из таких способов является упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД), который отличается простотой практической реализации и высокой эффективностью. Существенным преимуществом способов ППД является возможность использования в комбинированных упрочняющих технологиях, позволяющих обеспечить максимальное соответствие параметров качества поверхностного слоя условиям эксплуатации детали, что обеспечивает максимальный ресурс работы как самой детали, так и машины в целом.

Достаточно перспективным является комбинированное упрочнение ППД с последующей химико-термической обработкой, в частности цементацией [1, 2]. 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.

Волновое деформационное упрочнение (ВДУ) материала в процессе статико-импульсной обработки (СИО) – новая

технология ППД. Использование для упрочнения ударных волн деформации значительно расширяет технологические возможности по формированию упрочненного поверхностного слоя и позволяет создавать большую глубину (до 6...10 мм) и высокую твердость упрочненного поверхностного слоя (до 6500 МПа) [2, 3].

В отличие от других известных способов ППД, в ударной системе боек-волновод генерируются плоские акустические волны, которые формируют в очаге деформации – пятне контакта инструмента и упрочняемой поверхности, импульсы различной формы, отличающиеся законом изменения силы во времени.

Форма импульсов во многом определяет количество энергии удара, сообщаемой упрочняемому материалу, и зависит от свойств материала, геометрических параметров бойка и волновода, акустических свойств их материалов и скорости соударения.

Статическая составляющая нагрузки не позволяет инструменту выходить из контакта с упрочняемой поверхностью после воздействия на нее прямой волны деформации, формирующейся в начальной стадии удара бойка по волноводу, и предназначена для наиболее полного использования динамической (импульсной) составляющей за счет рекуперации отраженных волн деформации. Для увеличения КПД процесса и создания более глубокого упрочненного слоя форма импульсов адаптируется к свойствам материала и условиям нагружения.

Важной особенностью технологии упрочнения волной деформации является то, что она позволяет достаточно точно регулировать равномерность упрочнения, создавая как равномерно, так и гетерогенно упрочненную структуру, сочетающую одновременно высокую твердость и пластичность [5]. 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 (деформирующего индентора) в одно и то же место.

Проведенными исследованиями установлено, что технология волнового деформационного упрочнения, применяемая как самостоятельно, так и совместно с химико-термической обработкой, позволяет сформировать в монолитном металлическом материале многослойную естественно армированную структуру, обеспечивающую одновременно высокую прочность и большую вязкость материала.

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.

Испытания на действие контактных циклических нагрузок поверхности гетерогенно упрочненной волной деформации показало повышение долговечности в 2–7 раз, а упрочненной комбинированной технологией, включающей предварительное воздействие волной деформации и последующую цементацию до 2,5 раз [6 – 12].

Исследования комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией проводились для конструкционных легированных сталей, используемых для цементованных деталей ответственного назначения, таких как сталь 20Х2Н4А и сталь 18ХГТ. Однако обеспечение высокой несущей способности комбинированным воздействием волной деформации и цементацией сталей, не обладающих большими потенциальными возможностями при упрочнении, не изучено. Между тем, это позволит значительно расширить номенклатуру деталей, для которых может быть создана структура с высокими эксплуатационными свойствами и снизить затраты на их изготовление за счет применения более дешевых материалов.

Для проведения исследований комбинированного упрочнения волной деформации и цементации конструкционных малоуглеродистых низколегированных сталей была выбрана сталь 10ХСНД, для изделий из которой не характерно применение упрочняющей термиче-

ской и химико-термической обработки. Сталь 10ХСНД используется для создания сварных конструкций, а ее стоимость одна из наиболее низких по сравнению с большинством конструкционных легированных сталей.

Исследования проводились на плоских образцах с режимами, близкими к режимам комбинированного упрочнения легированных сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ. Упрочнение волной деформации осуществлялось инструментом в форме стержневых роликов диаметром 10 мм с различной длиной b_p (мм). Варьирование длиной ролика и энергией ударных импульсов A (Дж) обеспечивало заданную динамическую составляющую удельной энергии деформирования $a = A / b_p$.

