

УДК 629.4.027.3:629.4.018

Н. В. КОМАРОВСКИЙ, аспирант, А. Г. ОТОКА, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; М. Г. ГЕГЕДЕШ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассмотрены особенности проведения комплексных испытаний цилиндрических пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов железнодорожного подвижного состава. Приведены методы контроля химического состава, микроструктуры, геометрических параметров, твердости и усталостной долговечности пружин. Показано оборудование магнитопорошкового контроля, применяемое для выявления продольных и поперечных трещин. Описаны испытательные стенды, оборудование и нормативные документы, регламентирующие испытания пружин.

Введение. Пружины рессорного подвешивания являются ключевым элементом упругой системы грузовых вагонов, обеспечивающим восприятие и демпфирование динамических нагрузок, возникающих при движении железнодорожного подвижного состава. Указанные конструктивные элементы работают в тяжелых условиях эксплуатации и подвержены многоцикловым знакопеременным нагрузкам как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости, что приводит с течением времени к изменению микроструктуры, деградации упругих свойств и появлению усталостных трещин.

От стабильности характеристик пружин рессорного подвешивания зависят безопасность движения и долговечность эксплуатации вагонов, поэтому проведение комплексных испытаний в соответствии с государственным стандартом [1] включает анализ структуры, химического состава, геометрических параметров, твердости и усталостных свойств, характеризующих долговечность изделий.

В научной литературе имеется много работ, посвященных изучению усталостной долговечности пружин. Так, например, в работе [2] авторы проводят комплексные экспериментальные исследования усталостной прочности пружин боковых скользунов грузовой тележки с оценкой эффективности применения термической и дробеструйной обработки в процессе их изготовления. Авторы статьи [3] привели результаты исследований прочности и долговечности пружин рессорного подвешивания с помощью разработки конечно-элементной модели пружины с последующим проведением расчетов по определению напряженно-деформированного состояния под действием статических и динамических нагрузок, а также тензометрирования опытных образцов пружин. При этом проводились испытания на циклическую долговечность, осуществлялся выбор режима нагружения.

В исследовании [4] описаны пути повышения долговечности винтовых цилиндрических пружин сжатия с круглым сечением витка при динамическом нагружении. Авторами работ [5, 6] разработаны конечно-элементные модели пружин с учетом необходимых граничных условий. Многие работы посвящены проблемам, связанным с расчетами и оценкой горизонтальной жесткости пружин, которые не учитываются

при натуральных испытаниях. Стендовые испытания, как правило, проводятся только под действием вертикальной сжимающей нагрузки [6, 7].

Исследование [8] показало, что максимальные значения нормальных напряжений в горизонтальной плоскости более чем в два раза превышают максимальные значения нормальных напряжений в вертикальной плоскости, а касательные напряжения в пружинах рессорного подвешивания, возникающие от действия крутящих моментов, характеризуются неравномерным распределением по длине, колебания значений достигают $\pm 15\text{--}20\%$, а в двух локальных зонах, прилегающих к опорным виткам, их значение на $5\text{--}10\%$ выше значений напряжений, рассчитанных по стандартной методике.

Одним из основных показателей, регламентирующих качество изготовления пружин при сертификационных испытаниях в соответствии с государственными стандартами, является химический состав используемой для их изготовления стали, контроль которого осуществляется спектральным или рентгено-флуоресцентным методом [9].

На рисунке 1 представлен стенд для определения химического состава исследуемой части пружины с помощью спектрометра ДФС-500, который с высокой точностью определяет содержание основных и легирующих элементов. Известно, что наиболее распространенными марками сталей для пружин являются 60С2ХА и 60С2ХФА, характеризующиеся высокой упругостью и сопротивлением усталости [10].

