



УДК 669.14-15:621.78

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 40X

Е.Е.Ильина<sup>а</sup>, Н.В.Продан<sup>а</sup>, С.А.Вологжанина<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: svet\_spb@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию 13.10.15, принята к печати 14.05.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-635-641

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Ильина Е.Е., Продан Н.В., Вологжанина С.А. Использование пульсаций давления колеблющегося газового потока для обработки термоупрочненных образцов стали 40X // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 635–641. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-635-641

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Представлен опыт применения усовершенствованной технологии аэроакустической обработки материалов для повышения ударной вязкости образцов конструкционной стали марки 40X. В основе метода лежит воздействие на образец пульсирующего воздушного потока, содержащего колеблющиеся ударно-волновые структуры. В результате в образце возникают так называемые волны Максвелла, которые могут привести к благоприятному изменению микро- и субструктуры, а также фазовой структуры, в частности, в закаленных сталях. Полученных изменений может оказаться достаточно для повышения ударной вязкости и снижения опасного уровня остаточных напряжений, возникающих в процессе предшествующих обработок. Это способствует уменьшению деформации деталей и понижению вероятности их разрушения при дальнейшей обработке или эксплуатации. Достоинством технологии является исключение дополнительной термической обработки, например, релаксационного отжига, служащего для уменьшения остаточных напряжений. Это может оказаться полезным, в частности, для сохранения высокой твердости и износостойкости, полученной при закалке и низком отпуске (около 200 °С), так как релаксационный отжиг, имеющий, как правило, более высокую температуру, приведет к их снижению. В качестве показателя положительного влияния рассматриваемой обработки принято увеличение ударной вязкости образцов. **Основные результаты.** Определены характеристики и режимы экспериментального акустического излучателя, реализующего аэроакустическую обработку. Проведены эксперименты по оценке влияния аэроакустического воздействия на ударную вязкость широко используемой стали 40X. Полученные результаты позволяют предполагать, что применение аэроакустической обработки для упрочненных термической обработкой образцов приводит к увеличению ударной вязкости исследованного материала. При этом сохраняется повышенное значение твердости, полученное после термообработки. **Практическая значимость.** Результаты работы дополняют полученные ранее экспериментальные данные по аэроакустической обработке металлических материалов. Они могут быть использованы (после повышения статистической достоверности данных) при разработке технологии обработки деталей, для которых важно наличие высокой твердости и износостойкости при достаточной ударной вязкости.

**Ключевые слова**

термическая обработка стали, закалка, отпуск, аэроакустическая обработка, резонатор, генератор акустического излучения, волны Максвелла, ударная вязкость

**Благодарности**

Авторы выражают благодарность Ивановой Т.Б. за проведение фрактографических исследований на базе кафедры НТМ Университета ИТМО и Приходько О.А. за ценные замечания и рекомендации.

## USAGE OF PRESSURE OSCILLATIONS OF FLUCTUATING GAS FLOW FOR HANDLING OF 40X HARDENED STEEL SAMPLES

Е.Е. Ilina<sup>а</sup>, N.V. Prodan<sup>а</sup>, S.A. Vologzhanina<sup>а</sup><sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: svet\_spb@mail.ru

**Article info**

Received 13.10.15, accepted 14.05.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-635-641

Article in Russian

**For citation:** Ilina E.E., Prodan N.V., Vologzhanina S.A. Usage of pressure oscillations of fluctuating gas flow for handling of 40X hardened steel samples. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 635–641. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-635-641

