

УДК 621.787:621.91

Бесцентровая упрочняюще-чистовая обработка ультразвуковым инструментом

В.П. Гилета^а, А.И. Безнедельный^б, В.Б. Асанов^с

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, Новосибирск, Россия

^аgileta.viktor@yandex.ru, ^бbeznedelnyy@corp.nstu.ru, ^сasanov@corp.nstu.ru

Статья поступила 2.10.2015, принята 16.11.2015

Детали цилиндрической формы обычно подвергаются поверхностному пластическому деформированию с наложением на инструмент ультразвуковых колебаний (УЗО) по токарной схеме с установкой в центровые отверстия или в патроне. Наряду с этим имеется целый ряд цилиндрических бесступенчатых деталей (ролики, штоки, поршневые пальцы, оси) с высокими требованиями к качеству поверхности по всей длине, которые целесообразнее обрабатывать по бесцентровой схеме. Основной проблемой УЗО по такой схеме является обеспечение стабильной окружной скорости и осевой подачи детали. Эти движения обеспечиваются за счет фрикционного взаимодействия детали с валковой системой, сопровождающегося проскальзыванием, которое зависит от характера нагружения и геометрических условий контактирования. Отсутствие данных о поведении детали при УЗО по бесцентровой схеме сдерживает ее применение. Движение детали исследовалось для двух схем получения осевой подачи: с разворотом одного из валков и принудительным проталкиванием отдельным механизмом. В работе установлено, что проскальзывание зависит от статической нагрузки, амплитуды колебаний инструмента, скорости вращения и угла разворота валков. Показано, что схема УЗО с подачей деталей за счет разворота валка применима для деталей с диаметром не более 10 мм. Более универсальными возможностями обладает бесцентровая схема с принудительным проталкиванием детали отдельным механизмом. Бесцентровая схема УЗО наряду с установкой деталей в патроне или в центрах формирует высокое качество поверхностного слоя со специфичной микрогеометрией. Полученные данные позволяют назначать режимы обработки с учетом явления проскальзывания и рекомендовать эту схему УЗО для цилиндрических бесступенчатых деталей, работающих в условиях изнашивания и усталостного нагружения.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование; упрочняюще-чистовая обработка; ультразвуковой инструмент; бесцентровая схема; валковая система; качество поверхностного слоя; микрогеометрия.

Centerless finishing and hardening processing with ultrasonic instrument

V.P. Gileta^а, A.I. Beznedelnyy^б, V.B. Asanov^с

Novosibirsk State Technical University; 20, K. Marks ave., Novosibirsk, Russia

^аgileta.viktor@yandex.ru, ^бbeznedelnyy@corp.nstu.ru, ^сasanov@corp.nstu.ru

Received 2.10.2015, accepted 16.11.2015

Cylindrical parts usually undergo surface plastic forming with ultrasonic vibrations applied to the instrument (ultrasonic processing) installed into centre holes or a holder according to the turning scheme. However, there is a wide range of cylindrical stepless parts (rollers, pillars, gudgeon pins, axes) with high demand for quality of the surface along the full length. They should be processed according to the centreless scheme. The main problem in a centreless ultrasonic processing is a support of stable peripheral speed and axial advance of the detail. These motions are the result of a friction engagement between a part and a rolling system. The engagement is followed by slippage that depends on the loading and geometry conditions of the engagement. The absence of any data about the part under centreless ultrasonic processing restricts its actual application. The motion of the part was studied for both schemes of axial advance acquisition: with roller swivel supply and forced pushing of a separate mechanism. It was established that slippage depends on a static load, instrument vibration amplitude, rotary axis speed and a roller angle. It is shown that the ultrasonic processing with roller swivel supply can be applied to the parts up to 10 mm in size. The centreless scheme with forced pushing by a separate mechanism has more universal performance capabilities. The centreless scheme for the ultrasonic processing along with a part positioning in holder or centres forms high quality of the surface layer with the specific microgeometry. The data obtained allow assigning production mode taking into account of slipping motion and suggesting this scheme of the ultrasonic processing for cylindrical stepless parts operating in the conditions of deterioration and fatigue loading.

Key words: surface plastic deformation; finishing and hardening processing; ultrasonic instrument; centerless scheme; roller system; surface layer quality; microgeometry.