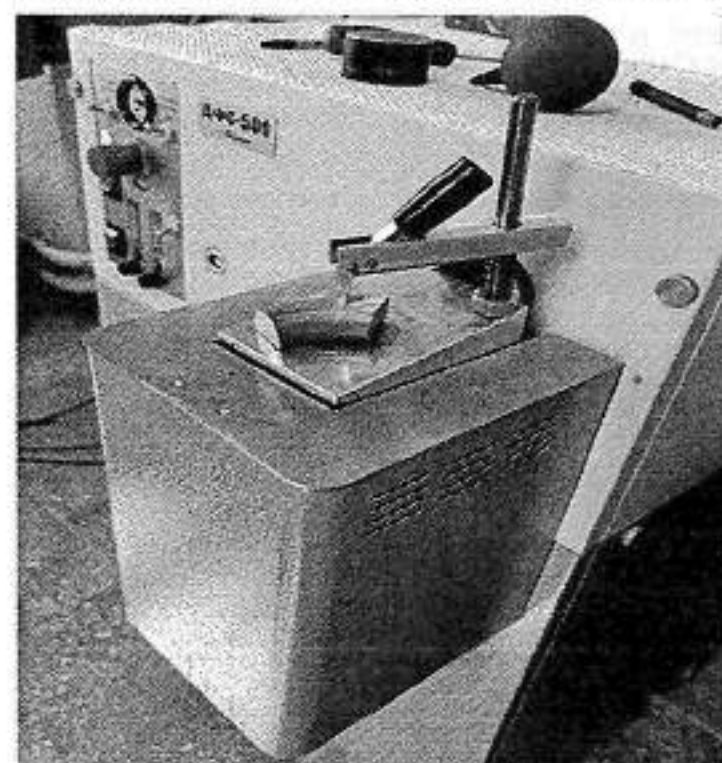


Рисунок 1 – Определение химического состава при помощи спектрометра ДФС-500

Оценка микроструктуры выполняется на поперечных микрошлифах, размеры которых выбираются так, чтобы охватывать всё поперечное сечение витка пружины либо его часть, включающую поверхностный слой и основной металл. При разделении образцов для изготовления микрошлифов температура не должна превышать 150 °С для исключения термических изменений структуры. Изготовление микрошлифов осуществляется в соответствии с технологической документацией предприятий.

Исследование микроструктуры основного металла проводят с использованием металлографического микроскопа при увеличении 500^x. Анализ поверхностной зоны выполняется при увеличении 100^x на микрошлифах, предварительно протравленных 4%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте (4 см³ HNO₃ на 100 см³ спирта), либо раствором пикриновой кислоты (4 г пикриновой кислоты на 100 см³ спирта), либо смесью этих реагентов в соотношении 1:4. Оценку микроструктуры готовых пружин проводят путем сопоставления микроструктуры с эталонами шкал 1 и 2 (приложения А и Б) по государственному стандарту [11].

На рисунке 2 показан пример полученных результатов микроструктуры пружин рессорного подвешивания при увеличении 100^x и 500^x с использованием тринокулярного микроскопа BS-6030. Анализ микроструктуры позволяет выявить равномерность отпуска, наличие остаточных аустенитных включений и обез-

углероженных слоев, влияющих на усталостную прочность.

Контроль геометрических параметров проводится после проверки остаточной деформации пружины. Испытания выполнялись на испытательной машине TIME WDW-300 E, обеспечивающей возможность приложения пробной нагрузки с высокой точностью и регистрации перемещения подвижной траверсы (рисунок 3, а).

Согласно требованиям государственного стандарта [1], контроль остаточной деформации выполняется методом сжатия пружины пробной нагрузкой. Перед измерением пружина предварительно трижды сжимается, после чего фиксируется её высота в свободном состоянии в определённой точке вертикального сечения, проходящего через середину дуги опорной поверхности. Затем пружину вновь нагружают пробной нагрузкой, полностью разгружают и повторно измеряют высоту в той же точке. Остаточная деформация определяется как разность между первоначальной и повторно измеренной высотой пружины в свободном состоянии.

Измерение высоты пружины в свободном состоянии проводилось на плите поверочной и разметочной, тип № 1-2-1000×630, при помощи штангенрейсмаса ценой деления 0,05 мм, тип ШР-0-1000-0,05, обеспечивающего высокую точность фиксации размеров. На рисунке 3, б показано расположение пружины на плите и порядок выполнения измерений.

