

УДК 534.21:620.179.16

Оценка пластической деформации стали 10ХСНД с помощью упругих волн*

В.В. Соловьев¹, В.М. Родюшкин², А.В. Иляхинский², А.Н. Сова^{3,4}¹ ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»² Институт проблем машиностроения РАН — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»³ АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», КБ «Салют» им. В.М. Мясищева⁴ МАДИ

Assessment of the 10HSND steel plastic deformation using elastic waves

V.V. Solovyev¹, V.M. Rodyushkin², A.V. Ilyakhinskiy², A.N. Sova^{3,4}¹ Amur State University² Institute of Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences — Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences»³ Khrunichev State Research and Production Space Center, Myasishchev Design Bureau «Salyut»⁴ MADI

Важность контроля в процессе эксплуатации текущего состояния металла 10ХСНД, используемого в конструкциях стартового оборудования и пусковых установок, обусловлена особыми условиями работы транспортно-установочного оборудования ракетных комплексов и их механизмов (высокая трудоемкость, уникальность, высокая надежность, синхронизация). При пластической деформации материала происходят изменения во внутренней структуре и свойствах материала, которые можно обнаружить и проанализировать с помощью акустического зондирования. Такой метод позволяет определить наличие и степень пластических деформаций в элементах конструкции оборудования, а также оценить интенсивность и направление этих деформаций. Предложен акустический индикатор появления предельного состояния, что делает полученные результаты практически значимыми.

EDN: OXNMGP, <https://elibrary/oxnmgp>

Ключевые слова: пластическая деформация, упругая волна, образец стали 10ХСНД, транспортно-установочное оборудование

Special operation conditions of the transport and installation equipment of missile systems and their mechanisms (high labor intensity, uniqueness, high reliability and synchronization) stipulate the importance of monitoring current state of the 10HSND metal used in construction of the launch equipment and systems. The material plastic deformation causes alterations in its internal structure and properties that could be detected and analyzed using the acoustic probing. This method makes it possible to determine the presence and degree of plastic deformations in the equipment components, as well as to assess intensity and direction of these deformations. The paper proposes an acoustic indicator identifying the limit state, which is making the obtained results of practical significance.

EDN: OXNMGP, <https://elibrary/oxnmgp>

Keywords: plastic deformation, elastic wave, 10HSND steel sample, transport and installation equipment

* Работа проведена в рамках государственного задания ИПФ РАН на выполнение фундаментальных научных исследований на 2024–2026 гг. FFUF-2024-0031. № НИОКТР 1023032800130–3–2.3.2.

Ракеты космического назначения транспортируют и устанавливают транспортно-установочными агрегатами (ТУА). Эксплуатация ТУА осуществляется в условиях статических и динамических нагрузок металлоконструкций под воздействием массы ракеты и ветровых нагрузок.

Продолжительная эксплуатация может привести к накоплению пластических деформаций, а следовательно, к аварийным ситуациям, разрушению материалов и оборудования, серьезным травмам и потере жизней. Поэтому важно тщательно контролировать и анализировать состояние материалов и конструкций, чтобы предотвращать достижение предельного состояния и обеспечивать их безопасную эксплуатацию.

Согласно эксплуатационной документации [1], ТУА (рис. 1) осматривают и испытывают в нагруженном состоянии с установленным грузомaketом. Достижение предела текучести определяют по отклонению отвеса после снятия грузомакета. В период времени между инспекционными осмотрами ТАУ состояние элементов не контролируют.

Необходим оперативный мониторинг текущего состояния металла при выполнении технологических операций на ТУА. Исходя из необходимости оперативного мониторинга, желательно получить результат на аппаратуре, доступной и менее затратной, чем сложное и дорогостоящее лабораторное оборудование для точных измерений [2–7]. Это решит практическую проблему мониторинга непосредственно на конструкции в условиях ее эксплуатации.

