



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-46-58

УДК 621.01

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

Е.А. Рожкова<sup>1,2</sup>, С.В. Четвериков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

<sup>2</sup> Забайкальский институт железнодорожного транспорта  
Российская Федерация, 672040, Чита, ул. Магистральная, 11

В машиностроении наиболее часто применяются следующие профильные соединения: с тремя гранями (РК-3); с тремя срезанными (РК<sub>с</sub>-3); с четырьмя срезанными (К<sub>с</sub>-4) и с пятью гранями (РК-5 и РК<sub>с</sub>-5). Несмотря на значительные результаты, в области изучения напряжений и деформаций при контактном взаимодействии твердых тел разнообразных форм остаются нерешенным ряд задач представляющих научную и практическую ценность. Как показал анализ теоретических и экспериментальных исследований неподвижных разъемных и неразъемных соединений (цилиндрических, профильных) остаются нерешенными задачи, в частности по выбору геометрической формы контурных кривых, величины натяга профильных неподвижных, неразборных соединений с равноосным контуром. Работоспособность и надежность РК-профильных соединений с натягом определяется их прочностью, т.е. способностью элементов сопротивляться их относительному смещению в процессе эксплуатации. В целях определения работоспособности РК-профильного соединения с натягом по критерию прочности необходимо вычислять напряжения и деформации, возникающие во втулке с РК-профильным отверстием от действия РК-профильного вала, установленного в ступицу с натягом. В статье рассмотрена методика проведения экспериментальных исследований методом тензометрии для оценки влияния конструктивных параметров и внешних нагрузок на напряженно — деформированное состояние деталей соединения. По результатам исследований были составлены таблицы сравнительных характеристик рекомендуемых типов посадок с натягом для РК-3 профильных соединений, а также рекомендуемых посадок с натягом при соответствующих значениях  $n$  РК-3 профильных соединений вал-ступица применительно к зубчатым передачам.

**Ключевые слова:** РК-профильный вал, РК-профильное отверстие, натяг, конструктивные параметры

Неподвижные соединения с натягом широко применяются в изделиях машиностроения. Это обусловлено их большей по сравнению со шпоночными, сварными, клеевыми и тому подобными соединениями технологичностью, меньшей трудоемкостью изготовления, сравнительно низкой себестоимостью. Кроме того, соединения с натягом обеспечивают хорошее центрирование сопрягаемых деталей и могут воспринимать значительные статические и динамические нагрузки [1; 4].

К недостаткам цилиндрических соединений с натягом можно отнести: высокую трудоемкость сборки при больших натягах, возможность повреждения посадочных поверхностей при этом; высокую концентрацию напряжений на сопрягаемых поверхностях элементов соединения; склонность к контактной коррозии и, как следствие, пониженную прочность соединения при переменных нагрузках; отсутствие жесткой фиксации деталей относительно друг друга [1; 4]. Также недостатком цилиндрических соединений с натягом является невозможность допущения даже однократной их перегрузки. Перегрузка может вызвать смещение соединяемых деталей и окончательное разрушение посадки.

Достоинства РК -3 профильных соединений с гарантированным натягом в сравнении с цилиндрическими соединениями, заключается в том, что профильные соединения, как правило, способны воспринимать большие эксплуатационные нагрузки, чем цилиндрические сопряжения, за счет геометрического замыкания профильных кривых [1; 4]. Также РК-профильные соединения обеспечивают снижение материалоемкости изделий. К недостаткам профильных соединений можно отнести наличие распорных усилий.

Работоспособность и надежность РК-3 профильных соединений с натягом определяется их прочностью, т.е. способностью элементов сопротивляться их относительному смещению в процессе эксплуатации.

В целях определения работоспособности РК-профильного соединения с натягом по критерию прочности необходимо определить напряжения и деформации, возникающие во втулке с РК-профильным отверстием от действия РК-профильного вала установленного в ступицу с натягом [3; 4].

Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния узлов машин применяются методы и средства, в которых использованы различные принципы измерения.

Поляризационно-оптический метод исследования напряжений (метод фотоупругости) — экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций на прозрачных моделях из оптически чувствительных материалов. Поляризационно-оптические методы, позволяют исследовать не только напряженное состояние взаимодействующих тел по всему объему и определить составляющие тензора напряжений, но и визуально проследить, как изменяется положение взаимодействующих тел относительно друг друга при реализации различных схем нагружения.