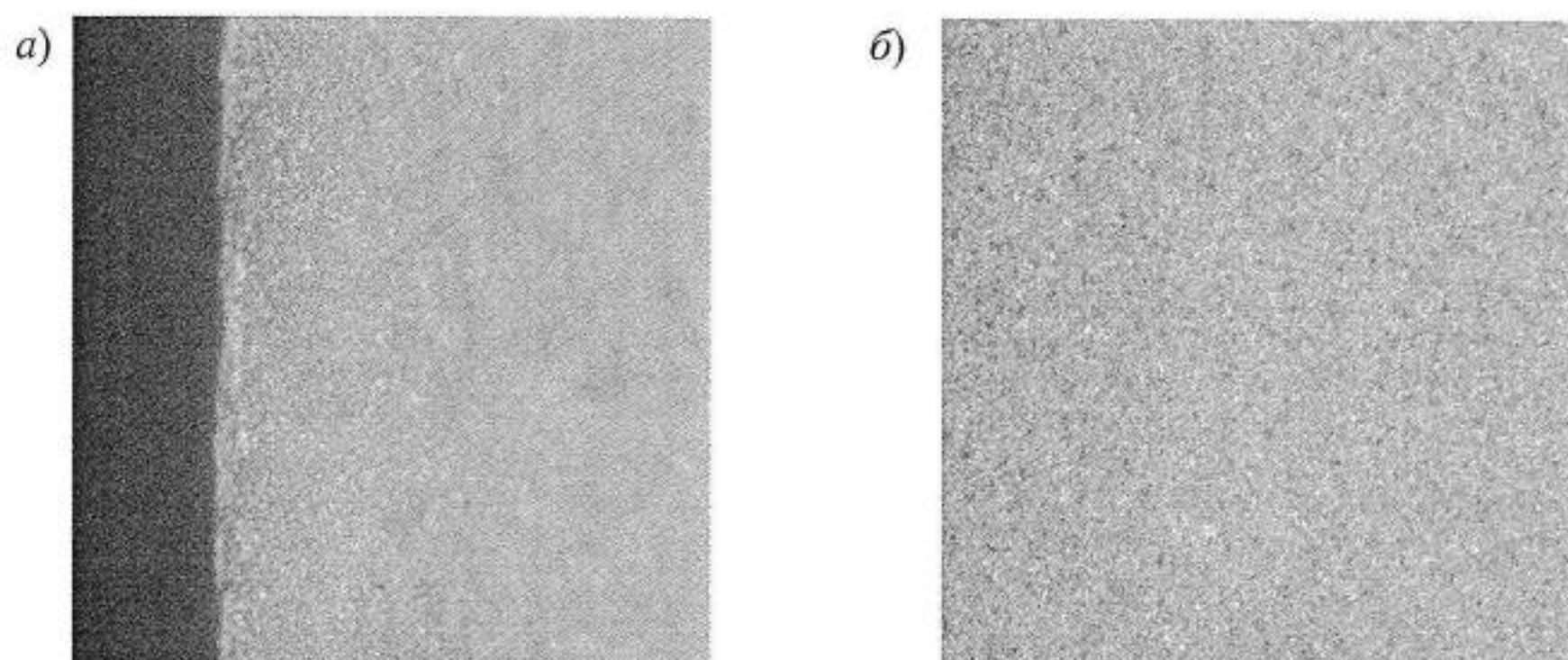


Рисунок 2 – Определение микроструктуры поверхностной зоны при увеличении 100^x (а) основного металла и при увеличении 500^x (б) с использованием тринокулярного микроскопа BS-6030

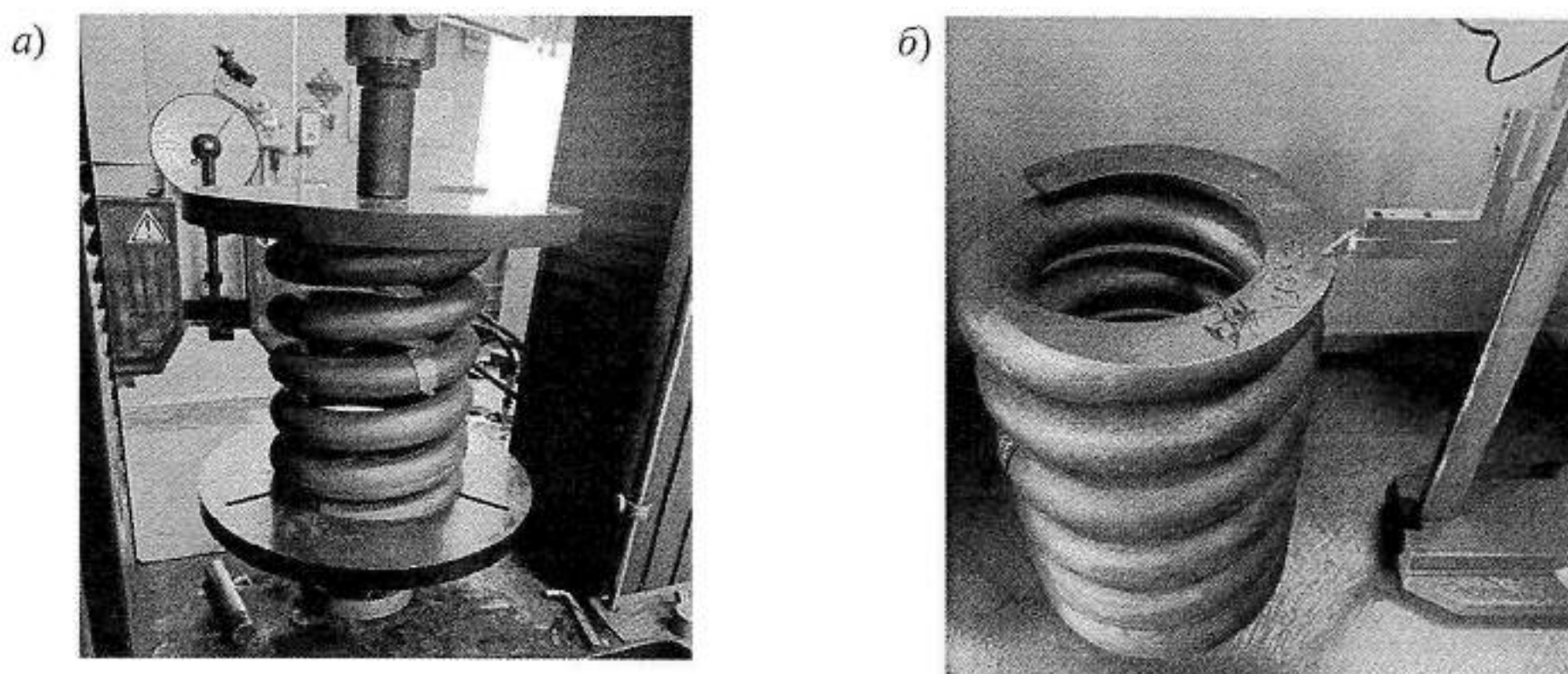


Рисунок 3 – Испытание пружины на испытательной машине TIME WDW-300 E при проверке остаточной деформации (а) и измерение высоты пружины на плите поверочной и разметочной, тип № 1-2-1000×630, при помощи штангенрейсмаса ценой деления 0,05 мм, тип ШР-0-1000-0,05 (б)

Контроль высоты пружины l_1 , мм, под расчетной статической нагрузкой проводят методом сжатия ее расчетной нагрузкой F_1 , кН, (значения l_1 и F_1 принимают в соответствии с техническими требованиями чертежа пружины). Измерение выполняют на испытательной машине TIME WDW-300 E, обеспечивающей плавное приложение нагрузки и фиксацию перемещений подвижной траверсы. За измеренную высоту пружины под расчетной статической нагрузкой $l_{изм}$, мм, принимают расстояние между опорными плоскостями устройства, сжимающего пружину.