Введение. Одним из эффективных технологических способов повышения эксплуатационных свойств деталей машин и приборов является применение поверхностного пластического деформирования (ППД) с нало-

жением на инструмент ультразвуковых колебаний (УЗО) [1–11]. Детали цилиндрической формы обычно подвергаются УЗО по токарной схеме с установкой в центровые отверстия или в патроне [12–15]. Наряду с

этим имеется большой ряд цилиндрических бесступенчатых деталей (ролики, штоки, поршневые пальцы, оси и др.), с высокими требованиями к качеству поверхности по всей длине, которые нецелесообразно обрабатывать с установкой в центровых отверстиях, так как требуется дополнительная операция их подготовки.

При бесцентровой УЗО параметры движения детали (скорость и подача) определяются условиями ее фрикционного взаимодействия с валками. Валковая система при этом выполняет роль ориентирующего и приводного устройства, в то время как при обработке в патроне и в центрах эти движения обеспечиваются кинематикой станка. Отсутствие данных о характере движения детали при УЗО по бесцентровой схеме [16] не позволяет давать технологические рекомендации по использованию этого метода ППД и требует проведения дополнительных исследований. Поэтому цель настоящей работы заключается в изучении особенностей движения детали при УЗО по бесцентровой схеме и выработке технологических рекомендаций по реализации данного метода ППД.

Оборудование, материалы и методы исследования. Для реализации этой цели был модернизирован бесцентрово-шлифовальный станок ЗГ182: абразивные круги заменены на металлические, изменен привод вращения кругов с целью обеспечения одинаковой линейной скорости валков. Станок дополнительно оснастили ультразвуковой системой, состоящей из ультразвукового генератора УЗГ3-4, магнестрикционного преобразователя ПМС15А-18, нагружающего устройства. Экспериментальная установка позволила обрабатывать детали диаметром от 3 до 80 мм и осуществлять разворот одного из валков в вертикальной плоскости на угол от 0 до 2° с погрешностью ± 2 минуты. Схема бесцентровой УЗО с разворотом валка представлена на рис. 1.

Образцами служили ролики, изготовленные из стали ШХ15СГ, термообработанные до твердости HRC 60...62, с поверхностной микротвердостью $H_{\mu} = 7\ 400$ МПа, с шероховатостью Ra 0,32 мкм.

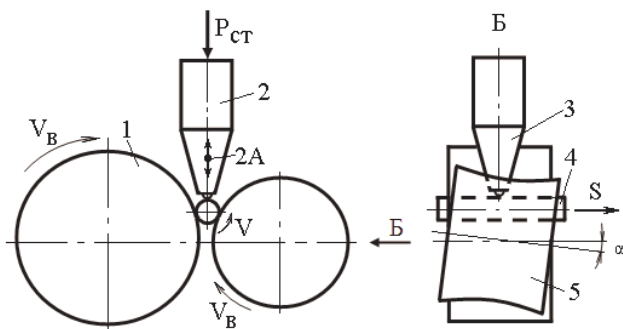


Рис. 1. Схема бесцентровой упрочняюще-чистой обработки ультразвуковым инструментом с разворотом валка: 1 — опорный валок; 2 — магнестрикционный преобразователь; 3 — ультразвуковой инструмент; 4 — обрабатываемая деталь; 5 — транспортирующий валок

Оценка качества поверхностного слоя обрабатываемой детали осуществлялась по физико-механическим и микрогеометрическим характеристикам. Микротвердость, шероховатость поверхности измерялись с помощью микротвердомера ПМТ-3М при нагрузке 1Н и профилографа-профилометра модели 252. Топография поверхности изучалась оптическими методами на металлографическом микроскопе, микроинтерферометре МИИ-4 и приборе NewView 7300.

Для оценки частоты вращения детали использовался тахометр стробоскопический, время перемещения детали оценивалось секундомером. Все приборы были калиброваны по образцовым мерам. Значения исследуемых параметров получены на основании многократных измерений.

Обсуждение результатов. На первом этапе исследований изучались возможности получения необходимых скоростей и подач детали при бесцентровой схеме УЗО. Подача детали может быть осуществлена двумя способами: путем разворота одного из валков или с помощью специального подающего механизма.