Поляризационно-оптический метод исследования напряжений РК-профильного соединения вала и ступицы с зазором применялся в работах [2; 8]. В данной работе в качестве материала моделей применялся оптически-активный компаунд на основе эпоксидной смолы отвержденной малеиновым ангидридом МГТФА. Каждая модель сопряжения представляла собой ступицу и вал с равноосным контуром собранные с зазором. Оценка общей картины напряженного состояния модели РК-профильного соединения и фотографирование картин полос проводилось на большой поляризационной установке БПУ-ИМАШ-КБ2. Различные схемы нагружения моделей испытывали на специальном нагрузочном приспособлении.

Исследование напряженного состояния моделей РК-профильного соединения сопровождалось фотографической регистрацией картин полос в монохроматическом свете с последующей зарисовкой на миллиметровой бумаге. В процессе эксперимента были исследованы следующие схемы нагружения: передача крутящего момента и радиальной силы; передача крутящего момента; передача радиальной силы. Численное значение величин контактных углов и их относительное положение определялось непосредственным измерением на миллиметровой бумаге, по выходу на границу раздела втулки и вала интерференционной полосы нулевого порядка.

Порядок полосы определяли подсчетом числа полос для каждой контактной зоны в сопряжении из общей картины напряженного состояния, которую фиксировали на фотографии или на экране БПУ. Цену полосы материала определяли экспериментально на координатно-синхронном поляриметре КСП-7. В результате были получены графические зависимости углов контакта от нагрузки, численные значения максимальных касательных и нормальных напряжений, картин полос интерференции для трех моделей РК-профильного соединения, изготовленных с разными радиальными зазорами, которые могут характеризовать напряженное состояние РК-профильного соединения деталей машин при передаче внешних нагрузок.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что поляризационно-оптический метод исследования напряжений актуален для исследования напряженного состояния РК-профильного соединения вала и ступицы собранного по посадкам с зазором. Использование поляризационно-оптического метода для исследования напряженного состояния РК-профильного соединения вала и ступицы собранного по посадкам с натягом представляется не возможным, так как нельзя создать соединение с натягом из отвержденной эпоксидной смолы. В виду того, что отвержденная эпоксидная смола не обладает достаточной прочностью и упругостью и при создании посадок с различными натягами произойдет разрушение моделей. Для использования данного метода исследования напряжений необходимо наличие специального технологического оборудования, непосредственно поляризационной установки [2].

Поэтому наиболее целесообразно для исследования напряженного состояния РК-профильного соединения вала и ступицы собранного по посадкам с натягом использовать метод тензометрии. При данном методе создание экспериментальных моделей не требует использования специальных материалов, и создание посадки с натягом наиболее возможно.

Большое распространение для исследования напряжений и деформаций получила тензометрия, основанная на применении тензорезисторных преобразователей (тензорезистор, тензодатчик) [5; 8].

Для исследования напряженного состояния РК-профильного соединения вала и ступицы с числом граней равным трем, собранного по посадкам с натягом использовались тензодатчики фирмы НВМ тип 1-LY11-6/350.

Точность и надежность работы тензодатчиков зависят от качества закрепления датчика и его выводов на измеряемом объекте или промежуточном преобразова-

тельном элементе. Так как база чувствительного элемента мала, требуется осторожность при работе с тензодатчиками.

Поэтому сначала производилась механическая тщательная подготовка и очистка рабочей поверхности для тензодатчика, причем подготавливаемая площадь в 1,5–2 раза превышает площадь занимаемую датчиком, далее размечалась рабочая поверхность для правильной ориентации тензодатчика, обезжиривалась рабочая поверхность, и выполнялась аппликация тензодатчиков с использованием цианакрилатного клея Z70 холодного отвердевания. Минимальная продолжительность отвердевания, по истечении которого можно начинать измерения, составляет 15 мин для статических измерений при температуре склеивания 20 °С и относительной влажности воздуха от 30 до 80%.

Прежде чем приступить к измерениям тех или иных параметров непосредственно в деталях, необходимо было произвести тарировку датчиков в целях определения надежности показаний, а также для определения текущего масштаба, зависящего от настройки усилительной аппаратуры. Тарировка датчиков производилась на балке равного сопротивления изгибу в лаборатории сопротивления материалов ЗаБИЖТ следующим образом. Из партии датчиков с одинаковым номинальным сопротивлением отбирались 5% и каждый из них наклеивался на балку. Методика тарировки заключается в определении ожидаемого среднего разброса показаний датчиков, измеряемого в процентах. После снятия показаний получилось, что эта величина лежит в пределах 1%, и вся партия датчиков может считаться годной для измерений.