Отклонение высоты пружины Δl_1 , мм, под расчетной статической нагрузкой

$$\Delta l_1 = |l_1 - l_{изм}|. \quad (1)$$

Предельные отклонения высоты пружины Δl_1 , мм, под расчетной статической нагрузкой не должны превышать:

- для пружин категории А – $\pm 0,015l_1$;
- для пружин категории Б – $\pm 0,02l_1$.

На рисунке 4 представлена схема измерения высоты пружины под расчетной статической нагрузкой на испытательной машине TIME WDW-300 E. Контроль допуска перпендикулярности оси пружины в свободном состоянии относительно опорных поверхностей проводят в соответствии с требованиями государственного стандарта.

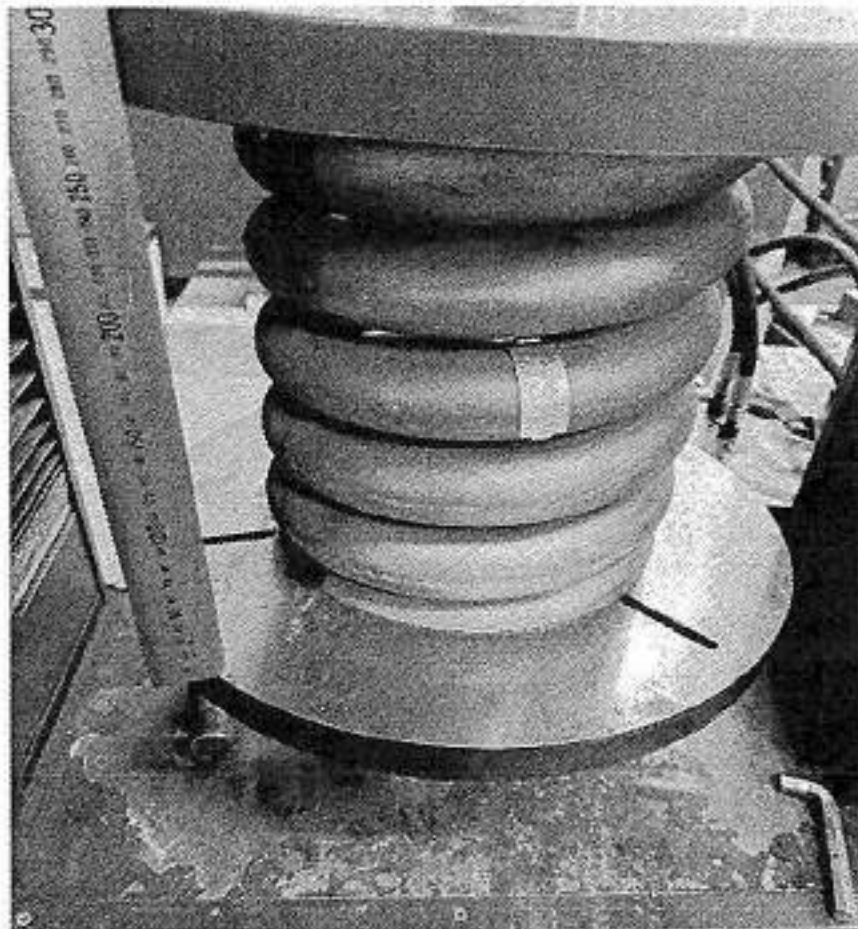


Рисунок 4 – Испытание пружины на испытательной машине TIME WDW-300 E при проверке высоты пружины под расчетной статической нагрузкой

Отклонение от перпендикулярности оси пружины относительно опорных поверхностей $e_{ср}$, мм, определяют для каждой из опорных поверхностей в плоскости наибольшего отклонения образующих пружины. Измерения выполняют с применением угольника поверочного УШ-2-400, обеспечивающего фиксацию смещения верхней и нижней опорных поверхностей относительно вертикальной оси пружины.

Процесс измерения выполняют согласно схеме на рисунке 5, где показано определение величин отклонения от перпендикулярности образующей пружины относительно нижней опорной поверхности на высоте верхнего рабочего витка e и отклонения от перпендикулярности противоположной образующей пружины относительно нижней опорной поверхности на высоте

нижнего рабочего витка e' для двух сторон пружины. Среднее значение отклонения от перпендикулярности

$$e_{ср} = (e + e')/2. \quad (2)$$

Допуск перпендикулярности оси пружины в свободном состоянии относительно опорных поверхностей должен быть $0,02l_0$, где l_0 – высота пружины в свободном состоянии.