#### Abstract

**Subject of Research.** The paper deals with experience in the use of advanced technology of aeroacoustic treatment of materials for impact toughness improvement of the 40X type constructional steel samples. The method is based on the influence of pulsating air stream with oscillating shock-wave structures on the sample. As a result, the so-called Maxwell's waves are generated in the sample, that can lead to a beneficial transformation in the micro- and substructure and also in the phase structure of hardened steels. Obtained changes may be enough to improve impact toughness and decrease the residual stresses that arise in the course of previous treatments. Distortion of components decreases in this case, and failure probability becomes lower at the further treatment and operation. The advantage of technology is elimination of the additional heat treatment, for example, of the relaxation annealing that serves to reduce the residual stresses. This can be useful, particularly, for the preservation of high hardness and wear resistance, obtained by hardening and low-temperature tempering (about 200 °C), as the relaxation annealing has typically a higher temperature and will result in their reduction. The toughness increase of the samples is assumed as an indicator of the positive impact of the considered treatment. **Main Results.** We have defined characteristics and modes of experimental acoustic transducer implementing the aeroacoustic processing. Experiments have been carried out on the impact assessment of aeroacoustic effects on the toughness of widely used 40X type steel. The obtained results enable to suggest that the application of aeroacoustic treatment for samples hardened by heat treatment leads to the toughness increasing of the investigated material. In this case an increased value of hardness obtained after heat treatment is maintained. **Practical Relevance.** The results supplement previously obtained experimental data for aeroacoustic processing of metallic materials. They can be used (after increasing data statistical reliability) in development of component treatment technology, where there is important to have high hardness and wear resistance with adequate toughness.

#### Keywords

steel heat treatment, hardening, tempering, aeroacoustic treatment, resonator, acoustic radiation oscillator, Maxwell's waves, impact toughness

#### Acknowledgements

The authors thank T.B. Ivanova for carrying out fractographic research at ITMO University Department of Nanotechnologies and Material Science and O.A. Prikhodko for his valuable comments and recommendations.

### Введение

Одной из задач обеспечения работоспособности термоупрочненных сталей в изделиях является уменьшение риска деформации и разрушения изделий в процессе обработки или эксплуатации при сохранении высокой твердости и износостойкости. Перспективным в данном случае может оказаться метод аэроакустической обработки (ААО), основанный на периодическом воздействии ударно-волновых структур, содержащих колебания дискретного тона за счет возникновения в материале волн Максвелла [1, 2]. Такая обработка, по нашему мнению, позволяет влиять на параметры микро- и субструктуры металлических материалов, а также вызывать в них фазовые изменения [3, 4]. В результате должны происходить релаксационные процессы, которые вызывают повышение размерной стабильности деталей за счет снижения уровня остаточных напряжений и сопутствующее ему увеличение ударной вязкости (КСУ) [5, 6]. При этом важно, чтобы релаксация протекала достаточно локально, в областях наибольшей концентрации напряжений. Это позволит сохранить высокие значения твердости и износостойкости, полученные при предшествующей термической обработке. В некоторых случаях [7, 8] наблюдалось повышение твердости на образцах, прошедших закалку с высоким отпуском и после этого подвергнутых ААО.

Высокий уровень остаточных напряжений, возникающих, в частности, в процессе упрочняющей термической обработки, может привести к недопустимой деформации деталей, а также их разрушению при дальнейшей обработке или эксплуатации. ААО призвана стать одним из вариантов решения проблемы, поскольку, как показывают предыдущие исследования, приводит к увеличению ударной вязкости, что во многом связано со снижением уровня нежелательных остаточных напряжений. Этому, по видимому, способствует фазово-структурная эволюция в материалах, происходящая при ААО.

Целью настоящей работы являлась оценка степени влияния аэроакустической обработки на ударную вязкость образцов стали 40X, предварительно подвергнутых упрочняющей термической обработке.

### Описание предлагаемого метода

В работе поставлены следующие задачи:

- определить возможность управления параметрами использованного акустического излучателя с целью получения оптимальных режимов ААО;
- дать оценку влияния выбранного режима ААО на ударную вязкость и твердость образцов стали 40X, предварительно прошедших упрочняющую термообработку.

Для реализации метода аэроакустической обработки применен акустический излучатель, состоящий из специального резонатора и генератора Гавро, использующего эффект генерации колебаний при натекании дозвукового (имеющего скорость меньше скорости звука) потока на острую кромку («нож»).

За счет изменения геометрических параметров излучателя получена возможность настройки генерации акустических колебаний широкого спектра (шума), имеющего дискретный тон определенной частоты.