Для проведения экспериментальных исследований использовался цифровой измеритель деформации тензометрический ИДТЦ-01, позволяющий измерять деформации тензорезисторов сопротивлением от 100 до 400 Ом при статическом нагружении конструкций, имеющий 11 измерительных каналов, диапазон измерений мкОм/Ом —  $\pm 5999$ . Электрическая схема соединений тензорезисторов на объекте измерений — полумост, напряжение питания полумоста  $9 \pm 2$  В. Стабильность показаний при неоднократных измерениях деформации, единиц индикации — не более 5.

Прежде чем производить измерения с использованием измерителя деформаций необходимо знать значение коэффициента цены деления, которое определялось также с помощью специальной тарировочной балки равного сопротивления консольного типа.

Относительные продольные деформации в любой точке на поверхности балки будут равны между собой и постоянны [7]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Fl}{Eb_0h^2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — относительная продольная деформация;  $E$  — модуль упругости при растяжении,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

Учитывая, что деформации  $\varepsilon$  постоянны, можно определить цену деления измерителя деформации и сравнить с данными по паспорту. Поскольку шкала тен-

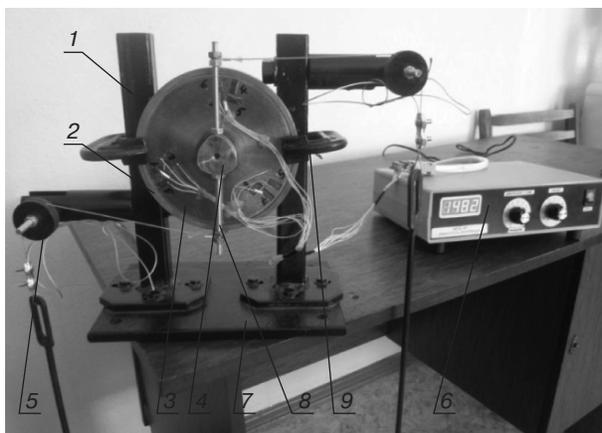
зометрической установки протарирована непосредственно в единицах деформации, то цена деления шкалы определяется по формуле

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta n_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где  $\Delta n_{\text{ср}}$  — среднее значение разности отсчетов относительных деформаций по трем датчикам по шкале измерителя деформации.

Следовательно, цена деления измерителя деформации будет равна  $1 \cdot 10^{-6}$ .

Дальнейшей задачей исследований было проведение натуральных экспериментальных испытаний РК — профильных соединений с гарантированным натягом на прочность. Для решения данной задачи было разработано и изготовлено в ДКТБ ЗаБЖД нагрузочное устройство для испытания РК-3 профильного соединения с натягом (рис. 1). Данное устройство предназначено для реализации различных схем нагружения и соотношений  $n = D/D_m$ , где  $D$  — наружный диаметр ступицы, мм;  $D_m$  — средний диаметр отверстия в ступице, мм [3–6].



**Рис. 1.** Нагрузочное устройство для испытания РК-3 профильного соединения с натягом: 1 — стойка; 2 — крепежное кольцо; 3 — ступица; 4 — вал; 5 — штанга с роликами; 6 — измеритель деформации ИДТЦ-01; 7 — установочная плита; 8 — рычаг (плечо); 9 — струбцины  
[Fig. 1. Load device for testing of P-3 profile interference fit: 1 — stand; 2 — fixing ring; 3 — nave; 4 — shaft; 5 — bar with rollers; 6 — digital strain gauge; 7 — mounting plate; 8 — lever arm; 9 — clamps]

Нагрузочное устройство состоит из плиты, на которую с помощью болтов устанавливаются две стойки. К стойкам прикрепляются две штанги с роликами, а также двумя струбцинами — РК-3 профильное соединение. Нагрузка на образец в виде крутящего момента создается с помощью грузов, которые устанавливаются на гиревой подвес. Используя данное нагрузочное устройство и цифровой измеритель деформации ИДТЦ-01, с помощью способа тензометрии были проведены экспериментальные исследования образцов РК — профильных соединений с натягом.