Предварительное, перед цементацией, упрочнение волной деформации осуществлялось так, чтобы глубина наклепа составляла не менее 3...5 мм и была заведомо больше толщины диффузионно-упрочненного цементацией слоя. Исходя из этого условия, рассчитанная для сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ удельная энергия ударных импульсов составляла 3,57...5,0 Дж/мм, а для стали 10ХСНД – 2,0...2,7 Дж/мм. Упрочнение волной деформации осуществлялось при коэффициенте перекрытия 0,2...0,6 в целях обеспечения гетерогенного упрочнения материала. Продолжительность цементации – 8 ч.

Результаты исследований (карты микротвердости) комбинированно упрочненной низколегированной стали 10ХСНД в сравнении с результатами исследований легированных цементованных сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Анализ полученных эпюр показал, что характер распределения твердости по глубине и вдоль упрочненной поверхности после комбинированного упрочнения и после цементации отличается у всех рассматриваемых сталей. Наружная часть упрочненного слоя и в том и в другом случае имеет достаточно равномерную структуру, характерную для цементации. Твердость в направлении подачи практически не изменяется, но при этом градиентно снижается по глубине. Ниже расположен подповерхностный слой, в котором твердость в большей степени изменяется в направлении подачи и в меньшей – по глубине, постепенно переходящий в нецементованную сердцевину.

Характер упрочнения подповерхностного слоя хорошо коррелирует с параметрами гетерогенного упрочнения, полученного на стадии ВДУ, что свидетельствует о наличии технологической наследственности после волнового

деформационного упрочнения. Твердый равномерно упрочненный поверхностный слой «опирается» на переходный твердо-вязкий гетерогенно упрочненный подслои, что благоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах изделий [6]. Параметры равномерно и гетерогенно упрочненных поверхностных слоев зависят от режимов волнового деформационного упрочнения.

В результате анализа полученных данных установлено, что технология комбинированного упрочнения с применением волны деформации для сталей 20Х2Н4А и 10ХСНД способствует повышению степени упрочнения поверхностного слоя, соответственно на 25 % и 10 %. Причем, при упрочнении стали 10ХСНД максимальное увеличение степени упрочнения достигало 300 %, а величина максимальной твердости – 8400 МПа, тогда как у сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ, соответственно 200 % и 80 %, а величина максимальной твердости – 7890 МПа и 7260 МПа.

Установлено, что увеличение коэффициента перекрытия способствует повышению максимальной степени упрочнения, т.е. при упрочнении с $K = 0,6$ формируется большее количество дефектов кристаллической решетки упрочняемого материала, способствующих лучшему проникновению углерода в поверхностный слой при цементации. При этом глубина цементованного слоя для сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А, полученного с упрочнением волной деформации и без, практически не изменяется и составляет соответственно 2 мм и 3 мм. Тогда как для стали 10ХСНД предварительное упрочнение волной деформации способствует увеличению глубины цементации с 1,4 мм до 2 мм, т.е. на 30 %.

Выводы

Установлено, что при комбинированном упрочнении конструкционной малоуглеродистой низколегированной стали 10ХСНД максимальная степень упрочнения увеличивается до 10 %, а глубина цементованного слоя – на 30 %.

При комбинированном упрочнении стали 10ХСНД, также как и легированных цементуемых сталей, формируется наружный равномерно упрочненный слой и гетерогенно упрочненный подповерхностный слой, параметры которых (соотношение их твердости и толщины, а также характер чередования твердых и вязко-пластичных участков гетерогенной структуры) оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства.