Цель работы — определение параметров задержки времени распространения ультразвуковой волны для оценки деформации материала и выявление влияния частоты на временные характеристики этой волны.

Для этой цели использовали стандартный дефектоскоп и пьезоэлектрические стандарт-

ные преобразователи, создающие поверхностные волны Рэлея.

Обоснование методики. Степень повреждения металла конструкции агрегата на этапах его эксплуатации можно оценить современными методами физической акустики [3, 8–14]. Акустические волны являются эффективным инструментом такого контроля, так как они способны проникать в глубину объекта исследования.

Кроме того, акустические волны, представляемые как собственные колебания структурно-неоднородного материала, содержат информацию о его физических свойствах, хотя и в зашифрованном виде. Однако эту информацию можно расшифровать при наличии соответствующих знаний и методик.

Акустические методы представляют собой перспективный подход к изучению процессов, происходящих на микроуровне материала. Многие из этих методов основаны на измерении скорости распространения упругой волны (УВ) в материале, его дисперсии и других характеристик. Важным аспектом акустических методов является исследование влияния состояния металла на скорость распространения УВ [3, 10–12].

В длинноволновом приближении частотно-зависимый коэффициент затухания $\alpha(\omega)$ связан с параметром поврежденности материала ψ следующим образом:

$$\alpha(\omega) = (k_1 + k_2\psi)\omega^4, \quad (1)$$

где ω — частота упругой волны; k_1 , k_2 — характеристики материала, определяемые экспериментально на образцах из контролируемого материала

Скорость распространения УВ

$$v_i = v_i^* (1 - k_3\psi - k_4\psi\omega^2), \quad (2)$$

где v_i^* — начальная скорость распространения УВ; k_3 , k_4 — характеристики материала, опре-

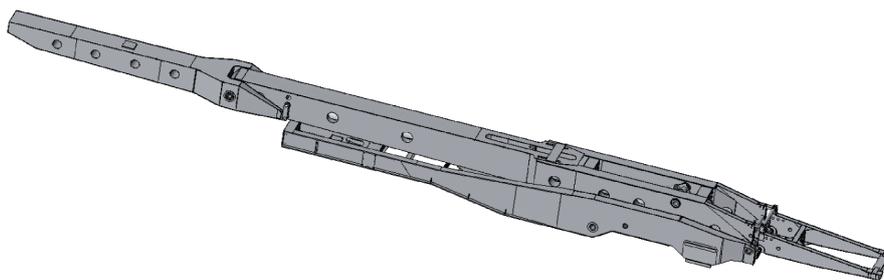


Рис. 1. 3D-модель ТУА

деляемые экспериментально на образцах из контролируемого материала [2, 3, 12].

Из соотношений (1) и (2) следует, что накопление дефектов в материале и изменение его механических характеристик приводят к изменению скорости распространения УВ, зависящей от ее частоты. Эти соотношения являются грубыми приближениями и не полностью описывают реальную ситуацию, но они указывают на возможность использования контроля скорости распространения УВ для оценки поврежденности и деформирования материала.

Состояние металла с использованием объемных волн предложено оценивать, определяя усредненные значения по толщине образца [4, 7, 13]. Однако если он подвергается изгибу, то продольные волокна выше срединной линии поперечного сечения растягиваются, а волокна ниже — сжимаются. Объемные волны могут показать, что напряжения в образце отсутствуют, хотя это не соответствует действительности.

Поэтому для определения напряжений, связанных с изгибом образца, особенно при наличии силовых элементов ТУА (технических устройств автоматики и управления), необходимо использовать такие волны, которые покажут максимальные значения напряжений, а не усредненные значения по сечению. Максимальные изгибные напряжения возникают на поверхности образца, и их можно измерить с помощью поверхностной волны Рэлея [14].

Таким образом, необходимо исследовать закономерности распространения выбранных типов волн в нагружаемых элементах металлоконструкций ТУА.