Аппликация тензодатчиков производилась по трем площадям контакта в местах, где действует наибольшая радиальная сила — в форме прямоугольной розетки и в направлении наименьшей толщины ступицы (рис. 2). Направление наи-

большей деформации определялось поляризационно-оптическим методом согласно результатам, приведенным в работе [2].



**Рис. 2.** Схема расположения тензодатчиков  
[Fig. 2. Scheme of strain gauges' arrangement]

При этом была собрана полумостовая схема, тензодатчики подключены в двух направлениях РК-профильной ступицы для каждой зоны контакта, по предлагаемым традиционным схемам их установки согласно работам [3–7].

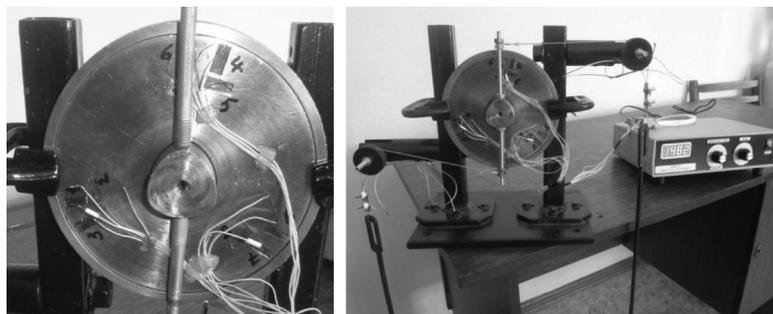
Эксперимент проводился для соединения, выполненного по посадке с натягом Н7/г6 для различных диаметров ступиц 130, 100 и 70 мм, т.е. для различных соотношений  $n = D/D_m$  (табл. 1).

Первый эксперимент проводился для  $n = 4$  (рис. 3).

Таблица 1

**Значения  $n$  для различных соотношений диаметров**  
[Numerical values of  $n$  for various ratios of diameters]

$n$	$D$ , мм	$D_m$ , мм
4	130	32,86
3	100	32,86
2	70	32,86



**Рис. 3.** Экспериментальный стенд ( $n = 4$ )  
[Fig. 3. Experimental stand ( $n = 4$ )]

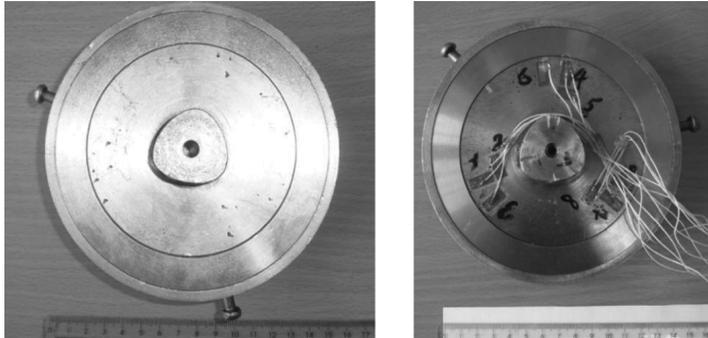
Эксперимент проводился следующим образом, с помощью грузов прикладывался крутящий момент, действующий на вал. От действия нагрузки возникала деформация ступицы в радиальном направлении. В результате измерений были

получены показания для тензодатчиков по трем площадям контакта на приборе ИДТЦ-01. Показания снимались до приложения нагрузки и после приложения нагрузки, разность этих показаний и есть возникающая деформация.

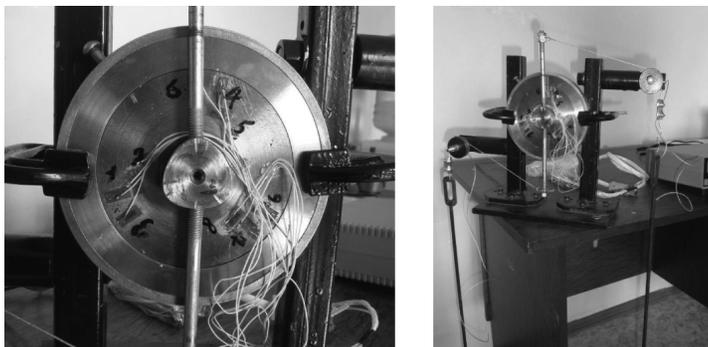
Для проведения эксперимента со ступицами меньшего диаметра, изготавливались переходные кольца, необходимые для крепления соединения к нагрузочно-му устройству (рис. 4).