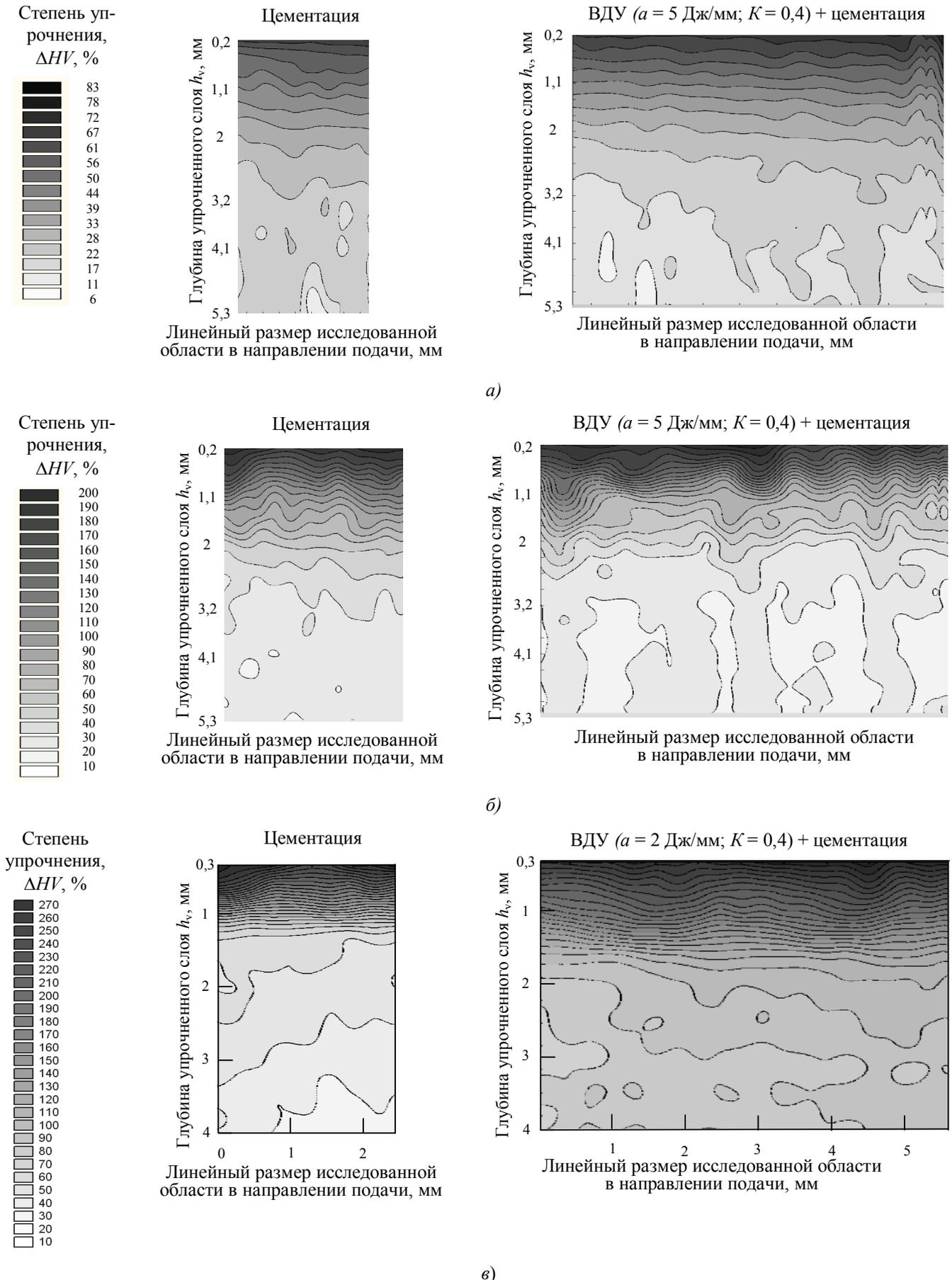


Рис. 1. Влияние технологии упрочнения на степень упрочнения, рассчитанную в результате анализа карт микротвердости:

a – сталь 20Х2Н4А; *б* – сталь 18ХГТ; *в* – сталь 10ХСНД

1. Влияние технологии упрочнения на микротвердость, степень упрочнения и глубину упрочненного слоя

Марка стали	Твердость сердцевины, МПа	Максимальная твердость, МПа / степень упрочнения, %		Увеличение максимальной степени упрочнения, %	Глубина цементованного слоя, мм		Увеличение глубины цементованного слоя, %
		без упрочнения волной деформации	с упрочнением волной деформации		без упрочнения волной деформации	с упрочнением волной деформации	
20X2H4A	4500	7240/60	7890/75	25	3	3	0
18XГТ	2500	7270/190	7260/190	0	2	2	0
10XСНД	2100	7800/270	8400/300	10	1,4	2	30

Достоинством комбинированного упрочнения стали 10XСНД является возможность двукратного увеличения производительности при обеспечении необходимых параметров наклепа поверхностного слоя волной деформации по сравнению с легированными цементуемыми сталями, вследствие ее более низкой исходной твердости.