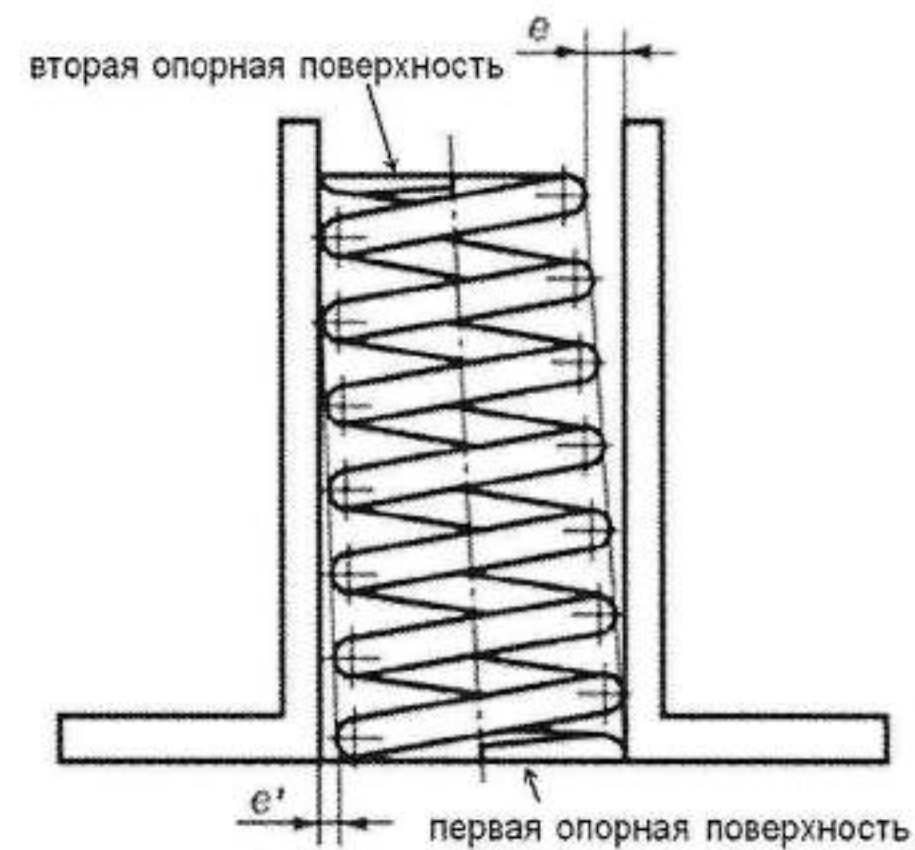


Рисунок 5 – Схема измерения отклонения от перпендикулярности оси пружины относительно опорной поверхности

На рисунке 6 показан реальный процесс проведения измерений допуска перпендикулярности оси пружины. Испытания выполнялись на плите поверочной и разметочной, тип № 1-2-1000×630, с применением угольника поверочного УШ-2-400 и набора щупов № 4; обеспечена вертикальная ориентация и визуальный контроль совпадения оси пружины с нормалью к опорной плоскости.