Наиболее простым вариантом реализации подачи является использование разворота валка, выполняющего роль транспортирующего. При этом следует иметь в виду, что для получения высокого качества поверхностного слоя обрабатываемой детали необходимо иметь подачи в диапазоне 0,05...0,12 мм/об при оснащении ультразвукового инструмента деформатором со сферической рабочей частью радиусом 5 мм. Расчеты показали, что для рассматриваемого диапазона подач требуются малые углы разворота транспортирующего валка в пределах 35...1 минут для диаметров 3...80 мм.

Экспериментами установлено (рис. 2), что валковая система не обеспечивает требуемый уровень подачи при развороте валка на теоретические углы независимо от диаметра обрабатываемой детали.

Например, при УЗО деталей диаметром 32 мм и 14 мм минимальные подачи 0,33 мм/об и 0,14 мм/об получаются только при развороте валка на угол 16' и 14', в то время как теоретические углы разворота составляют 11' и 10'. Кроме того, при использовании транспортирующего валка цилиндрической формы нарушается стабильность подачи во времени. Это объясняется тем, что обрабатываемая деталь имеет с транспортирующим валком локализованный контакт, близкий к точечному, приводящий к неустойчивому ее положению на валках, а также к возникновению значительных контактных напряжений на поверхностях, вызывающих изменение геометрии валка и, как следствие, действительной скорости подачи. Поэтому требуется постоянная корректировка геометрии валка. Так, например, для валков из дюралюминия Д16 через 10-14 мин работы необходима правка транспортирующего валка. Для устранения этого недостатка транспортирующий валок можно выполнить в виде однополостного гиперболоида вращения или придать ему более сложную форму, теоретически обеспечивающую линейный контакт с обрабатываемой поверхностью [17]. Дальнейшие исследования показали, что придание транспортирующему валку такой формы увеличивает время стабильной подачи заготовок до 4 раз. Анализ рассматриваемой схемы УЗО с

использованием транспортирующего вала в форме цилиндра или однополостного гиперболоида показал, что она обеспечивает требуемые величины подачи только для ограниченного диапазона диаметров деталей (до 10 мм).

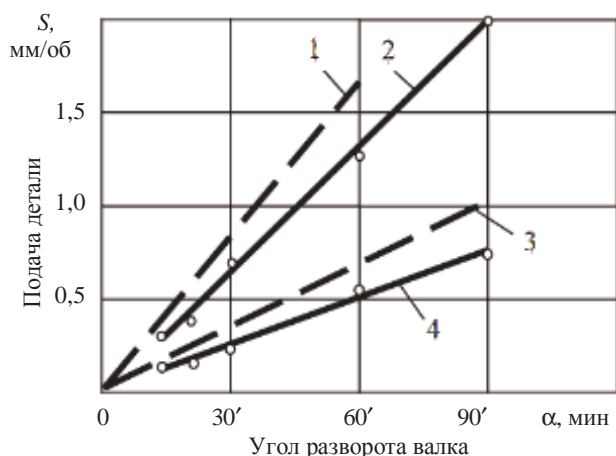


Рис. 2. Зависимость подачи детали от угла разворота вала: 1, 3 — расчетные подачи; 2, 4 — действительные подачи (диаметр детали 32 мм и 14 мм)

При назначении режимов УЗО необходимо знать действительную окружную скорость, осевую подачу детали и их стабильность во времени. Проведенные опыты показали, что действительные значения скорости и подачи отличаются от расчетных (рис. 3, 4).

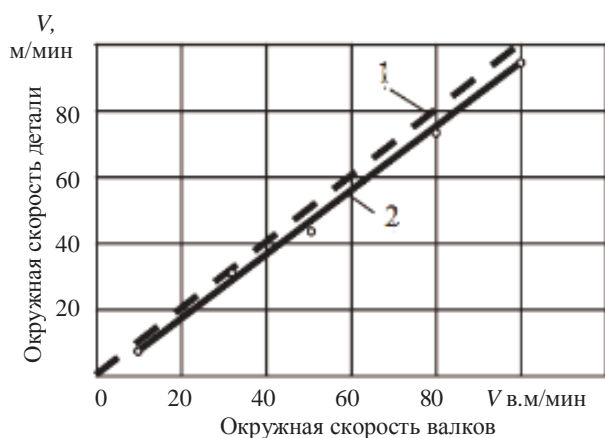


Рис. 3. Зависимость окружной скорости детали от окружной скорости валков: 1 — окружная скорость вала; 2 — окружная скорость детали (УЗО при $2A = 40$ мкм, $R_{ст} = 300$ Н)