Принцип работы излучателя (рис. 1) основан на преобразовании энергии сжатого воздуха в энергию пульсирующего потока с излучением в пространство акустических волн. Воздух, под давлением  $P_0$  подаваемый из магистрали 1 в центральный канал 2, проходит через щелевое радиальное сопло 3. Выходящая из сопла плоская радиальная веерная струя натекает на острую кромку кольцевой диафрагмы 4. Пульсирующий поток формируется в регулируемом объеме резонатора 6 и распространяется в направлении 5. Выбор амплитудно-частотных характеристик излучения осуществляется за счет изменения ширины зазора  $h$ , диаметра диафрагмы  $d$ , а также изменения объема резонатора  $V$  перемещением стенки 7. Резонатор для акустического излучателя разработан и изготовлен на основе патента [9].

При акустической обработке образец подвергается комбинированному воздействию колебаний газового потока при пульсации давления, что должно способствовать изменению фазово-структурных параметров материала. Регистрация характеристик акустического излучения производится акустическим датчиком с шумомером и анализатором спектра частот колебаний. Сигналы датчиков поступают в систему регистрации данных по каналу RS-232.

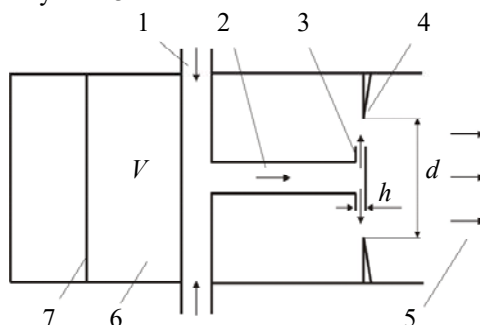


Рис. 1. Акустический излучатель: 1 – вход магистрали; 2 – центральный канал; 3 – радиальное сопло; 4 – кольцевая диафрагма; 5 – направление излучения; 6 – резонатор; 7 – стенка резонатора ( $d$  – диаметр кольцевой диафрагмы,  $h$  – ширина зазора щелевого сопла,  $V$  – объем резонатора)

### Технологические режимы аэроакустической обработки

Так как в данной работе образцы подвергались акустическому воздействию только при комнатной температуре, то, в отличие от предыдущих экспериментов, было использовано понятие аэроакустической (ААО), а не аэротермоакустической (АТАО) обработки.

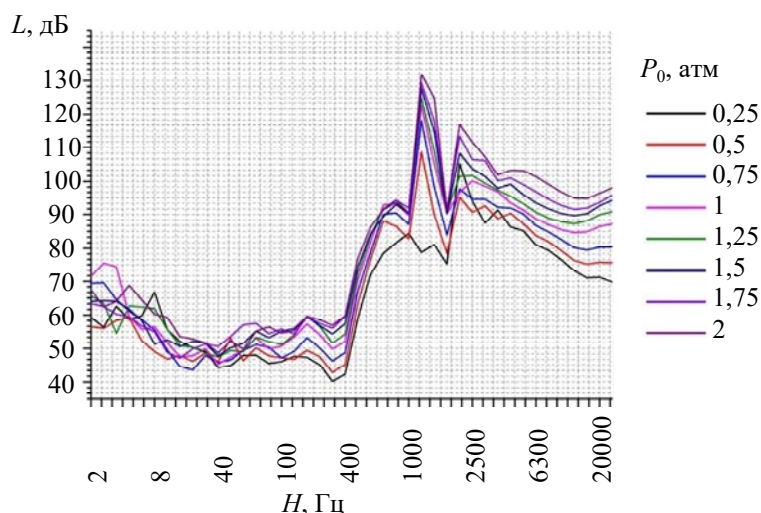


Рис. 2. Спектр акустического излучения  $L = f(H)$ , формирующийся при давлении  $P_0$  от 0,25 до 2 атм ( $h = 2$  мм,  $d = 100$  мм,  $V = 1428$  см<sup>3</sup>)