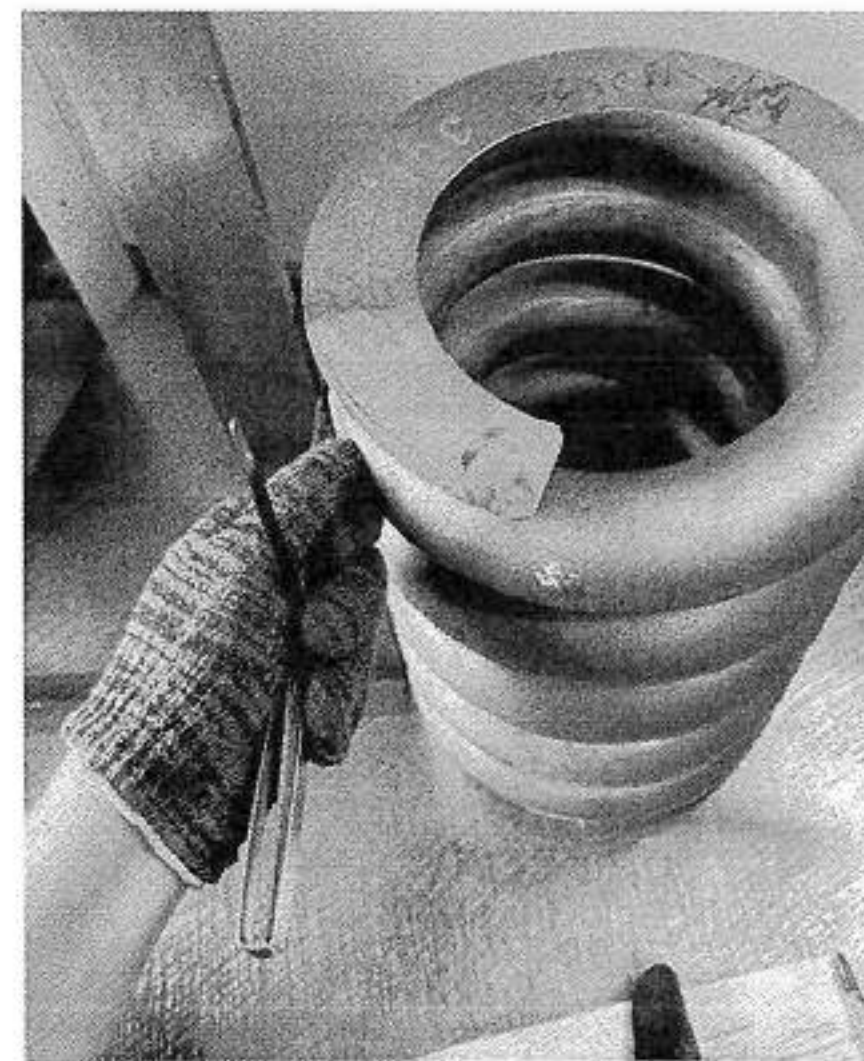


Рисунок 6 – Проведение измерений допуска перпендикулярности оси пружины на поверочной плите поверочной и разметочной, тип № 1-2-1000×630

Испытания на твердость проводились в соответствии с требованиями государственного стандарта [12]. Целью испытаний является определение соответствия свойств материала пружины заданным значениям и контроль равномерности твердости по сечению изделия.

Измерение твердости пружины проводят на защищенной до глубины гарантированного удаления обезуглероженного слоя боковой поверхности опорного витка и обеспечения плотного прилегания индентора. Измерения выполнялись на твердомере стационарном (HBRVU-187.5) Integral-5, обеспечивающем контроль параметров нагружения и автоматическую фиксацию показаний твердости. Нагрузка прикладывалась плавно, согласно методике государственного стандарта, с выдержкой под нагрузкой не менее 10 с.

На рисунке 7 показан реальный процесс проведения испытаний на твердость на твердомере стационарном (HBRVU-187.5) Integral-5, фиксирующем расположение образца, рабочую нагрузку и взаимодействие индентора с поверхностью металла.

Испытания на циклическую долговечность проводились с целью определения работоспособности пружин при длительном переменном нагружении, моделирующем реальные условия эксплуатации в рессорном подвешивании железнодорожных вагонов.



Рисунок 7 – Проведение испытаний на твердость пружины с использованием твердомера стационарного (HBRVU-187.5) Integral-5

Испытания выполнялись на стенде для испытаний листовых рессор и пружин СП-2 (рисунок 8), обеспечивающем приложение к пружине осевой переменной нагрузки по гармоническому закону с постоянными параметрами. Процесс нагружения осуществлялся в упругой области деформаций при одноступенчатом нагружении продольной силой, величина которой соответствовала расчетной статической нагрузке.