Очевидно (рис. 3, 4), что зависимости скорости вращения и осевого перемещения детали от скорости валков при развороте транспортирующего вала на угол α представляют линейную функцию. Различие действительных значений V и S от расчетных объясняется наличием проскальзывания. Для оценки этого явления в работе были введены коэффициенты проскальзывания (k_v, k_s), определяемые как отношение действительных скоростей окружного и осевого движения детали к расчетным. Изменения значений этих коэффициентов в зависимости от режимов обработки представлены в табл. 1.

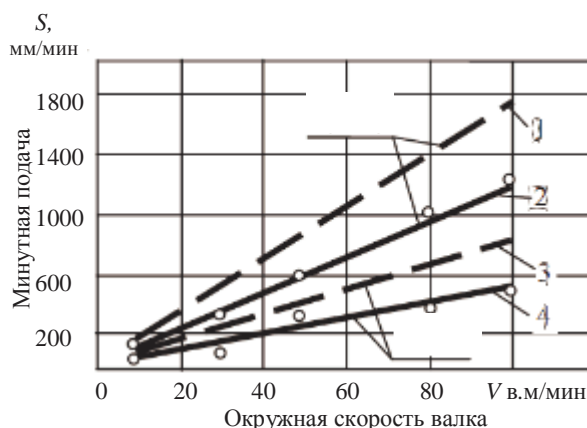


Рис. 4. Зависимость осевой подачи детали от окружной скорости и угла разворота вала: 1, 3 — без УЗО; 2, 4 — при УЗО

Таблица 1

Влияние режимов УЗО на коэффициенты проскальзывания

Режим обработки		Коэффициенты проскальзывания	
Двойная амплитуда колебаний, $2A, \text{мкм}$	Статическое усилие, $R_{ст}, \text{Н}$	Окружной, k_v	Осевой, k_s
20	300	0,961	0,730
40	300	0,943	0,712
60	300	0,913	0,671
20	100	0,965	0,730
20	200	0,960	0,735
20	500	0,960	0,732
60	200	0,906	0,673
60	400	0,911	0,678
60	500	0,907	0,675

Очевидно, что изменение статического усилия $R_{ст}$ в пределах от 100 до 500 Н практически не оказывает влияния на коэффициенты проскальзывания, а увеличение амплитуды колебаний с 20 до 60 мкм приводит к снижению коэффициентов k_v на 4-6 %, k_s — на 5-7 %.

В диапазоне скоростей вращения валков от 10 до 100 м/мин ($2A = 40$ мкм; $R_{ст} = 300$ Н; $\alpha = 30^\circ$) (рис. 5) величина проскальзывания сохраняется постоянной со значениями коэффициентов $k_v = 0,94$, $k_s = 0,71$. Графики показывают, что наложение на инструмент ультразвуковых колебаний ведет к увеличению проскальзывания между деталью и валками.

Для расширения диапазона размеров обрабатываемых деталей при бесцентровой УЗО были проведены дополнительные исследования с использованием принудительных подач проталкиванием.

Для обеспечения непрерывной подачи заготовок в зону обработки был применен механизм с двумя подающими профилированными роликами, соединенными беззазорной передачей с передаточным отношением $i = 1$. При этом функции валковой системы сводились

только к приданию заготовке окружной скорости (оси валков располагались параллельно друг другу).