Для регулировки режима ААО устанавливалась связь между параметрами излучателя и характеристиками акустического излучения. С целью оценки влияния на характеристики резонатора и диафрагмы были проведены эксперименты с использованием и без использования диафрагмы и резонатора. В процессе оптимизации режима ААО измерялся интегральный уровень шума веерной струи. Было установлено, что наличие резонатора повышает уровень шума более чем на 40%. Установка диафрагмы, на острую кромку которой натекает веерная струя, дала возможность реализовать колебательные процессы с

устойчивыми значениями частоты и амплитуды. Это позволило регулировать частоту  $H$  дискретного тона акустического излучения в интервале от 500 до 2200 Гц. При настройке излучателя были получены оптимальные для данного эксперимента параметры:  $h = 2$  мм,  $d = 100$  мм,  $P_0 = 2$  атм,  $V = 1428$  см<sup>3</sup>. Эти параметры соответствовали наиболее высокому звуковому давлению акустического излучения  $L = 131$  дБ вблизи выбранной частоты  $H = 630$  Гц (рис. 2).

Такие характеристики акустического излучения были применены в данной работе для ААО образцов стали 40Х. Однако в спектре, кроме этого, присутствуют высокоэнергетические колебания (широкополосный ударно-волновой шум) с давлением около 100 дБ и частотами, близкими к ультразвуковому диапазону, которые также вызывают в образце колебания, ускоряющие релаксационные процессы [10–13].

### Материал исследования

В качестве материала исследования выбрана сталь 40Х. Выбор обусловлен широким применением данной низколегированной стали. Закалка и низкий отпуск этой стали обеспечивают высокие значения твердости и износостойкости, но при малой ударной вязкости. Закалка и высокий отпуск позволяют получить сочетание оптимальной для многих применений прочности, пластичности и вязкости при уменьшенной твердости и износостойкости [14]. Низкий отпуск (около 200 °С) не приводит к снижению уровня остаточных напряжений, достаточному для приемлемого повышения вязкости. При высоком отпуске (около 600 °С) напряжения снижаются в полной мере, что вызывает повышение вязкости, но при значительном уменьшении твердости [15].

Эксперимент по изучению влияния ААО на ударную вязкость образца проводился в следующей последовательности.

1. Закалка, включающая нагрев до 850 °С, выдержку 30 мин и охлаждение в воде образцов с  $U$ -образным концентратором напряжений, имеющих стандартные для испытаний на ударный изгиб геометрические параметры.
2. Низкий отпуск образцов (200 °С), выдержка 30 мин и охлаждение на воздухе (проводился для половины закаленных образцов).
3. Воздействие на термообработанные образцы при комнатной температуре в течение 15–20 мин пульсирующим дозвуковым воздушным потоком широкого диапазона с частотой колебаний дискретного тона  $H$  около 630 Гц и уровнем звукового давления  $L$  около 130 дБ.
4. Испытания на ударный изгиб с применением маятникового копра в соответствии с нормативным документом<sup>1</sup>, используя по 3 образца на один вариант обработки.
5. Фрактографический анализ полученных изломов образцов с применением сканирующего электронного микроскопа Quanta Inspect на кафедре нанотехнологий и материаловедения Университета ИТМО.

### Полученные результаты и их анализ

На рис. 3 представлено влияние различных режимов термической обработки, а также термической обработки, дополненной ААО, на величину ударной вязкости образцов из стали 40Х.

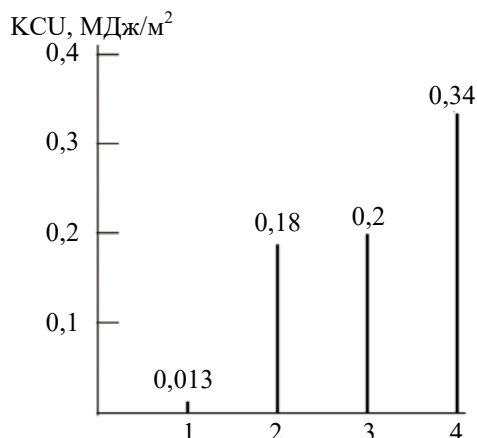


Рис. 3. Результаты испытаний на ударную вязкость (КСУ) при различных видах обработки: 1 – закалка; 2 – закалка + ААО; 3 – закалка + низкий отпуск; 4 – закалка + низкий отпуск + ААО

Полученные результаты демонстрируют повышение ударной вязкости за счет дополнительной ААО как после закалки, так и после закалки и низкого отпуска. Однако значения ударной вязкости остаются меньше рекомендуемой для конструкционной стали величины КСУ (не менее 0,4 МДж/м<sup>2</sup>). Для

<sup>1</sup> ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Введ. 01.01.1979. М.: Изд-во стандартов, 1978. 12 с.

стали 40Х эта величина, например, после закалки и высокого отпуска в соответствии с нормативным документом<sup>1</sup> должна составлять не менее 0,59 МДж/м<sup>2</sup>.

Фрактографические исследования проводились на основе сопоставления изломов образцов, разрушенных после испытания на ударный изгиб, с данными справочника-атласа «Дефекты в металлах» [16].

На изломе образца, подвергнутого ААО после закалки, обнаружены выделения, предположительно карбидной фазы (позиция 1, рис. 4, б), отсутствующие на изломе закаленного образца, не прошедшего ААО (рис. 4, а). В закаленной стали типа 40Х образование карбидов, связанное с выходом из решетки мартенсита атомов углерода, заметно лишь после отпуска при температуре около 200 °С. ААО, по всей видимости, ускорило процессы выделения углерода и образования карбидов. При этом, как известно, снижается уровень растягивающих остаточных (закалочных) напряжений, что сопряжено с уменьшением тетрагональных искажений мартенсита, обусловленных присутствием избыточной концентрации в решетке атомов углерода. Это способствует наблюдаемому повышению ударной вязкости закаленной стали после ААО.

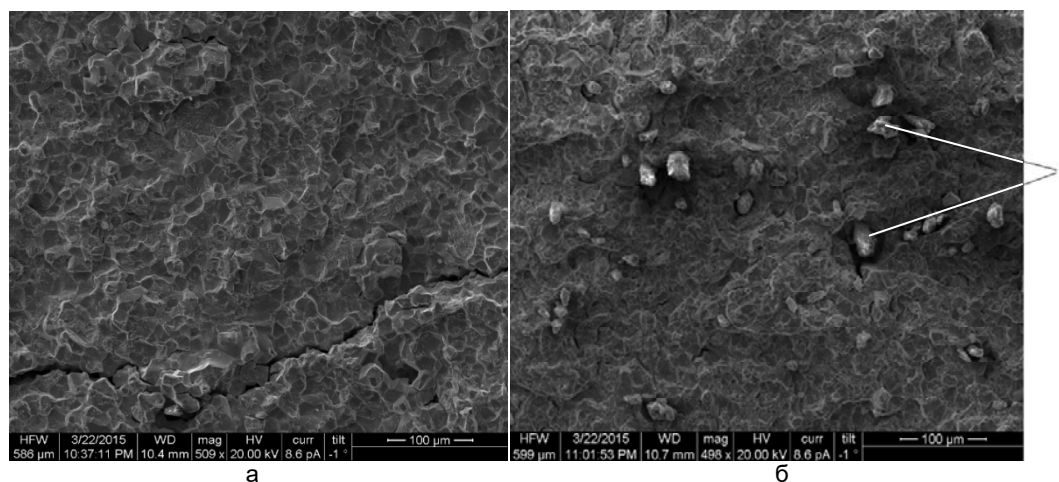


Рис. 4. Структура излома образца при увеличении 500<sup>×</sup> после закалки (а) и закалки + ААО (б)

Известно, что традиционная термическая обработка, предназначенная для получения высокой твердости деталей, сопоставимых по размерам с образцами Менаже, включает низкий отпуск в течение 1,5–2 ч, проводимый после закалки. Столь продолжительный отпуск требуется для понижения уровня закалочных напряжений и некоторой стабилизации энергетического состояния материала [15]. При этом существенно увеличилась ударная вязкость, но последующая ААО, проведенная всего в течение 15 мин, повысила ударную вязкость еще в 1,7 раза. Это, по-видимому, связано с дальнейшим снижением закалочных напряжений за счет более полного выхода из решетки избыточного углерода.

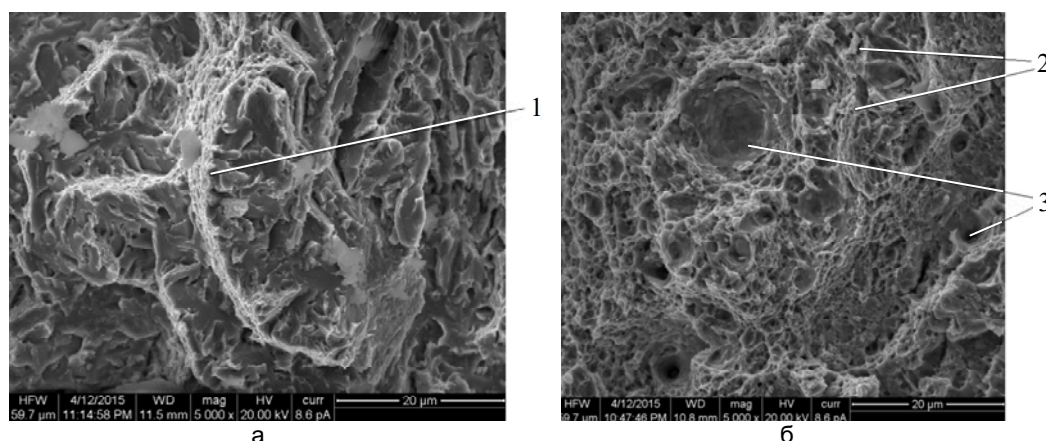


Рис. 5. Структура излома образца при увеличении 5000<sup>×</sup> после закалки и низкого отпуска (а) и закалки, низкого отпуска и ААО (б)

<sup>1</sup> ГОСТ 4543-71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. Введ. 01.01.1973. М.: Изд-во стандартов, 2001. 41 с.

Подтверждение этому представлено на фотографиях изломов образцов (рис. 5). Электронно-микроскопическое исследование выявило рыхлое строение изломов образцов после закалки и низкого отпуска (позиция 1, рис. 5, а), типичное для хрупкого разрушения. После дополнительной ААО термобработанных образцов излом можно характеризовать как мелкоячеистый (позиция 2, рис. 5, б) с присутствием отдельных более крупных ямок (позиция 3, рис. 5, б). Это свидетельствует о квазихрупком характере разрушения, которому уже предшествует заметное пластическое деформирование.

### Заключение

Использованный в работе акустический излучатель позволил в достаточных для проведенных исследований пределах управлять характеристиками излучения с целью оптимизации режимов аэроакустической обработки. Для проведения аэроакустической обработки образцов стали 40Х применялось акустическое излучение широкого спектра с максимальным звуковым давлением около 130 дБ при частоте дискретного тона вблизи 630 Гц. Кроме этого, в спектре присутствовал широкополосный ударно-волновой шум со значительным звуковым давлением (около 100 дБ) и частотой, сопоставимой с ультразвуком, что также должно способствовать развитию релаксационных процессов в материале обрабатываемых образцов.

Полученные результаты показали, что метод аэроакустической обработки может оказаться перспективным, в частности, для термически обработанных изделий из конструкционной стали типа 40Х при необходимости повышения ударной вязкости без снижения твердости и износостойкости. Результаты носят предварительный характер, так как при измерении ударной вязкости образцов, находящихся в хрупком состоянии, как правило, наблюдается большой разброс получаемых значений. В дальнейших исследованиях предполагается повышение статистической значимости результатов. Кроме этого, при дальнейших исследованиях для повышения объективности оценки изменений фазово-структурных параметров материала образцов потребуются более подробное и всестороннее исследование изломов, получаемых при механических испытаниях.

### References

1. Bulat P.V., Zasukhin O.N., Uskov V.N. On classification of flow regimes in a channel with sudden expansion. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 233–246. doi: 10.1134/S0869864312020072
2. Zasukhin O.N., Bulat P.V., Prodan N.V. Base pressure oscillations. *Fundamental'nye Issledovaniya*, 2012, no. 3–1, pp. 204–207. (In Russian)
3. P'ina E.E., Vologzhanina S.A., Ivanov D.A. Effect of thermal treatment on the acoustic properties of the surface layers of steel products. *Materialy XXII Ural'skoi Shkoly Metallovedov-Termistov* [Proc. XXII Ural School of Metallurgists-Treater]. Orsk, Russia, 2014, pp. 222–223.
4. P'ina E.E., Vologzhanina S.A., Ivanov D.A., Igolkin A.F., Zasukhin O.N. Assessing the impact of thermal processing on the acoustic properties of steel 40X. *Materialy XVII Mezhd. Nauchno-Prakt. Konf. Tekhnologiya Uprochneniya, Naneseniya Pokrytii i Remonta: Teoriya i Praktika* [Proc. XVII Int. Conf. on Hardening Technology, Coating and Repair: Theory and Practice]. St. Petersburg, 2015, pp. 292–295.
5. Vorob'eva G.A., Ivoditov A.N., Sizov A.M. O strukturnykh prevrashcheniyakh v metallakh i splavakh pod deistviem impul'snoi obrabotki [On the structural transformations in metals and alloys under the influence of pulse treatment]. *Izvestiya AN SSSR. Metalliya*, 1991, no. 6, pp. 131–137.
6. Erofeev V.K., Vorobjeva G.A. Conceptual model of influence aérothermoacoustic processing on proprieties of metal materials. *Metalloobrabotka*, 2009, no. 3, pp. 31–38.
7. Erofeev V.K., Vorobjeva G.A. Investigation of the effect of aéroacoustic treatment on the structure of high-speed tool steels and alloys. *Metalloobrabotka*, 2009, no. 6, pp. 34–40. (In Russian)
8. Ivanov D.A. Increase of constructive durability of metal materials by their processing by non-stationary gas streams without preliminary heating. *Technico-Tehnologicheskie Problemy Servisa*, 2011, no. 4, pp. 24–29.
9. Bulat P.V., Prodan N.V., Zasukhin O.N., Ivanov D.A. *Acoustic Transducer. Patent on Utility Model no. 152649*, 2014.
10. Vagapov I.K., Ganiev M.M., Shinkarev A.S. Theoretical and experimental study of the dynamics of ultrasonic vibro-impact system with an intermediate firing pin. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2008, no. 5, pp. 3–24. (In Russian)
11. Vityaz P.A., Gordienko A.I., Kheifetz M.L. Designing of the processes using for strengthening processing of constructional materials concentrated energy fluxes. *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya*, 2011, no. 1, pp. 8–14.
12. Gavrilova T.M. Contact friction in the deformation zone during ultrasonic surface plastic deformation. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 8, pp. 764–768. doi: 10.3103/S1068798X08080078
13. Kiselev E.S., Blagovskii O.V. Application of ultrasonic treatment in the manufacture of critical parts. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2011, no. 5, pp. 33–37.



14. *Marochnik Stalei i Splavov* [Grade Guide of Steel and Allows]. Ed. A.S. Zubchenko. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, 672 p.
15. Novikov I.I. *Metal Science*. Ed. V.S. Zolotarevskii. Moscow, MISIS Publ., 2009, vol. 2, 496 p.
16. Ezhov A.A., Gerasimova L.P. *Defects in Metals. Reference-Atlas*. Moscow, Russkii Universitet Publ., 2002, 360 p. (In Russian)

<i>Ильина Екатерина Евгеньевна</i>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, il-190.89@mail.ru
<i>Продан Николай Васильевич</i>	– инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kolinti@mail.ru
<i>Вологжанина Светлана Антониновна</i>	– доктор технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, svet_spb@mail.ru
<i>Ekaterina E. Pina</i>	– postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, il-190.89@mail.ru
<i>Nikolay V. Prodan</i>	– engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kolinti@mail.ru
<i>Svetlana A. Vologzhanina</i>	– D.Sc., Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, svet_spb@mail.ru