Второй эксперимент для  $n = 3$  проводился аналогично первому (рис. 5).

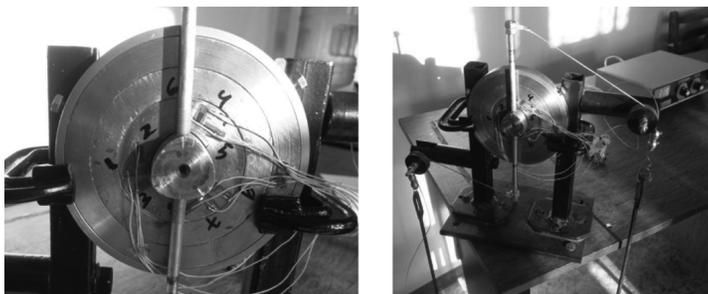
Третий эксперимент проводился для  $n = 2$  (рис. 6).



**Рис. 4.** Закрепление ступицы в кольцах  
[**Fig. 4.** Fixing of a nave in rings]



**Рис. 5.** Экспериментальный стенд ( $n = 3$ )  
[**Fig. 5.** Experimental stand ( $n = 3$ )]



**Рис. 6.** Экспериментальный стенд ( $n = 2$ )  
[**Fig. 6.** Experimental stand ( $n = 2$ )]

Относительную деформацию тензодатчика можно определить по формуле [7]

$$\varepsilon_i = \Delta c_i K_\varepsilon, \quad (3)$$

где  $\Delta c_i$  — разность показаний тензометрической установки,  $\Delta c_i = c_i - c_0$ ;  $c_0$  — начальное показание тензометрической установки при недеформированной решетке тензодатчика;  $c_i$  — показание тензометрической установки при деформированной решетке тензодатчика;  $K_\varepsilon$  — цена деления шкалы ИДТЦ-01,  $K_\varepsilon = 10^{-6}$ .

Эксперимент проводился для 10 соединений, выполненных по посадке с натягом  $H_7/r_6$  для  $n = 4$ ,  $n = 3$ ,  $n = 2$ . Для каждого соединения было выполнено по три измерения, так как рассматривались три зоны контакта. В результате для каждого  $n$  было получено по 30 значений.

Для определения деформаций в радиальном направлении от действия сосредоточенной распорной силы для подключения тензодатчиков использовалась форма розетки — прямоугольная двухэлементная. В такой форме, решетки расположены по двум осями, расположенным под прямым углом, и используется для моноосевого измерения напряжения. Также прямоугольная форма розетки, используется для измерения деформаций сдвига.

При прямоугольной форме розетки максимальные нормальные деформации определяются по формуле [7]

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  — деформация 1-го и 2-го тензодатчиков;  $\mu$  — коэффициент Пуассона для углеродистой стали,  $\mu = 0,24-0,28$ .

Минимальные нормальные деформации [7]

$$\varepsilon_{\min} = \varepsilon_1 - \mu\varepsilon_2, \quad (5)$$

Максимальные деформации сдвига [7]

$$\tau_{\max} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2. \quad (6)$$

В результате были определены деформации в радиальном направлении по наименьшей толщине ступицы, а также максимальные и минимальные нормальные деформации от действия крутящего момента для соединения, выполненного по посадке с натягом  $H_7/r_6$  для  $n = 4$ ,  $n = 3$ ,  $n = 2$ .

Пересчет измеренных деформаций в эквивалентные значения механических напряжений производится на основании следующих соотношений [8]:

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{\max} + \mu\varepsilon_{\min}); \quad (7)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{\min} + \mu\varepsilon_{\max}), \quad (8)$$

где  $E$  — модуль упругости, МПа,  $E = 2 \cdot 10^5$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $\mu = 0,24-0,28$ .

В результате были определены максимальные и минимальные напряжения для трех зон контакта для соединения, выполненного по посадке с натягом  $H_7/r_6$  для  $n = 4, n = 3, n = 2$ . Одним из условий применимости регрессионного анализа является воспроизводимость эксперимента, т.е. однородность случайных ошибок результатов наблюдений в различных опытах. Количественной мерой ошибок служит выборочная дисперсия.