Экспериментальные исследования. Испытания образцов стали 10ХСНД на растяжение проводили на универсальной испытательной машине Н100КУ фирмы Tinius Olsen Ltd. согласно ГОСТ 1497–84 (Металлы. Методы испытаний на растяжение). Погрешность измерения нагрузки — не более 0,5 %. Деформацию образцов измеряли экстензометром Epsilon 3542 с разрешающей способностью 0,0001 мм и базой 50 мм. Скорость деформации составляла 5 мм/мин [2].

Для акустического зондирования применяли технологию, разработанную с использованием лабораторной прецизионной техники измерений [14, 15], а для генерации упругих волн — пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) П121-5.00-90S, работающий на частоте колеба-

ний 5 МГц. Излучающий и приемный ПЭП размещали на фиксированном расстоянии друг от друга в одном блоке. Для возбуждения излучающего ПЭП применяли дефектоскоп А1214.

Время распространения импульса измеряли посредством осциллографа Tektronix TDS2022 с максимальным разрешением по времени 2 нс. Для измерения задержки в призме ПЭП использовали метод двойного преобразования, накладывая один ПЭП на другой. Эффективную базу вычисляли путем измерения времени распространения импульса на двух расстояниях между ПЭП при одинаковых условиях.

Время распространения УВ в образце стали 10ХСНД составляло 14,1 мкс, задержка в призме — 9 мкс, а фиксированная длина пути УВ — 14,3 мм. Расчетная скорость распространения УВ при прохождении между источником и приемником с учетом влияния переходных слоев и особенностей возбуждения и приема в окрестности контактной поверхности объекта равнялась 2976 м/с.

На основе результатов измерения скорости распространения волны Рэлея в деформированных образцах получены зависимости времени задержки распространения УВ (далее время задержки) в образце стали 10ХСНД (рис. 2).

Анализ результатов измерения времени распространения УВ в образце стали 10ХСНД при пластической деформации подтвердил их качественное совпадение с данными моделирования акустических волн, полученных с использованием численных методов [16].

Исходя из необходимости оперативного мониторинга, желательно получить результат на стандартном дефектоскопе, что позволило бы работать в условиях эксплуатации конструк-

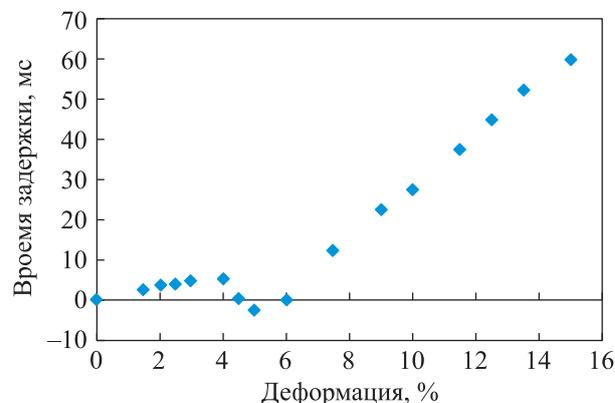


Рис. 2. Зависимость времени задержки распространения УВ в образце стали 10ХСНД от его пластической деформации



Рис. 3. Внешний вид блока излучатель — приемник УВ

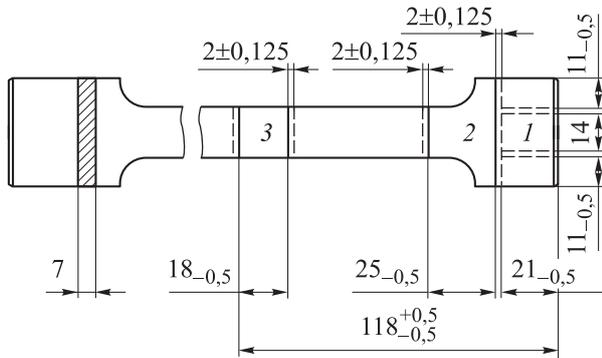


Рис. 4. Схема вырезки образцов

ции. Для решения этой задачи увеличена база зондирования, что повысило эффект задержки. Использован блок с фиксированной базой (130 мм) между излучателем и приемником, приведенный на рис. 3.