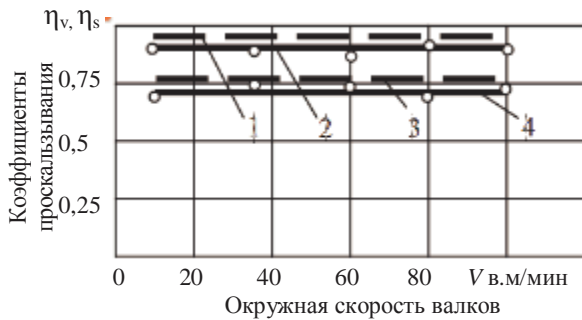


Рис. 5. Зависимость коэффициентов проскальзывания от окружной скорости валков: 1, 2 — окружной коэффициент η_v без обработки и при УЗО; 3, 4 — осевой коэффициент η_s без обработки и при УЗО

Изучение поведения детали на валках показало, что для этой схемы характерно получение стабильного вращения и осевого перемещения деталей независимо от их размеров. При этом коэффициент окружного проскальзывания составил $0,89...0,95$, это несколько ниже, чем в случае подачи детали разворотом валка, что, по-видимому, является следствием дополнительного трения между торцами обрабатываемой и подпирющих заготовок.

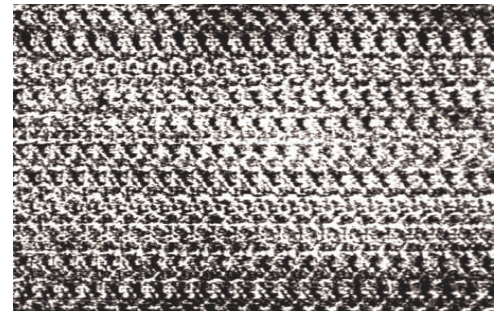
Данный вариант обработки обеспечил однородность качества поверхностного слоя деталей. Микротвердость, шероховатость, остаточные напряжения и содержание остаточного аустенита (табл. 2) близки к показателям, получаемым при УЗО с установкой детали в центровые отверстия и патроне [18–21].

Таблица 2

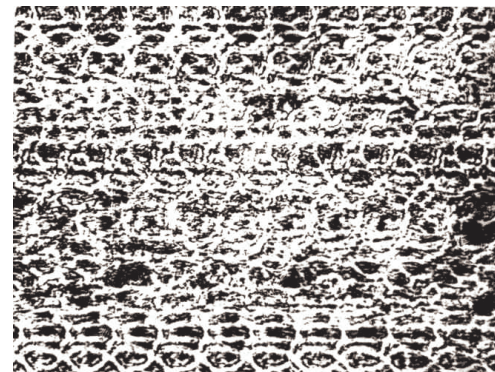
Характеристики качества поверхностного слоя

Вид обработки	Шероховатость R_a , мкм	Микротвердость H_c , МПа	Остаточные напряжения, МПа	Остаточный аустенит А, %
Шлифование чистовое	0,32	7600	+400	17
Шлифование чистовое + УЗО	0,08	10000	-620	8

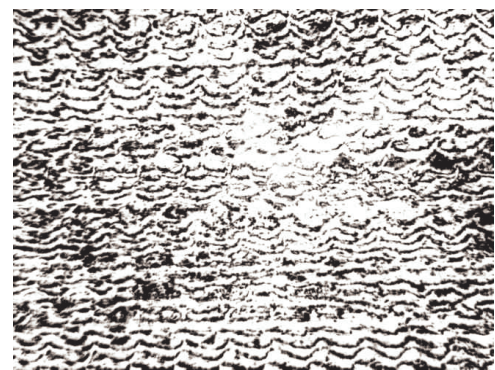
Топография и интерферограмма поверхности детали, подвергнутой УЗО по бесцентровой схеме, представлены на рис. 6. Как видно, поверхность после УЗО имеет специфичную микрогеометрию с характерной регулярной ячеистой структурой, что также свидетельствует о стабильности окружной скорости и осевой подачи.



a)



б)



в)

Рис. 6. Вид поверхности после бесцентровой УЗО: а) оптика, $\times 60$; б) оптика $\times 120$; в) интерферограмма

Выводы

1. Упрочняюще-чистовая обработка ультразвуковым инструментом по бесцентровой схеме позволяет получать высокое качество поверхности и может быть рекомендована для широкой номенклатуры цилиндрических деталей, работающих в условиях трения и усталостного нагружения.

2. УЗО цилиндрических деталей диаметром до 10 мм можно осуществлять с подачи за счет разворота валка в форме однополостного гиперболоида вращения.

3. Наиболее универсальной является схема УЗО с принудительной подачей проталкиванием, обеспечивающая обработку деталей в широком диапазоне размеров.