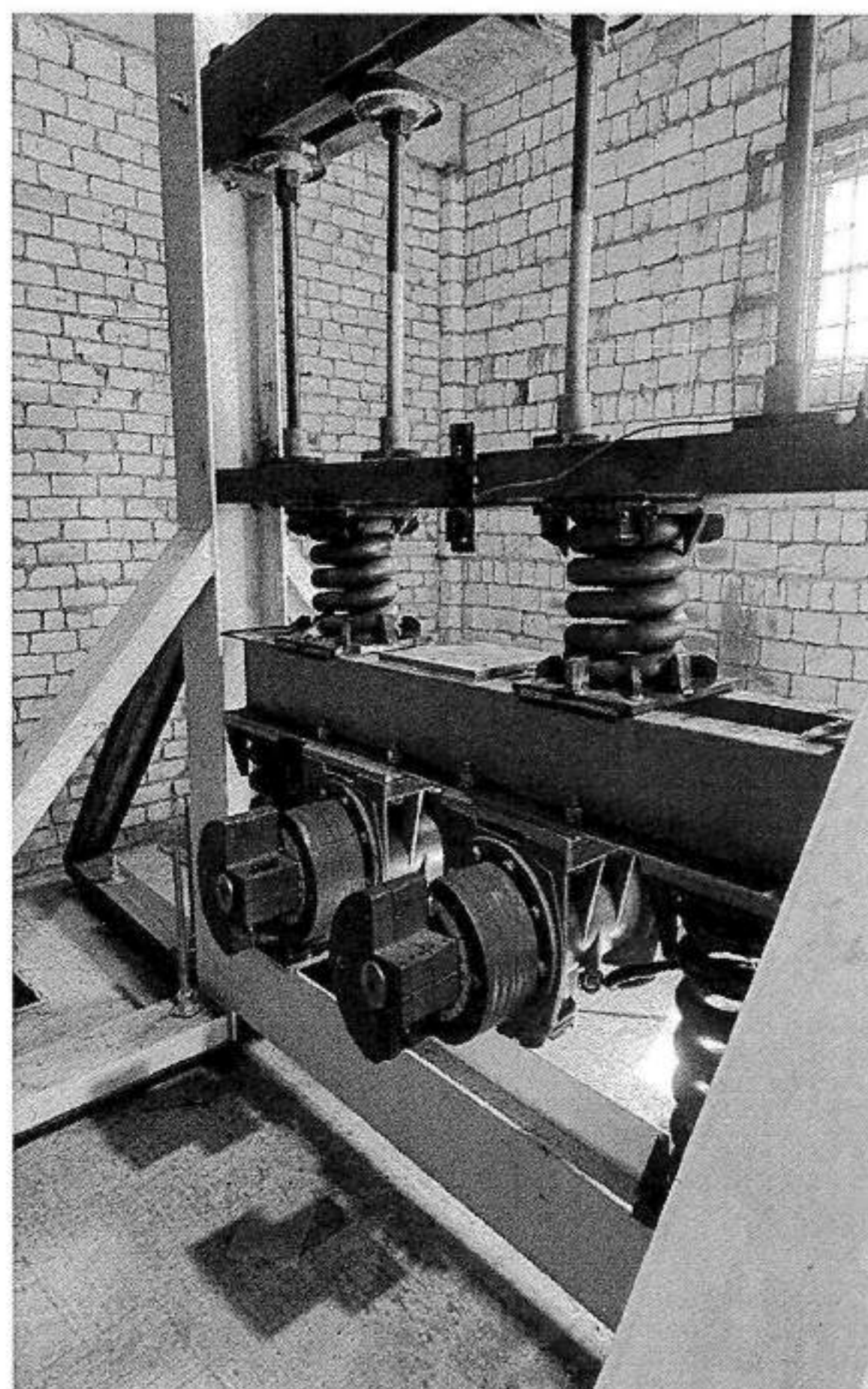


Рисунок 8 – Проведение испытаний на циклическую долговечность с использованием стенда для испытаний листовых рессор и пружин СП-2

Перед началом испытаний каждая пружина проходила контроль геометрических параметров и высоты в свободном состоянии. Циклическое нагружение осуществлялось при комнатной температуре с заданной частотой колебаний, обеспечивающей плавное изменение усилия от минимального до максимального значения в пределах упругих деформаций. Контроль параметров проводился автоматически с регистрацией числа циклов, амплитуды перемещения и усилий.

Испытания продолжались до достижения $0,5 \times 10^6$ циклов нагружения-разгрузки, после чего выполнялся повторный контроль упругих характеристик и визуальный осмотр поверхности витков. В ходе испытаний разрушений, появления трещин и остаточной деформации сверх нормы не зафиксировано, что свидетельствует о стабильности механических свойств и правильности выбранного режима термообработки.

Пружины также подвергаются неразрушающему контролю при наличии трещин. Одним из самых чувствительных методов, при котором трещины выявляются с минимальным раскрытием по ширине и глубине, является магнитопорошковый. Выявлять трещины в таком сложном по конфигурации объекте традиционными переносными дефектоскопами достаточно сложно. Поэтому производители средств неразрушающего контроля разрабатывают стационарные стенды под различные габаритные размеры пружин.

Для выявления разноориентированных трещин применяют комбинированное намагничивание путем циркулярного намагничивания пропускания тока через пружину за счет контактных пластин, а также медного стержня внутри пружины (он изолирован от контактных пластин) и продольного намагничивания с помощью соленоида (рисунок 9).