Таким образом, время распространения УВ достигало 40...50 мкс. При изменении скорости распространения УВ, вызванном пластической деформацией 1 %, время задержки составляло 0,4...0,5 мкс. Характеристики стандартного дефектоскопа позволили достоверно зафиксировать прогнозируемые изменения.

Металлографические исследования проводили на образцах стали 10ХСНД с пластической

деформацией 9 %. Образцы вырезали методом абразивной резки из головки 1, переходной 2 и рабочей 3 зон (рис. 4).

Результаты исследования. Результаты деформирования стали 10ХСНД при растяжении приведены на рис. 5, где вертикальными штрихами на кривой нагружения обозначены точки контроля скорости распространения (времени задержки) УВ.

Время задержки УВ измеряли с помощью стандартного дефектоскопа на частотах колебаний 2 и 5 МГц. Образцы стали 10ХСНД исследовали до и после пластической деформации. Полученные результаты приведены в табл. 1, где T — время распространения УВ; ΔT — время задержки УВ.

Для наглядности на рис. 6 приведено положение зондирующего импульса на экране дефектоскопа А1214. На осциллограммах, полученных на недеформированном и деформированном образцах, наблюдается уменьшение скорости распространения УВ (увеличение времени задержки) — сдвиг импульса вправо.

Временную информацию, полученную дефектоскопом, можно использовать для определения предельного состояния материала, вызванного пластической деформацией. Протоколирование времени распространения УВ позволяет отслеживать изменения скорости распространения УВ, которые могут быть связаны с изменениями механических свойств материала.

На разных частотах акустических волн влияние пластической деформации на время задержки может быть неодинаковым (см. табли-