Статистическая обработка результатов экспериментов заключалась в определении однородности дисперсий и адекватности результатов расчета. В результате проверки по критерию Фишера, установлено, что результаты расчетов адекватны при 5%-м уровне значимости, описываемому процессу контактного взаимодействия РК-профильных деталей с натягом.

По результатам расчетов были составлены таблицы сравнительных характеристик для выбора конструктивных параметров РК-3 профильного соединения с натягом в зависимости от внешней нагрузки (табл. 2, 3) [8].

Таблица 2

**Сравнительные характеристики рекомендуемых типов посадок с натягом для РК-3 профильных соединений при  $n = 1,4; 1,5; 1,6; 1,8$  и  $M = 200$  Н·м ( $D_m = 32-50$  мм,  $e = 1,12-1,8$  мм,  $N = 3$ )**  
[Comparative characteristics of the recommended types of interference fits for P-3 profile connection at  $n = 1,4; 1,5; 1,6; 1,8$  and  $M = 200$  of N · m ( $D_m = 32-50$  mm,  $e = 1,12-1,8$  mm,  $N = 3$ )]

Тип посадки [Fit type]	$n = D/D_m$	$N_r$ , мкм	Максимальные расчетные напряжения, МПа [Maximum stress, МПа]		Радиальные перемещения $\delta_{max}$ , мкм [Radial displacement, micron]
			на растяжение [tensile]	на сжатие [compressive]	
$H_7/r_6$	1,4	4,5	245,9	257,9	26,5
		25	253,6	265,9	27,3
	1,5	4,5	162,9	172,6	16,5
		25	168,1	178,1	17,1
	1,6	4,5	117,1	125,4	11,0
		25	120,8	129,3	11,4
	1,8	4,5	70,1	76,5	8,8
		25	72,3	78,9	9,1
$H_7/s_6$	1,4	9	247,2	259,2	26,6
		29,5	253,7	266,1	27,4
	1,5	9	163,8	173,5	16,6
		29,5	168,1	178,1	17,1
	1,6	9	117,7	126,1	11,1
		29,5	120,8	129,4	11,4
	1,8	9	70,5	76,9	8,9
		29,5	72,3	79,0	9,1
$H_7/p_6$	1,4	0,5	244,1	255,9	26,3
		21	252,3	264,6	27,2
	1,5	0,5	161,7	171,3	16,4
		21	167,2	177,1	17,0
	1,6	0,5	116,2	124,5	10,9
		21	120,2	128,7	11,3
	1,8	0,5	69,6	76,0	8,7
		21	71,9	78,5	9,0

Тип посадки [Fit type]	$n = D/D_m$	$N_r$ , мкм	Максимальные расчетные напряжения, МПа [Maximum stress, MPa]		Радиальные перемещения $\delta_{\max}$ , мкм [Radial displacement, micron]
			на растяжение [tensile]	на сжатие [compressive]	
$H_7/t_6$	1,4	14,5	251,6	263,9	27,1
		35	260,6	273,3	28,1
	1,5	14,5	166,7	176,6	16,9
		35	172,7	182,9	17,5
	1,6	14,5	119,8	128,3	11,3
		35	124,1	132,9	11,7
	1,8	14,5	71,7	78,3	9,1
		35	74,3	81,1	9,3

Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований РК-3 профильных соединений с натягом, а также анализ опыта применения данных соединений в различных узлах машин и механизмов [3–7], в зависимости от конструктивного параметра  $n$ , а также значения внешней нагрузки следует применять ряды посадок с натягом (табл. 4).

Таблица 3

**Рекомендуемые посадки с натягом для зубчатых передач с РК-3  
профильным соединением вал-ступица  
[The recommended interference fits for tooth gearings with P-3  
profile shaft-nave connection]**

Соотношение диаметров, [Ratio of diameters] $n = D/D_m$	Крутящий момент $M_r$ , Н·м [Torque]	Модуль, мм [Magnitude]	Степень точности передачи [Transfer accuracy degree]	Рекомендуемые типы посадок [Recommended types of fits]	Применяемые марки сталей для изготовления деталей соединения [Applied steel grades for production of parts with the connection]
1,4	5–200	1–3,5	7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	45, 40X, 40XH, 20X, 18XГТ, 12ХНЗА
		3,5–6,3	6, 7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6$	
1,5	5–200	1–3,5	6, 7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
		3,5–6,3		$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
1,6	5–200	1–3,5	6, 7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
		3,5–6,3		$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
1,8	5–200	1–3,5	6, 7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
		3,5–6,3		$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	

В основном в машиностроении для зубчатых передач, к размерам которых не предъявляют высоких требований, применяют марки сталей 45 и 40X с последующей термообработкой [6].

В результате экспериментальных исследований были определены деформации в радиальном направлении по наименьшей толщине ступицы, а также максимальные и минимальные нормальные деформации от действия крутящего момента для соединения, выполненного по посадке с натягом  $H_7/r_6$  для  $n = 4, n = 3, n = 2$ . Экспериментальным путем установлено, что изменения максимальных и

минимальных напряжений для трех зон контакта РК-3 профильного соединения носит линейный характер. Статистическая обработка результатов экспериментов заключалась в определении однородности дисперсий и адекватности результатов расчета. В результате проверки по критерию Фишера, установлено, что результаты расчетов адекватны при 5%-м уровне значимости, описываемому процессу контактного взаимодействия РК-профильных деталей с натягом.

По результатам расчетов были составлены таблицы сравнительных характеристик рекомендуемых типов посадок РК-3 профильного соединения для зубчатых передач при выборе конструктивного параметра  $n$  и внешней нагрузки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Григорьева О.А. Технологическое обеспечение прочности профильных неподвижных соединений упругопластическим деформированием элементов соединения: дисс. ... канд. техн. наук. Омск, 2004. 138 с.
- [2] Ильиных В.А. Расчет и выбор конструктивных параметров профильных соединений с равноосным контуром: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1987. С. 10–15.
- [3] Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Изготовление образцов и разработка экспериментального стенда для испытания РК-3 профильного соединения на прочность // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 3(31). 246 с.
- [4] Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Расчет на прочность РК-3 профильных соединений с натягом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 17–21.
- [5] Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Экспериментальные исследования РК-3 профильных соединений с натягом. Транспортная инфраструктура Сибирского региона / Материалы четвертой всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 13–17 мая 2013 г. Иркутск: ИрГУПС, 2013. Т. 2. С. 349–352.
- [6] Рожкова Е.А. Выбор конструктивных параметров РК-3 профильных соединений для различных условий эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. Братск: БрГУ, 2014. № 1(21). С. 40–45.
- [7] Рожкова Е.А., Ильиных В.А., Ярилов В.Е. Анализ напряженно-деформированного состояния взаимодействия деталей РК-3 профильного соединения с натягом методом конечных элементов (МКЭ) // Вестник СамГУПС. Самара: СамГУПС, 2016. № 4. С. 35–41.
- [8] Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие / под ред. канд. техн. наук Р.А. Маркова. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.

© Рожкова Е.А., Четвериков С.В., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 9 октября 2017

Дата принятия к печати: 11 января 2018

#### Для цитирования:

Рожкова Е.А., Четвериков С.В. Методика проведения экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния профильных соединений с натягом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 46–58. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-46-58

#### Сведения об авторах:

Рожкова Елена Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры подвижно-го состава железных дорог Иркутского государственного университета путей сообщения

филиала Забайкальского института железнодорожного транспорта. *Область научных интересов*: машиноведение, системы приводов и детали машин. *Контактная информация*: e-mail: helenuys@mail.ru

*Четвериков Сергей Владимирович* — кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава железных дорог Иркутского государственного университета путей сообщения филиала Забайкальского института железнодорожного транспорта. *Область научных интересов*: Машины, агрегаты и процессы. *Контактная информация*: e-mail: helenuys@mail.ru

## TECHNIQUE FOR CONDUCTING EXPERIMENTAL STUDIES ON STRESS-STRAIN STATE OF P-3 PROFILE INTERFERENCE FITS

E.A. Rozhkova<sup>1,2</sup>, S.V. Chetverikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk state transport university  
15, Chernyshevsky str., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
<sup>2</sup> Transbaikal Institute of Railway Transport  
11, Magistralnaya str., Chita, 672040, Russian Federation