4. Полученные закономерности поведения заготовки при УЗО позволяют назначать требуемые режимы обработки.

Литература

1. Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Повышение стойкости вытяжных пуансонов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2007. № 4. С. 11-12.

2. Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Упрочняюще-чистовая обработка деталей двигателя внутреннего сгорания (ДВС) // *Материалы VI международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении – основа технологического развития России»*. Барнаул, 2014. С. 118-123.

3. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Eremina A.F. Technological peculiarities providing the surface quality parameters at ultrasonic surface hardening // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 698. P. 482-486.

4. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Eremina A.S. Modeling of deformation processes for conditions of ultrasonic frequency impulse impact on the surface layer of metals and alloys // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 63-68.

5. Krishna K., Verma P.E., Statnikov E.S., Theini L. Improving service life of steel bridges, light poles and sign structures through the use of ultrasonic impact treatment (UIT). *Proceedings of the Second International Conference "Bridge Maintenance, Safety, Management and Costs"*, Watanabe, Frangopol & Utsunomiya (eds.), Taylor & Francis Group. London, 2004.

6. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Lobanov L. Fatigue life improvement of welded elements by ultrasonic peening // *Int. Institute of Welding, IIW Document XIII-2010-04*. 2004. P. 20.

7. Sand A., Garca Navas V., Gonzalo O. Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample. *Materials and Design*. 2011. Vol. 32. P. 2213-2220.

8. Bagherifard S., Guagliano M. Fatigue behaviour of a low-alloy steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening // *Engineering Fracture Mechanics*. 2012. Vol. 81. P. 56-68.

9. Statnikov E.Sh., Vityazev V.N., Korolkov O.V. Study of comparative characteristics of ultrasonic impact and optimization of deformation treatment processes // *The Fourth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies, MMT*. 2006. P. 110-119.

10. Klimenov V.A., Kovalevskaya Zh.G., Nekhoroshkov O.N., Uvarkin P.V., Tolstov V.P. Increasing the life-time of wheels, rails, shafts and axes using ultrasonic processing of surfaces // *Proceedings of the 14th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2005, Czech Republic, Hrades nad Moravici, Ostrava, May 24-26*. 2005. P. 214-221.

11. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Сауткина М.Л., Скрынник В.А., Лихачев А.Л. Обеспечение качества поверхности деталей машин ультразвуковым пластическим деформированием перед нанесением покрытия // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2013. № 2. С. 4-7.

12. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхно-

сти при ультразвуковом пластическом деформировании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2012. № 3. С. 33-36.

13. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2011. № 3. С. 11-17.

14. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Формирование морфологии поверхности в процессе ультразвукового пластического деформирования деталей машин // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010. № 10. С. 20-23.

15. Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Технологические рекомендации по применению ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработки // *Труды 4-ой международной научно – практической конференции «Инновации в машиностроении»*. Новосибирск, 2013. С. 248-253.

16. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск, 2007. 404 с.

17. Муцяно В.И., Братчиков А.Я. Бесцентровое шлифование. М.: Машиностроение, 1986. 92 с.

18. Приходько В.М., Чудина О.Д. Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей с применением ультразвукового воздействия // *Вестн. Моск. автомобильно-дор. ин-та*. 2003. №3. С. 11-20.

19. Rakhimyanov Kh.M., Nikitin Y.V., Semyonova Yu.S. Surface preparation of machine parts and instruments by ultrasonic impact treatment before coating, in *The Third International Forum on Strategic Technologies, IFOST 2008 - Proceedings*, June 23-29. 2008. P. 108 - 114.

20. Безнедельный А.И., Асанов В.Б., Гилета В.П. Влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя закаленных сталей при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2012. № 4. С. 19-22.

21. Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Технологические возможности поверхностного пластического деформирования с использованием ультразвуковых колебаний // *Инженерия поверхностного слоя деталей машин: тр. междунар. научно-практ. конф. Кемерово, 2009*. С. 75-79.

Reference

1. Gileta V.P., Asanov V.B., Beznedel'nyi A.I. Increased resistance of draw punches // *METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE*. 2007. № 4. P. 11-12.