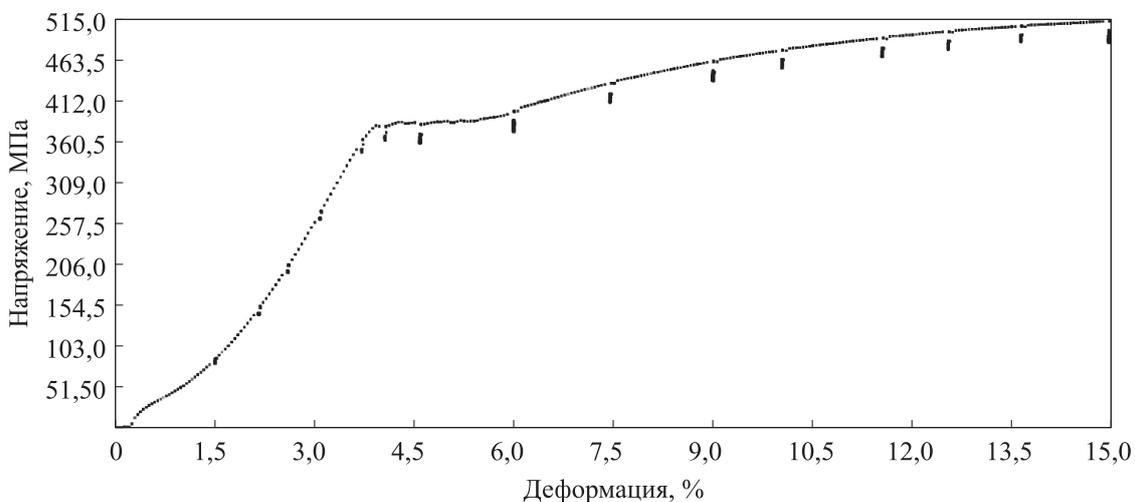


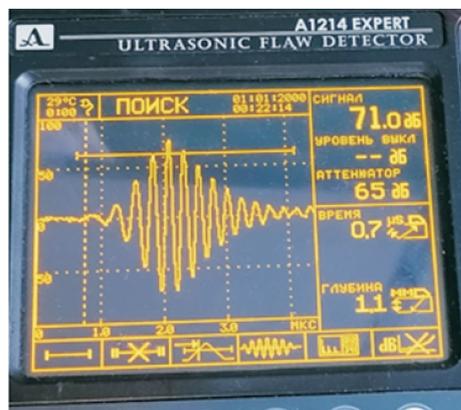
Рис. 5. Диаграмма растяжения стали 10ХСНД

Временные характеристики распространения УВ на различных частотах при зондировании образца 10ХСНД до и после пластической деформации

Частота колебаний дефектоскопа, МГц	T, мкс	ΔT, мкс	Изменение скорости распространения УВ, %
5	51,2	0,6	1,2
2	58,1	0,4	0,7



а



б

Рис. 6. Осциллограммы зондирующего импульса на недеформированном (а) и деформированном (б) образцах

цу), что, вероятно, связано с различиями во взаимодействии с микроструктурой материала.

В процессе металлографического исследования выявлены основные структурные особенности образца. Характерный вид микроструктуры показан на рис. 7. Видно, что материал представлен неоднородной структурой. Наблюдается полосчатая ферритно-перлитная структура с некоторой разнородностью и следами деформации в феррите.

Для оценки пластической деформации и процессов, происходящих в стали при превышении предела текучести, измеряли микротвердость в деформированном образце в зонах 1–3, показанных на рис. 4. Испытания проводили на микротвердомере ПМТ-3М по методике Виккерса при нагрузке 100 г. Время выдержки составляло 10 с.

Согласно полученным результатам, в области головки деформированного образца стали 10ХСНД микротвердость по Виккерсу составляет 176 ± 12 HV, в переходной зоне — 190 ± 11 HV, в рабочей зоне — 217 ± 11 HV.

Вследствие пластической деформации в рабочей зоне (рис. 7, б) микротвердость выше, чем в области головки (рис. 7, а). Внесение пластической деформации в виде повышенной плотности дислокаций может привести к измельчению

размера зерна и закономерному [17, 18] увеличению предела текучести сплава, что коррелирует с показателями твердости материала.

Сравнительный анализ графических зависимостей (см. рис. 2 и 5), микроструктур (рис. 7, а–б) и результатов измерения микротвердости позволяет предположить, что по характеристикам УВ можно оценивать текущее состояние металла во время эксплуатации элементов металлоконструкции до появления явных повреждений.

Выявленную зависимость времени задержки УВ в деформируемом металле от пластической деформации, используемое в элементах конструкций, можно предложить в качестве мониторинга достижения предельного состояния материала вследствие пластической деформации. Это можно осуществлять с использованием стандартных измерительных приборов на реальных конструкциях.

Мониторинг конструкции включает в себя следующие этапы:

- определение исходного состояния — нулевой зоны, где материал изделия подвергался небольшим эксплуатационным нагрузкам;
- измерение (без разборки изделия) акустического параметра «время задержки» — времени распространения УВ ультразвука на фикси-

рованном расстоянии в металле; акустическое сканирование металла ТАУ в зонах, где имели место значительные нагрузки;

- определение зоны металла, где время задержки, превышает установленный уровень в нулевой зоне.

Информация о временных характеристиках деформационных процессов, полученная с помощью дефектоскопа, зарегистрирована и использована для составления экспертного заключения о достижении металлом предельного состояния, вызванного пластическими деформациями. Этот подход позволяет проводить мониторинг состояния материала и оценку его технической пригодности на основе непосредственных данных, полученных в процессе измерений.

Выводы

1. Проведены акустические измерения, анализ диаграммы растяжения, микрошлифов раз-

ных участков образца и микротвердости деформированного образца стали 10ХСНД.

2. Предложенный метод представляет собой инновационный подход к контролю состояния материалов, используемых в ракетно-космической отрасли. Применение волн Рэлея позволяет оперативно выявлять пластические деформации в материалах с целью обеспечения безопасности и надежности ракетно-космических систем. Такой подход также позволяет минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций и улучшить эксплуатационные характеристики конструкции.

3. Применение серийно выпускаемых средств измерений делает этот метод более доступным и эффективным, что способствует его широкому внедрению в практику технического обслуживания ракетно-космических устройств. Благодаря чему можно существенно повысить уровень безопасности и надежности ракетно-космических систем в целом.

Литература

- [1] *Транспортно-установочный агрегат (ТУА)*. Программа и методика автономных испытаний 373УН34 0000.000 ПМ-1. АО «Корпорация «СПУ–ЦКБ ТМ».
- [2] Соловьев В.В., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В. и др. Мониторинг предельного состояния, обусловленного пластическими деформациями в стали 10ХСНД. *Двойные технологии*, 2022, № 2, с. 37–42.
- [3] Митенков Ф.М., ред. *Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации*. Москва, Наука, 2009. 279 с.
- [4] Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. *Ультразвуковой контроль*. Т. 3. *Неразрушающий контроль*. Москва, Машиностроение, 2004. 864 с.
- [5] Prawin J., Rama Mohan Rao A. Vibration-based breathing crack identification using non-linear intermodulation components under noisy environment. *Struct. Health Monit.*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 86–104, doi: <https://doi.org/10.1177/1475921719836953>
- [6] Бритенков А.К., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В. Исследование методом акустического зондирования физико-механических свойств титанового сплава ТИ-6АL-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления. *Физика и механика материалов*, 2021, т. 47, № 1, с. 139–158.
- [7] Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel. *Int. J. Fatigue*, 2018, vol. 106, pp. 153–158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.10.003>
- [8] Yamagishi H., Fukuhara M. Degradation behavior of moduli in extruded pure magnesium during low — to giga-scale cyclic tension fatigue. *Acta Materialia*, 2012, vol. 60, no. 12, pp. 4759–4767, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.05.027>
- [9] Erofeev V.I., Plyahinsky A.V., Nikitina E.A. et al. Study of the defective structure of metal by the method of ultrasonic sounding. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2019, vol. 48, no. 1, pp. 93–97, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618819010060>
- [10] Родюшкин В.М., Иляхинский А.В. О результате измерения времени распространения упругой волны в деформируемом образце стали марки 10ХСНД. *Приволжский научный журнал*, 2023, № 3, с. 22–28.

- [11] Зуев Л.Б., Муравьев В.В., Данилова Ю.С. О признаке усталостного разрушения сталей. *Письма в ЖТФ*, 1999, т. 25, № 9, с. 31–34.
- [12] Шермергор Т.Д. *Теория упругости микронеоднородных сред*. Москва, Наука, 1977. 399 с.
- [13] Курашкин К.В. Оценка напряжений в сварных соединениях с помощью акустического метода. *Контроль. Диагностика*, 2016, № 10, с. 52–56, doi: <https://doi.org/10.14489/td.2016.10.pp.052-056>
- [14] Иляхинский А.В., Родюшкин В.М. Экспериментальные исследования влияния повреждаемости стали на закономерности распространения поверхностных волн. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2018, № 3, с. 36–43, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2018.3.04>
- [15] Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Никитина Е.А. и др. Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций. *Физическая мезомеханика*, 2019, т. 22, № 3, с. 65–70, doi: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2019-13007>
- [16] Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A. et al. Ultrasonic sensing method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic deformation. *Phys. Mesomech.*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 241–245, doi: <https://doi.org/10.1134/S102995992003008X>
- [17] Соловьев В.В., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В. и др. Метод и результаты моделирования акустических волн для оценки напряженно-деформированного состояния при пластическом деформировании. *Двойные технологии*, 2023, № 1, с. 32–40.
- [18] Hall E.O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proc. Phys. Soc. B*, 1951, vol. 64, no. 9, pp. 747–753, doi: <https://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303>

References

- [1] *Transportno-ustanovochnyy agregat (TUA)*. Programma i metodika avtonomnykh ispytaniy 373UN34 0000.000 PM-1 [Transport and installation unit (TUA). Programme and methodology of autonomous tests 373UN34 0000.000 PM-1]. АО «Korporatsiya «SPU–TsKB TM». (In Russ.).
- [2] Solovyev V.V., Rodyushkin V.M., Ilyakhinskiy A.V. et al. Monitoring of the limit state due to plastic deformations in 10XSND steel. *Dvoynye tekhnologii*, 2022, no. 2, pp. 37–42. (In Russ.).
- [3] Mitenkov F.M., ed. *Akusticheskiy kontrol oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatatsii* [Acoustic control of equipment during manufacture and operation]. Moscow, Nauka Publ., 2009. 279 p. (In Russ.).
- [4] Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Ultrazvukovoy kontrol*. Т. 3. *Nerazrushayushchiy control* [Ultrasonic control. Vol. 3. Nondestructive testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p. (In Russ.).
- [5] Prawin J., Rama Mohan Rao A. Vibration-based breathing crack identification using non-linear intermodulation components under noisy environment. *Struct. Health Monit.*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 86–104, doi: <https://doi.org/10.1177/1475921719836953>
- [6] Britenkov A.K., Rodyushkin V.M., Ilyakhinskiy A.V. Acoustic sensing study of the physical and mechanical properties of titanium alloy Ti-6Al-4V, made by selective laser melting. *Fizika i mekhanika materialov* [Materials Physics and Mechanics], 2021, vol. 47, no. 1, pp. 139–158. (In Russ.).
- [7] Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel. *Int. J. Fatigue*, 2018, vol. 106, pp. 153–158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.10.003>
- [8] Yamagishi H., Fukuhara M. Degradation behavior of moduli in extruded pure magnesium during low — to giga-scale cyclic tension fatigue. *Acta Materialia*, 2012, vol. 60, no. 12, pp. 4759–4767, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.05.027>

- [9] Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A. et al. Study of the defective structure of metal by the method of ultrasonic sounding. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2019, vol. 48, no. 1, pp. 93–97, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618819010060>
- [10] Rodyushkin V.M., Ilyakhinskiy A.V. On the result of measuring the propagation time of an elastic wave in a deformable steel sample of grade 10XCND. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], 2023, no. 3, pp. 22–28. (In Russ.).
- [11] Zuev L.B., Muravyev V.V., Danilova Yu.S. Criterion for fatigue failure in steels. *Pisma v ZhTF*, 1999, vol. 25, no. 9, pp. 31–34. (In Russ.). (Eng. version: *Tech. Phys. Lett.*, 1999, vol. 25, no. 5, art. 352, doi: <https://doi.org/10.1134/1.1262478>)
- [12] Shermergor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity of microneogeneous media]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 399 p. (In Russ.).
- [13] Kurashkin K.V. The stress evaluation in the welded joints by the acoustic method. *Kontrol. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2016, no. 10, pp. 52–56, doi: <https://doi.org/10.14489/td.2016.10.pp.052-056> (in Russ.).
- [14] Ilyakhinskiy A.V., Rodyushkin V.M. Experimental studies of the effect of steel damage on the patterns of surface waves propagation. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2018, no. 3, pp. 36–43, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2018.3.04> (in Russ.).
- [15] Erofeev V.I., Ilyakhinskiy A.V., Nikitina E.A. et al. Ultrasonic sensing method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic deformation. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 65–70, doi: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2019-13007> (in Russ.). (Eng. version: *Phys. Mesomech.*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 241–245, doi: <https://doi.org/10.1134/S102995992003008X>)
- [16] Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A. et al. Ultrasonic sensing method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic deformation. *Phys. Mesomech.*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 241–245, doi: <https://doi.org/10.1134/S102995992003008X>
- [17] Solovyev V.V., Rodyushkin V.M., Ilyakhinskiy A.V. et al. Simulation of acoustic waves for evaluation of the stress-strain state under plastic deformation. *Dvoynye tekhnologii*, 2023, no. 1, pp. 32–40. (In Russ.).
- [18] Hall E.O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proc. Phys. Soc. B*, 1951, vol. 64, no. 9, pp. 747–753, doi: <https://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303>

Статья поступила в редакцию 16.01.2024

Информация об авторах

СОЛОВЬЕВ Владислав Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Стартовые и технические ракетные комплексы». ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет» (675027, Благовещенск, Российская Федерация, Игнатьевское шоссе, д. 21, e-mail: soloviev.1975@mail.ru).

РОДЮШКИН Владимир Митрофанович — доктор технических наук, зав. лабораторией. Институт проблем машиностроения РАН — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (603024, Нижний Новгород, Нижегородская область, Российская Федерация, ул. Белинского, д. 85, e-mail: vlkn2005@yandex.ru).

Information about the authors

SOLOVYEV Vladislav Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Launch and Technical Missile Systems. Amur State University (675027, Blagoveshchensk, Russian Federation, Ignatyevskoye Shosse, Bldg. 21, e-mail: soloviev.1975@mail.ru).

RODYUSHKIN Vladimir Mitrofanovich — Doctor of Science (Eng.), Head of Laboratory. Institute of Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences — Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Research Center, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences” (603024, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, Belinskogo St., Bldg. 85, e-mail: vlkn2005@yandex.ru).

ИЛЯХИНСКИЙ Александр Владимирович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Институт проблем машиностроения РАН — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (603024, Нижний Новгород, Нижегородская область, Российская Федерация, ул. Белинского, д. 85, e-mail: ilyahinsky-aleks@bk.ru).

СОВА Александр Николаевич — доктор технических наук. АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», КБ «Салют» им. В.М. Мясищева, заместитель генерального конструктора — начальник направления по технологии эксплуатации; МАДИ, профессор кафедры «Транспортные установки» (125319, Москва, Российская Федерация, Ленинградский пр-т, д. 64, e-mail: slsova@mail.ru).

ILYAKHINSKIY Aleksandr Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. Institute of Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences — Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Research Center, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences” (603024, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, Belinskogo St., Bldg. 85, e-mail: ilyahinsky-aleks@bk.ru).

SOVA Aleksandr Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.). Khrunichev State Research and Production Space Center, Myasishchev Design Bureau «Salyut», Deputy General Designer — Head of Operation Technology; Professor, Department of Transport Systems, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (125319, Moscow, Russian Federation, Leningradskiy Ave., Bldg. 64, e-mail: slsova@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Соловьев В.В., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В., Сова А.Н. Оценка пластической деформации стали 10ХСНД с помощью упругих волн. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 9, с. 91–99.

Please cite this article in English as:

Solovyev V.V., Rodyushkin V.M., Ilyakhinskiy A.V., Sova A.N. Assessment of the 10HSND steel plastic deformation using elastic waves. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 9, pp. 91–99.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
«Проектирование непрерывных
технологических процессов»**

Авторы: В.В. Стулов, А.Г. Колесников

Приведен состав оборудования машины непрерывного литья заготовок и литейно-прокатного агрегата, рассмотрено моделирование затвердевания непрерывнолитой заготовки и моделирование охлаждения кристаллизатора, описаны печи для выплавки стали и для ее обработки, а также основное и вспомогательное оборудование.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» (уровень магистратуры). Может быть использовано при курсовом и дипломном проектировании, а также при выполнении домашних заданий.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>