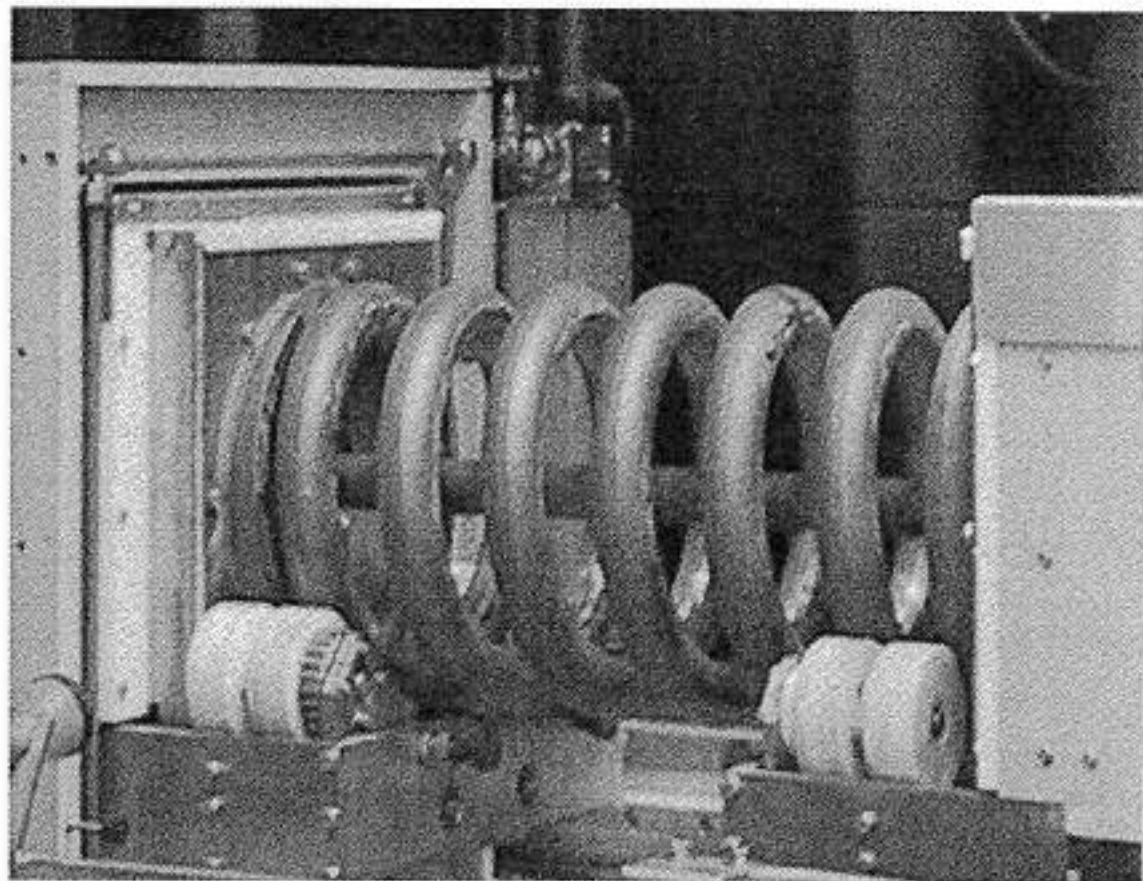


Рисунок 9 – Проведение магнитопорошкового контроля пружины с помощью дефектоскопа CRAFTTEST SPRING

Заключение. Следует отметить, что проведение комплексных испытаний пружин рессорного подвешивания имеет ключевое значение для обеспечения надёжности и безопасности железнодорожного подвижного состава. На основе результатов контроля химического состава, микроструктуры, геометрических параметров, твердости и усталостной долговечности, а также качества поверхности после визуального осмотра и проведения неразрушающего контроля формируется объективная оценка качества пружин и прогнозируется их эксплуатационное поведение в условиях реальных нагрузок. Сопоставление полученных данных с требованиями государственных стандартов позволяет своевременно выявлять отклонения, повышать уровень технологической дисциплины производства и гарантировать стабильность характеристик изделий, от которых напрямую зависит безопасность движения поездов и долговечность вагонных тележек. Результаты таких испытаний на сегодняшний день остаются наиболее востребованными и правдивыми. При этом полученные результаты на практике могут быть использованы и адаптированы для последующих расчетов конечно-элементных моделей в различных компьютерных средах.

Получено 24.11.2025

N. V. Komarovskiy, A. G. Otoka, M. G. Gegedesh. Features of comprehensive tests of cylindrical springs of spring suspension of railway rolling stock freight cars bogies.

The specifics of conducting comprehensive testing of coil springs used in spring suspension systems for freight cars is investigated. Methods for monitoring the springs' chemical composition, microstructure, hardness, geometric parameters, rigidity, and fatigue life are presented. There is demonstrated the magnetic particle inspection equipment used to detect longitudinal and transverse cracks. Test rigs, equipment, and regulatory documents governing spring testing are described.

Список литературы

- 1 ГОСТ 1452-2011 Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия. – Введ. 01.01.2012. – М. : Стандартинформ, 2016. – 15 с.
- 2 Даниленко, Д. В. Исследование усталостной долговечности пружин боковых скользунов тележки модели 18-9891/ Д. В. Даниленко, В. П. Ефимов, В. А. Чернов // Известия ПГУПС. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 519–530.
- 3 Исследования усталостной прочности пружин рессорного подвешивания скоростных грузовых вагонов / С. В. Чунин, Э. С. Оганьян, Г. И. Гаджиметов [и др.] // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 42–49.
- 4 Девятериков, С. А. Пути повышения долговечности винтовых цилиндрических пружин сжатия с круглым сечением витка при динамическом нагружении / С. А. Девятериков // Актуальные вопросы науки и техники : сб. науч. трудов. – 2017. – Вып. IV. – С. 8–10.
- 5 Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов / А. М. Орлова, С. А. Рудакова, Д. В. Шевченко [и др.] // Известия ПГУПС. – 2020. – Т. 17, вып. 2. – С. 221–232. – DOI: 10.20295/1815-588-2020-2-221-232.
- 6 Investigation for Failure Response of Suspension Spring of Railway Vehicle: A Categorical Literature Review / M. A. Kumbhalkar, D. V. Bhoje, P. P. Chaoj. A. V. Vanalkaret // J Fail. Anal. and Preven. – 2020. – Vol. 20. – P. 1130–1142. – DOI: 10.1007/s11668-020-00918-6.
- 7 Николаев, В. А. Оценка влияния параметров рессорного подвешивания грузового вагона на показатели его динамических качеств и безопасность движения / В. А. Николаев // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 17–27.
- 8 Ablyalimov, O. On the Question of Calculation Methodology of Springs of Spring Suspension of Rolling Stock for Strength / O. Ablyalimov, M. Z. Saghir // ICTEA: International Conference on Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 1. – P. 2190–2198.
- 9 ГОСТ 22536.0-87 Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы анализа. – Введ. 01.09.1988. – М. : Государственный комитет СССР по стандартизации, 1987. – 6 с.
- 10 ГОСТ 14959-2016 Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. – Введ. 01.01.2018. – М. : Стандартинформ, 2017. – 28 с.
- 11 ГОСТ 32205-2013. Пружины рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Шкала эталонов микроструктур. – Введ. 01.06.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 14 с.
- 12 ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86) Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Введ. 01.01.1969. – М. : Издво стандартов, 2001. – 8 с.