2. Gileta V.P., Asanov V.B., Beznedel'nyi A.I. Strengthening-cleaning treatment of the internal-combustion engine (ICE) parts // *Materiály VI mezhhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Innovatsii v mashinostroenii - osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii»*. Barnaul, 2014. P. 118-123.

3. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Eremina A.F. Technological peculiarities providing the surface quality parameters at ultrasonic surface hardening // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 698. P. 482-486.

4. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Eremina A.S. Modeling of deformation processes for conditions of ultrasonic fre-

quency impulse impact on the surface layer of metals and alloys // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 788. P. 63-68.

5. Krishna K., Verma P.E., Statnikov E.S., Theini L. Improving service life of steel bridges, light poles and sign structures through the use of ultrasonic impact treatment (UIT). Proceedings of the Second International Conference "Bridge Maintenance, Safety, Management and Costs", Watanabe, Frangopol & Utsunomiya (eds.), Taylor & Francis Group. London, 2004.

6. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Lobanov L. Fatigue life improvement of welded elements by ultrasonic peening // Int. Institute of Welding, IIW Document XIII-2010-04. 2004. P. 20.

7. Sand A., Garca Navas V., Gonzalo O. Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample. Materials and Design. 2011. Vol. 32. P. 2213-2220.

8. Bagherifard S., Guagliano M. Fatigue behaviour of a low-alloy steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening // Engineering Fracture Mechanics. 2012. Vol. 81. P. 56-68.

9. Statnikov E.Sh., Vityazev V.N., Korolkov O.V. Study of comparative characteristics of ultrasonic impact and optimization of deformation treatment processes // The Fourth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies, MMT. 2006. P. 110-119.

10. Klimenov V.A., Kovalevskaya Zh.G., Nekhoroshkov O.N., Uvarkin P.V., Tolstov V.P. Increasing the life-time of wheels, rails, shafts and axes using ultrasonic processing of surfaces // Proceedings of the 14th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2005, Czech Republic, Hrades nad Moravici, Ostrava, May 24-26. 2005. P. 214-221.

11. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Sautkina M.L., Skrynnik V.A., Likhachev A.L. Support of the surface quality of the machine parts with ultrasonic plastic forming before coating // METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE. 2013. № 2. P. 4-7.

12. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S. Technological support of the geometrical parameters of the surface quality under

ultrasonic plastic forming // METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE. 2012. № 3. P. 33-36.

13. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S. Prediction of the geometric condition of cylindrical parts surface made of steel 45 under ultrasonic surface plastic forming // METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE. 2011. № 3. P. 11-17.

14. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S. Formation of the surface morphology during ultrasonic plastic forming of the machine parts // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2010. № 10. P. 20-23.

15. Gileta V.P., Asanov V.B., Beznedel'nyi A.I. Technological recommendations for the use of ultrasonic strengthening-cleaning treatment // Trudy 4-oi mezhdunarodnoi nauchno - prakticheskoi konferentsii «Innovatsii v mashinostroenii». Novosibirsk, 2013. P. 248-253.

16. Technological processes of the surface plastic forming / pod red. S.A. Zaidesa. Irkutsk, 2007. 404 p.

17. Mutsyanko V.I., Bratchikov A.Ya. Centerless grinding. M.: Mashinostroenie, 1986. 92 p.

18. Prikhod'ko V.M., Chudina O.D. The combined technologies of surface hardening of structural steels using ultrasonic action // Vestnik MADI. 2003. № 3. P. 11-20.

19. Rakhimyanov Kh.M., Nikitin Y.V., Semyonova Yu.S. Surface preparation of machine parts and instruments by ultrasonic impact treatment before coating, in The Third International // Forum on Strategic Technologies, IFOST 2008 - Proceedings, June 23-29, 2008. P. 108-114.

20. Beznedel'nyi A.I., Asanov V.B., Gileta V.P. Technological inheritance influence on surface layer forming in condition of ultrasonic plastic deformation of hardened steels // METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE. 2012. № 4. P. 19-22.

21. Gileta V.P., Asanov V.B., Beznedel'nyi A.I. Technological possibilities for the surface plastic forming using ultrasonic vibrations // Inzheneriya poverkhnostnogo sloya detalei mashin: tr. mezhdunar. nauchno-prakt. konf. Kemerovo, 2009. P. 75-79.