Результаты комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей сопоставимы с результатами упрочнения цементуемых легированных сталей, что позволяет рекомендовать их использование для изготовления тяжело нагруженных деталей машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Папшев, Д.Д., Пронин, А.М., Кубышкин, А.Б. Эффективность упрочнения цементованных деталей машин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 8. – С. 61–64.
2. Лахтин, Ю.М., Арзамасов, Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
3. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Волобуев, А.В. Инновационная статико-импульсная обработка // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 1(01). – С. 43–48.
4. 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.
5. 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.
6. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л. Перспективы кратного повышения эксплуатационных свойств естественным армированием металлических материалов при технологическом обеспечении многоуровневой гетерогенной струк-

туры // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 3–10.

7. 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.

8. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Возможности повышения долговечности деталей машин из цементуемых сталей комбинированным упрочнением // Вестник РГТА им. П.А. Соловьева. – 2012. – № 2. – С. 65–67.

9. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7. – С. 9–15.

10. Повышение контактной долговечности цементуемых подшипниковых сталей комбинированной обработкой / А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов, Д.Л. Соловьев, М.А. Жилев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/2 (288). – С. 83–89.

11. 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.

12. 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. Papshev D.D., Pronin A.M., Kubyshekin A.B. Efficiency of hardening of cemented machine parts // *Bulletin of Machine Building*. - 1990. - No. 8. - pp. 61-64
2. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. Chemical-thermal treatment of metals - M.: Metallurgy, 1985. - 256 p.
3. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Volobuev A.V. Innovative static-impulse processing // *Science intensive technology in mechanical engineering*. 2011. № 1(01). pp. 43-48
4. 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* (Обработка Металлов Давлением) (2) 2004. pp. 13-17.

5. Kirichek A.V., Soloviev D.L. Expansion of technological possibilities of strengthening processing of metal materials by wave deformation influence // *Science intensive technology in mechanical engineering*. 2014. No. 11(41). - pp. 28-35.

6. Kirichek A.V., Soloviyov D.L. Prospects of operation properties multiple increase by natural metal reinforcement at technological support of multi-level heterogeneous structure // *Strengthening Technologies and Coatings*. 2014. № 4 (112). pp. 3-10.2. Baskov, M.V. Investigation of cutter coatings impact upon quality parameters of surface layer and wear-resistance of parts during turning // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk*. 2017. №8. – pp. 38–43.

7. Effective technologies of surface plastic deformation and combined processing. / V.N. Belyaev, V.P. Ivanov, A.R. Ingemansson, A.N. Isaev, A.V. Kirichek et al. - Moscow: Izd. House "Spektr", 2014. - 403 p.

8. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Tarasov D.E. Possibilities of increasing the longevity of machine parts from cemented

steels by combined hardening // *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy. P.A. Soloviev*, 2012. № 2. - pp. 65-67

9. Increase of contact endurance of machine parts by heterogeneous deformation hardening by static-pulse treatment / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, S.V. Barinov, S.A. Silantiev // *Reinforcing technologies and coatings*. 2008. No. 7. - pp. 9-15

10. Increase of contact durability of cemented bearing steels by combined treatment / A.V. Kirichek, D.E. Tarasov, D.L. Soloviev, M.A. Zhilyaev // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2011. № 4/2 (288). - pp. 83-89

11. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Tarasov D.E. Strengthening of iron-carbon alloys by combined treatment with a deformation wave and cementation // *Reinforcing technologies and coatings*. 2013. No. 12. - pp. 36-39

12. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Tarasov D.E. Increasing the durability of machine parts by combined hardening. // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2016. № 2 (50). pp. 52-58.

Рецензент д.т.н. С.А. Зайдец

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научные технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru