

6. **Kun T.** Struktura nauchnyh revolutsii [Structure of scientific revolutions]. — Moscow: Progress, 1977. — 300 p. [in Russian].
7. **Grigoriev S. N.** Tehnologicheskie printsipy osazhdeniya iznosostoikikh nanopokrytii dlya primeneniya v instrumental'nom proizvodstve [The technological principles of sedimentation of wearproof nanocoatings for application in tool production] / Uch. Zap. KnAGTU. 2011. N 1. P. 92 – 98 [in Russian].
8. **Vereshchaka A. P.** Analiz tendentsii sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh proizvodstvennykh sred [Analysis of tendencies of improvement of technological production environments] / Proc. of the Int. Sci.-Tech. Conf. «Innovative materials and technologies: achievements, problems, decisions. School seminar on fundamental bases of creation of innovative materials and technologies». In 2 parts. — Komsomolsk-on-Amur: Izd. KnAGTU, 2013. — 379 p. [in Russian].
9. **Verkhoturov A. D., Babenko E. G., Makiyenko V. M.** Metodologiya sozdaniya svarochnykh materialov: monografiya [Methodology of creation of welding materials: monograph]. — Habarovsk: Izd. DVGUPS, 2008. — 126 p. [in Russian].
10. **Mokritsky B. Y., Petrov V. V., Vysotsky V. V., Artemenko A. V.** Skhemy nagruzheniya i metodiki otsenki fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik i éksplyuatatsionnykh svoystv instrumental'nykh materialov [Schemes of loading and technique of an assessment of physico-mechanical characteristics and operational properties of tool materials] / Uch. Zap. KnAGTU. 2013. N 4. P. 51 – 59 [in Russian].

УДК 621.002.56;621.658.562;620.179.16.05

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ МЕТОДОМ МНОГОРАКУРСНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© В. П. Иванников, А. В. Кабакова¹

Статья поступила 16 декабря 2014 г.

Предложен способ количественной оценки качества соединений с натягом ультразвуковым эхоимпульсным методом. Показано, что коэффициент отражения — основной параметр, характеризующий качество соединения с натягом, т.е. его нагрузочную способность, определяемую максимальным значением крутящего момента, передаваемого прессовым соединением, поскольку он связан с нормальными напряжениями на контактирующих поверхностях соединения. Получена формула для вычисления коэффициента отражения ультразвука от места посадки соединения по измеряемым амплитудам эхоимпульсов в свободном кольце и в собранном соединении. Выделены и описаны характерные особенности методики исследования, позволяющие получить достаточно точную оценку качества соединений с натягом как на отдельных локализованных участках посадки, так и осредненную по окружности соединения при многокурсовом исследовании объекта по различным направлениям в заданной плоскости ультразвукового зондирования. Особое внимание уделено возможности и целесообразности автоматизации процесса контроля на основе метода многокурсового ультразвукового зондирования с целью оптимизации процесса исследования качества соединения.

Ключевые слова: соединения с натягом; ультразвуковой эхоимпульсный метод; коэффициент отражения; многокурсовое ультразвуковое зондирование.

При разработке методов исследования соединений с натягом (СсН) необходимо решать задачу не только получения достоверной информации о месте расположения соединения и характере его напряженно-деформированного состояния, но и определения локальной и средней величины натяга в соединении для оценки и достоверного прогнозирования рабочего ресурса конструкции.

Известно, что точность исполнения геометрических параметров СсН определяется точностью формы и взаимного расположения образующих соединение поверхностей [1, 2]. Отклонения (погрешности) формы и расположения поверхностей от установленных

номинальных значений возникают в процессе обработки деталей из-за неточности и деформации станка, инструмента и приспособления, деформации обрабатываемого изделия, неоднородности материала заготовки и др. В связи с искажением заданного геометрического профиля контактирующей поверхности соединения уменьшается его прочность и нарушается точность центрирования, снижаются эксплуатационные и технологические показатели соединения. При увеличении нагрузок, угловых скоростей, рабочих температур, характерных для современных машин, негативное влияние указанных факторов на эксплуатационные характеристики изделий на основе СсН усиливается. Таким образом, обеспечение максималь-

¹ Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия.

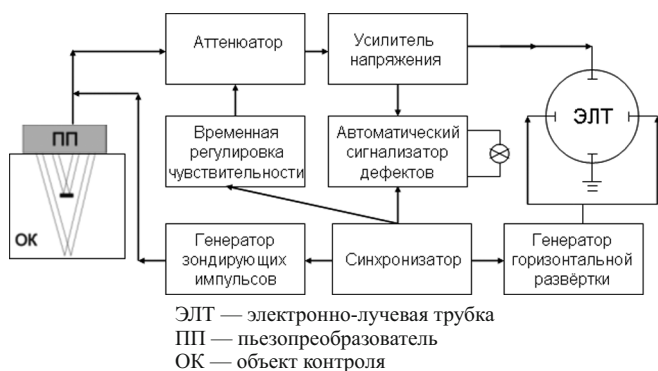


Рис. 1. Блок-схема эхоимпульсного дефектоскопа

ной точности формы и расположения поверхностей при их изготовлении, высокой точности центрирования при сборке — основные слагающие повышения качества машин.

Проблемам неразрушающего контроля качества СсН посвящено значительное число работ. Однако до настоящего времени для прогнозирования эксплуатационного ресурса изделий на основе СсН использовались только методы статистического анализа накопленных данных, а в случае применения ультразвуковых методов говорилось лишь о возможностях качественной оценки состояния соединения [3, 4].

Новый метод исследования СсН с помощью многоакурсного ультразвукового зондирования позволяет получать соединения с «гарантированным» натягом, развивать и автоматизировать средства их неразрушающего контроля качества. Он обеспечивает возможность количественной оценки качества прессовых соединений, учитывает факторы, ранее не принимаемые во внимание.

Для большинства СсН, используемых в машиностроении, отношение длины соединения к диаметру вала рекомендовано в пределах 0,5 – 2,0 [1]. Поэтому исследовали соединения, полученные посадкой стальных цилиндрических колец на сплошной вал термическим способом, следующих габаритных размеров: наружный диаметр охватываемой детали (кольца) $d_2 = 93$ мм; внутренний диаметр охватываемой детали (кольца) $d_1 = 50$ мм; диаметр охватываемой детали (вала) $d_1 = 50 + \Delta$ мм (Δ — натяг); длина соединения $l = 50$ мм; материал кольца и вала — сталь 45. В соответствии с ГОСТ 24643–81 поверхности в СсН выполнены с повышенной точностью путем чистового обтачивания продольной подачей. Характеристики шероховатости сопрягаемых поверхностей в соответствии с ГОСТ 9378–75 и ГОСТ 2789–73, полностью соответствующими международным стандартам, находятся в пределах: R_a — 3,2 – 6,8 мкм, R_z — 12,8 – 25,6 мкм, отклонения по диаметрам вала и отверстия в кольце — 8 – 10 мкм. Объекты контроля: стальная втулка (свободное кольцо) и пять образцов СсН, выполненных методом термической сборки, с натягами Δ 30, 50, 80, 100 и 140 мкм. В эксперименте

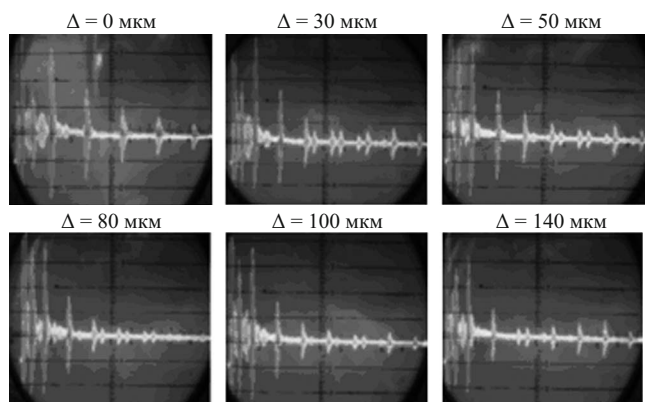


Рис. 2. Осциллограммы отражений ультразвукового сигнала

использовали ультразвуковой дефектоскоп ДУК-66 (рис. 1); излучение и прием обеспечивались на частоте $f = 5$ МГц с помощью пьезопреобразователя П111-5-КН [5].

При проведении экспериментальных исследований учитывали, что осциллограммы отражений ультразвукового (УЗ) сигнала от свободного кольца на границе металл – воздух и от прослойки между двумя сопрягаемыми деталями представляют собой спектр многократных отражений. Реальные осциллограммы, полученные с помощью дефектоскопа ДУК-66, показаны на рис. 2.

На ослабление регистрируемого эхоимпульса влияют следующие факторы: качество посадки соединения (натяг), расхождение ультразвукового луча (диаграмма направленности), затухание, рассеяние и потери энергии на контакте датчик – деталь. Однако с учетом того, что и свободное кольцо, и СсН выполнены из одного материала, уменьшение энергии (амплитуды) отраженного эхоимпульса можно считать зависящим только от величины натяга Δ в соединении (остальные факторы при измерениях одинаковы для всех образцов).

Прохождение УЗ-импульса через напряженно-деформированный слой характеризуется коэффициентами прозрачности соединения

$$D^* = 1 - R^* \quad (1)$$

и отражения

$$R^* = \frac{E_r}{E_e} = \frac{J_r}{J_e}, \quad (2)$$

где E_r , E_e и J_r , J_e — энергии и интенсивности отраженной и падающей волн соответственно.

Поскольку интенсивность волны пропорциональна амплитуде, то в дальнейшем при обсуждении результатов исследования под коэффициентом отражения по энергии R^* будем понимать

$$R_a^* = \frac{U_r}{U_e}, \quad (2')$$

где U_r и U_e — амплитуды отраженной и падающей волн соответственно.

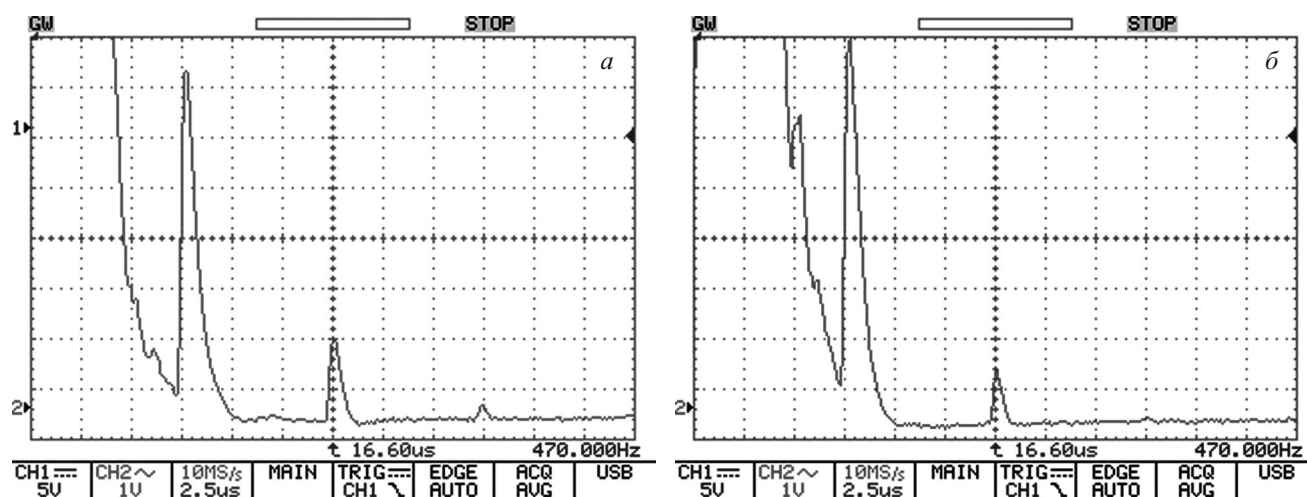


Рис. 3. Осциллограммы, полученные с помощью цифрового осциллографа GDS-840C, эхоимпульсов при различных значениях натяга Δ : *a* — свободное кольцо ($\Delta = 0$); *б* — соединение с натягом ($\Delta = 50$ мкм)

После отражения УЗ-волна распространяется так, как если бы она исходила из той точки граничной поверхности, в которой произошло отражение под углом, равным углу падения. Если отражающая поверхность обладает кривизной, то пучок УЗ-волн после отражения начинает сходить или расходиться аналогично тому, как это имеет место в оптике. В деталях цилиндрической формы формируется расходящаяся сферическая волна с шириной диаграммы направленности $\sim 8 - 10^\circ$, поэтому на отношение U_1/U_0 , а следовательно, на D^* и R^* (как на «свободном» кольце, так и на прессовом соединении) влияет не только расхождение волны, но также и процессы затухания и рассеяния на структуре металла.

Влияние этих факторов на качество посадки оценивали по отношению измеряемых амплитуд падающей U_1 и отраженной U_2 УЗ-волн от исследуемой области на свободном кольце (U_1/U_2) и отношению амплитуд падающей U'_1 и отраженной U'_2 УЗ-волн от соединения с натягом (U'_1/U'_2). Отличие U_1/U_2 от U'_1/U'_2 характеризует качество посадки и может быть выражено количественно.

Измерение значений U_1 , U_2 , U'_1 , U'_2 в децибелах осуществляли с помощью дефектоскопа. Разработанная методика предусматривает: вывод 1-го эхоимпульса U_1 на $1/3 - 1/2$ экрана дефектоскопа при помощи аттенюатора, фиксирование положения аттенюатора в децибелах; вывод амплитуды 2-го эхоимпульса на тот же уровень с помощью аттенюатора и фиксирование его положения в децибелах. Разность зафиксированных положений аттенюатора характеризует U_1/U_2 и, как следствие, отношение

$$\frac{U_1/U_2}{U'_1/U'_2} = R^*. \quad (3)$$

Например, $N_1 = 7$ дБ характеризует отношение U_1/U_2 , а $N_2 = 12$ дБ — отношение U'_1/U'_2 . Тогда $N_2 - N_1 =$

$= 5$ дБ характеризует качество посадки и опосредованно выражает количественную взаимосвязь нормальных напряжений в местах посадки с коэффициентом отражения УЗ-волн в этих местах. На рис. 3 показаны эхограммы, полученные на свободном кольце и от места посадки с натягом.

Зондирующий ультразвуковой импульс вводили через контактную жидкость в наружную боковую поверхность кольца соединения с натягом. На свободном кольце наблюдали серию многократных «переотражений» зондирующего импульса (рис. 3, *a*). В случае СсН, распространяясь в радиальном направлении, УЗ-волна отражалась от места посадки (поверхности сопряжения) и, достигая контактной площадки объекта контроля и пьезопреобразователя, регистрировалась дефектоскопом как 1-й эхоимпульс. Далее, «переотражаясь» от наружной поверхности кольца, 1-й эхоимпульс «уходит» в объект по той же траектории (вслед за зондирующим импульсом), затем вновь отражается от места посадки (поверхности сопряжения), давая 2-й эхоимпульс (см. рис. 3, *б*), и т.д. При толщине кольца $h = (d_2 - d_1)/2 < d_1$, где d_1 — диаметр вала, на экране дефектоскопа будут наблюдаться серии затухающих эхоимпульсов, содержащих не менее трех «переотражений» от места посадки (см. рис. 2).

Рассчитать значения U_1 и U_2 практически невозможно, так как они зависят от многих не поддающихся учету факторов, перечисленных выше. Методика контроля качества СсН заключается в измерении амплитуд двух соседних эхоимпульсов на свободном кольце, далее — на контролируемой посадке и вычислении по формуле (3) коэффициента отражения от места посадки R^* . Заметим, что при слабом натяге ($\Delta \rightarrow 0$) $R \rightarrow 1$, а при слишком большом, когда за счет пластической деформации неровностей воздушный зазор в месте посадки стремится к нулю, $R^* \rightarrow 0$. Иными словами, коэффициент отражения от места посадки R^* меняется в пределах от 0 до 1. Поскольку

Экспериментальные данные


Наименование детали Наименование операции		Прессовая сборка Контроль качества прессового соединения																	
 $N^* = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2};$ $\frac{U_1}{U_2} = 10^{\frac{N^*}{20}}; \quad R^* = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2.$		Контролируемый параметр					Напряг (нагрузочная способность) ПС												
		Метод контроля					Ультразвуковой эхо-импульсный												
		Измерительные средства					ДУК-66 и акустический ПП												
		Изготовитель					Иванникова А.В.												
		Контроль					Иванникова А.В.												
Шаг	Градусная мера шага, 22,50°	Изменяемый параметр																	
		Свободное кольцо		Δ=30мкм			Δ=50мкм			Δ=80мкм			Δ=100мкм			Δ=140мкм			
		N*	U ₁ /U ₂	N*	U ₁ /U ₂	R*	N*	U ₁ /U ₂	R*	N*	U ₁ /U ₂	R*	N*	U ₁ /U ₂	R*	N*	U ₁ /U ₂	R*	
1	0°	7	2,24	9		0,78	9		0,78	10		0,70	11		0,64	14		0,50	
2	22°30'			8			10			10			14			13			
3	45°	6	2,00	9		0,67	10		0,60	11		0,55	14		0,43	13		0,46	
4	67°30'			8			10			9			11			13			
5	90°	6	2,00	8		0,75	10		0,60	10		0,60	13		0,46	14		0,43	
6	112°30'			8			10			11			13			12			
7	135°	6	2,00	8		0,75	10		0,60	10		0,60	13		0,46	12		0,50	
8	157°30'			8			10			9			12			12			
9	180°	7	2,24	8		0,88	10		0,70	10		0,70	12		0,58	9		0,78	
10	202°30'			7			10			10			11			10			
11	225°	6	2,00	7		0,86	9		0,67	10		0,60	13		0,46	12		0,50	
12	247°30'			8			9			8			13			14			
13	270°	6	2,00	8		0,75	8		0,75	10		0,60	12		0,50	16		0,38	
14	292°30'			9			9			11			13			6			
15	315°	6	2,00	9		0,67	10		0,60	10		0,60	12		0,50	7		0,86	
16	337°30'			9			10			9			12			7			
360°																			
Математическое ожидание		6,25	2,06	-	8,19	2,56	0,76	9,63	3,03	0,66	9,88	3,12	0,62	12,44	4,19	0,50	11,50	3,76	0,55
Среднее квадратическое отклонение, σ		0,43			0,63			0,60			0,78			0,93			2,81		
Рассеяние результатов измерений		6,8%			7,7%			6,2%			7,9%			7,5%			25%		

Рис. 4. Контрольный листок данных эхоимпульсных измерений в средних сечениях исследуемых образцов

для учета нелинейности амплитудной характеристики усилителя дефектоскопа обычно используют аттенуатор, то входящие в (3) отношения амплитуд эхоимпульсов могут быть найдены экспериментально. Нам представляется, что такая связь позволяет получить достаточно точную оценку качества соединений УЗ неразрушающим методом как на отдельных локализованных участках посадки, так и осредненную по окружности соединения при многоракурсном исследовании объекта по различным направлениям в заданной плоскости зонирования. Более того, при известной площади посадки экспериментальные данные позволяют вычислить среднюю силу нормального давления, действующую в соединении, а при известном радиусе цилиндрической поверхности посадки — коэффициенте трения и допустимый момент вращения, которым можно нагрузить соединение [5]. Измерение же локальных значений нормального давления посадки позволит оценить возможные отклонения в технологическом процессе и при необходимости его откорректировать.

Для выявления зависимости коэффициента отражения напряженно-деформированного слоя прессовой сборки (R^*) от влияющих факторов (например, размеров, диаграммы направленности пьезоакустического преобразователя, шероховатости, неровности, связности контактирующих поверхностей и др.) измерения проводили с шагом 22,5° по окружности поперечного сечения соединения. Такой шаг позволяет с высокой надежностью попасть в область оптимальных значений измеряемых параметров [7]. В соответствии с разработанной методикой исследования результаты пред-

ставлены в форме контрольного листка, представленного на рис. 4. Из него следует, что приборную погрешность измерения амплитуды затухания отраженных УЗ-сигналов можно оценить на уровне 5 %, тогда как статистическая погрешность, характеризующаяся средним значением (математическим ожиданием) и рассеянием (среднее квадратическое отклонение), может быть как существенно меньше, так и больше приборной в зависимости от величины натяга и случайных факторов, влияющих на результат измерений.

Как показано выше, разность зафиксированных положений аттенуатора характеризует отношение амплитуд переотраженных импульсов на свободном кольце U_1/U_2 и на соединении с натягом U_1/U_2 , а их отношение в соответствии с (3) — зависимость коэффициента отражения R^* от места посадки. В этой связи для большей наглядности целесообразно результаты исследований (см. рис. 4) отобразить в виде круговых диаграмм ослабления переотраженных волн N^* в зависимости от натяга по различным угловым направлениям ввода при изменении угла расположения точки измерения на объекте контроля с интервалом 22,5° (рис. 5).

В связи с тем, что исследовались СсН типа втулка – вал, представление результатов в виде круговых диаграмм делает наглядным не только тот факт, что коэффициент отражения меняется по окружности в сечении детали (в связи с технологическими отклонениями при изготовлении деталей соединения), но и косвенно иллюстрирует наглядность и, следовательно,

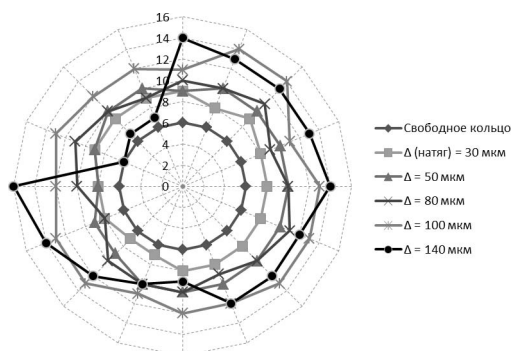


Рис. 5. Круговые диаграммы, характеризующие особенности ослабления сигнала, отраженного от области контакта в месте сопряжения поверхностей вала и втулки в среднем сечении прессового соединения, в зависимости от натяга Δ

но, эффективность применения эхоимпульсного метода для контроля посадок с натягом.

Следует обратить внимание на то, что при натяге 140 мкм диаграмму не удастся аппроксимировать окружностью (см. рис. 5). В соответствии с теорией упругости при усилиях, превышающих порог текучести (в соответствии с расчетами для исследуемых образцов порог текучести должен соответствовать напряжениям, возникающим при натяге 112 мкм), в исследуемом образце неизбежно возникают локальные пластические деформации из-за нарушения межкристаллических связей. Поэтому с высокой степенью вероятности можно предположить, что если образец претерпел локальные пластические деформации, то коэффициент отражения от таких областей в той или иной мере отличается от коэффициента отражения от участков поверхности, где упругонапряженное состояние сохраняется.

Таким образом, метод многокурсного ультразвукового зондирования СсН сочетает в себе безопасность, дешевизну и оперативность с высокой информативностью, достоверностью и точностью получаемых результатов. Помимо этого, он позволяет автоматизировать процесс контроля качества прессовых соединений, исключая влияние на результат человеческого фактора и существенно повышая производительность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берникер Е. Н. Посадки с натягом в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1966. — 188 с.
2. Гречищев И. С., Ильяшенко А. А. Соединения с натягом. Расчет, проектирование, изготовление. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
3. Неразрушающий контроль. Справочник / Под ред. В. В. Клюева в 7 т. (Т. 3). — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
4. Крауткремер Г., Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. — М.: Metallurgiya, 1991. С. 569 – 571.
5. Иваникова А. В., Буденков Г. А., Иваников В. П., Щенятский А. В. Исследование и оценка напряженно-деформированного состояния и нагрузочной способности соединений с натягом акустическим эхометодом / Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. № 2(34). С. 44 – 48.
6. Неразрушающий контроль. Справочник / Под ред. В. В. Сухорукова в 5 кн. (Кн. 2). — М.: Высшая школа, 1991. — 283 с.
7. Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология: Учебное пособие для вузов — М.: Логос, 2000. — 408 с.

REFERENCES

1. Berniker E. N. Posadki s natyagom v mashinostroenii [Interference fits in Machine building]. — Moscow: Mashinostroenie, 1966. — 188 p. [in Russian].
2. Grechischev I. S., Iljashenko A. A. Soedineniya s natyagom. Raschet, proektirovanie, izgotovlenie [Press-fit joints. Calculation, designing, production]. — Moscow: Mashinostroenie, 1981. — 247 p. [in Russian].
3. Nerazrushayushchii kontrol'. Spravochnik [Nondestructive testing. Guide] / V. V. Klyuev (ed.). In 7 vols. (Vol. 3). — Moscow: Mashinostroenie, 2004. — 864 p. [in Russian].
4. Krautkremer G., Krautkremer Y. Ul'trazvukovoi kontrol' materialov. Spravochnik [Ultrasonic control of materials. Guide]. — Moscow: Metallurgiya, 1991. P. 569 – 571 [in Russian].
5. Ivannikova A. V., Budenkov G. A., Ivannikov V. P., Schenjatskiy A. V. Issledovanie i otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i nagruzochnoi sposobnosti soedinenii s natyagom akusticheskim ékhometodom [Press-fit joints strain-stress state and load-carrying capacity study and estimation by acoustic echo-method] / Vestnik Izhevsk. Gos. Tekhn. Univ. 2007. N 2(34). P. 44 – 48 [in Russian].
6. Nerazrushayushchii kontrol'. Spravochnik [Nondestructive testing. Guide] / V. V. Suhorukova (ed.). In 5 books. (Book 2). — Moscow: Vysshaya shkola, 1991. — 283 p. [in Russian].
7. Sergeev A. G., Krokhin V. V. Metrologiya. Uchebnoe posobie dlya vuzov [Metrology. Tutorial for universities]. — Moscow: Logos, 2000. — 408 p. [in Russian].