In mechanical engineering the following profile connections are applied most often: with three sides (P-3); with three cut off sides (PC-3); with four cut off sides (PC-4) and with five sides (P-5 and PC-5). Despite considerable results, in the field of studying of stresses and deformations at contact interaction of solid bodies of various forms there is an unresolved number of tasks, which are of scientific and practical value. As the analysis of theoretical and experimental studies of motionless detachable and non-detachable connections (cylindrical, profile) has shown, there are unresolved tasks, in particular regarding the choice of geometrical form of contour curves, the magnitude of interference fit of motionless, non-detachable profile connections with equiaxial contour. The working capacity and reliability polygon profile connections with interference fit is defined by their strength, that is ability of elements to resist strain when in use. For the purpose of determination of working capacity of polygon profile connections with interference fit with respect to strength, stresses and deformations arising in hub with polygon profile opening from the action of polygon profile shaft installed in a nave with interference fit. The article considers the technique of conducting experimental studies by strain-gauging method for the purpose of assessing the influence of structural parameters and external loadings on stress-strain state of parts of the connection. Based on the experimental results tables of comparative characteristics of the recommended types of interference fits for P-3 profile connections and also the recommended interference fits for the corresponding n values of P-3 profile shaft-nave connections applied for tooth gearings were composed.

**Key words:** polygon profile shaft, polygon profile opening, interference fit, structural parameters

### REFERENCES

- [1] Grigorieva O.A. Tehnologicheskoe obespechenie prochnosti profil'nyh nepodviznykh soedinenii uprogoplasticheskim deformirovaniem elementov soedineniya [Technological provision of strength of motionless profile connections by elasto-plastic deformation of elements of connection]. Cand. of Science in Engineering (Dissertation). Omsk: Ohm of GTU, 2004. (in Russ).
- [2] Ilinykh V.A. Raschet i vybor konstruktivnykh parametrov profil'nykh soedinenii s ravnoosnym konturom [Calculation and choice of structural parameters for profile connections with equiaxial contour]. Author's thesis. ... Cand.Tech.Sci. Moscow: MVTU publ., 1987. P. 10–15. (in Russ).

- [3] Rozhkova E.A., Ilinykh V.A. Sample fabrication and experimental stand development for testing RK-3 profile joint toughness. *Modern technologies. System analysis. Modeling. Scientific journal.* Irkutsk: IrGUPS publ., 2011. No. 3(31). 246 p. (in Russ).
- [4] Rozhkova E.A., Ilinykh V.A. The calculation on toughness of rk-profile connection. *Sovremennye tehnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie.* 2012. No. 2 (34). P. 17–21. (in Russ).
- [5] Rozhkova E.A., Ilinykh V.A. Eksperimental'nye issledovaniya RK-3 profil'nyh soedinenii s natyagom [Experimental studies of P-3 profile connections with interference fit]. *Transport infrastructure of the Siberian region: Materials of the fourth All-Russian scientific and practical conference with the international participation, on May 13–17, 2013* Irkutsk: In 2 t. Irkutsk: IrGUPS publ., 2013. (in Russ).
- [6] Rozhkova E.A. Choosing design parameters of the profile connections with three-edged equiaxed shape for different working conditions. *Systems. Methods. Technologies.* Bratsk: BRGU, 2014. No. 1(21). P. 40–45. (in Russ).
- [7] Rozhkova E.A., Ilinykh V.A., Yarilov V.E. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vzaimodeistviya detalei RK-3 profil'nogo soedineniya s natyagom metodom konechnyh elementov (MKE) [Stress-strain state analysis of interaction of parts of P-3 profile connection with interference fit by finite element method (FEM)]. *The messenger of SAMGUPS, Samara: SamGUPS publ., 2016.* No. 4. P. 35–41. (in Russ).
- [8] Tenzometriya v mashinostroenii [Strain-gauging in mechanical engineering]. *Handbook. Under the editorship of Cand.Tech.Sci. R.A. Makarov.* Moscow: Mechanical engineering publ., 1975. 288 p. (in Russ).

**Article history:**

Received: October 09, 2017

Accepted: January 11, 2018

**For citation:**

Rozhkova E.A., Chetverikov S.V. (2018). Technique for conducting experimental studies on stress-strain state of P-3 profile interference fits. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19 (1). 46–58. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-46-58

**Bio Note:**

*Elena A. Rozhkova* — Candidate of Technical Sciences, associate professor at “The rolling stock of the railroads” department, Irkutsk state transport university. *Research interests:* machine science, drive systems, machine parts. *Contact information:* e-mail: helenuys@mail.ru

*Sergey V. Chetverikov* — Candidate of Technical Sciences, associate professor at “The rolling stock of the railroads” department, Irkutsk state transport university. *Research interests:* machines, units and processes. *Contact information:* e-mail: helenuys@mail.ru