

ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ СРЕДСТВАМИ ТЕН- ЗОМЕТРИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ И МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Бехер С.А., Выплавень В.С., Попков А.А., Гуляев М.А., Шляхтенков С.П.
*Сибирский государственный университет путей сообщения, 191, Дуси Ковальчук,
Новосибирск, 630049, behers@mail*

Введение. На транспорте, в машиностроении и строительстве широко используются разъемные соединения, неподвижность которых обеспечивается силами трения: прессовые и тепловые соединения колец с валами и осями, болтовые соединения конструкций. Силы трения между элементами соединений возникают под действием остаточных упругих напряжений и описываются законом Амонтона-Кулона. При тепловой и прессовой посадках уровень упругих напряжений определяется разностью диаметров деталей, а в болтовых соединениях – максимальным моментом затяжки.

Подвижность соединений является достаточно распространенным дефектом, который в конечном итоге приводит к отказу, аварии или крушению подвижного состава и строительных конструкций [1]. Периодическая диагностика таких узлов в эксплуатации проводится после их полного или частичного демонтажа при визуальном осмотре, измерении геометрических величин или силовых характеристик. Приборы и методы неразрушающего контроля прочности соединений с натягом в настоящее время отсутствуют.

Целью работы является определение закономерностей изменения распределения деформаций в соединениях с натягом при локальном тепловом или механическом воздействии и разработка способов неразрушающего контроля их прочности.

Идея работы заключается в зависимости поверхностных деформации элементов соединений с натягом от напряжений трения на сопряженных поверхностях при наличии «проскальзывания», что может быть использовано для оценки предельных значений напряжений трения. В процессе нагружения прессового соединения временные зависимости деформации его элементов зависят от уровня нагрузки и от напряжений трения на границе соединения (рис. 1). При отсутствии «проскальзывания» на границе прессовое соединение

ведет себя как твердое тело, при наличии «проскальзывания» линейность силы и деформаций нарушается. Таким образом при известных зависимостях деформаций в разных участках элементов соединений от времени решение обратной задачи упругого деформирования может быть использовано для количественной оценки предельных значений напряжений трения. При условии, что внешняя нагрузка не превысит предел прочности, предлагаемый метод относится к неразрушающим.

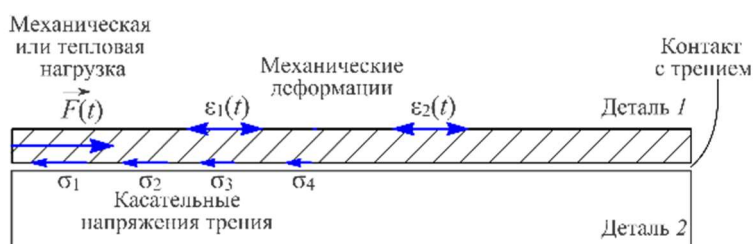


Рис. 1 – Поясняющая идею работы схема деформации объекта при внешнем нагружении, в которой напряжения трения являются граничными условиями

Экспериментальные исследования проводились с использованием быстродействующего тензометрического комплекса «Динамика-3» (номер в Государственном реестре 66938-17) и оптико-поляризационного датчика деформаций [2], обеспечивающего измерение относительных деформаций на базе 60 мм с погрешностью не более $0,4 \cdot 10^{-4}$ (погрешность напряжений по стали не более 0,08 МПа). Для испытаний специально подготовлены прессовые соединения колец подшипников с валами с усилиями запрессовки от 3,7 до 10,5 кН, болтовые соединения стальных пластин с усилиями затяжки до 120 Н·м. Тепловое нагружение объектов контроля осуществлялось латунным цилиндром, предварительно нагретым до 200 °С, механическое – на электромеханическом прессе с максимальной нагрузкой то 4 т (40 кН).

Моделирование процессов деформирования при механическом и тепловом нагружении проводилось методом конечных элементов в условиях квазистатического приближения, в котором инерционные эффекты не учитывались, а скорость деформирования принималась существенно выше скорости распространения теплового поля. Конечно-элементная модель кольца

и вала состояла из 16 тыс. тетрагональных элементов (рис. 2 а) с размерами от 0,6 до 8,3 мм. Характеристики материала кольца соответствовал стали ШХ15, вала – сталь 20. При моделировании варьировали натяг (разность диаметров кольца и вала в свободном состоянии) в диапазоне от 20 до 120 мкм при диаметре вала 110 мм, коэффициент трения - от 0,01 до 0,5.

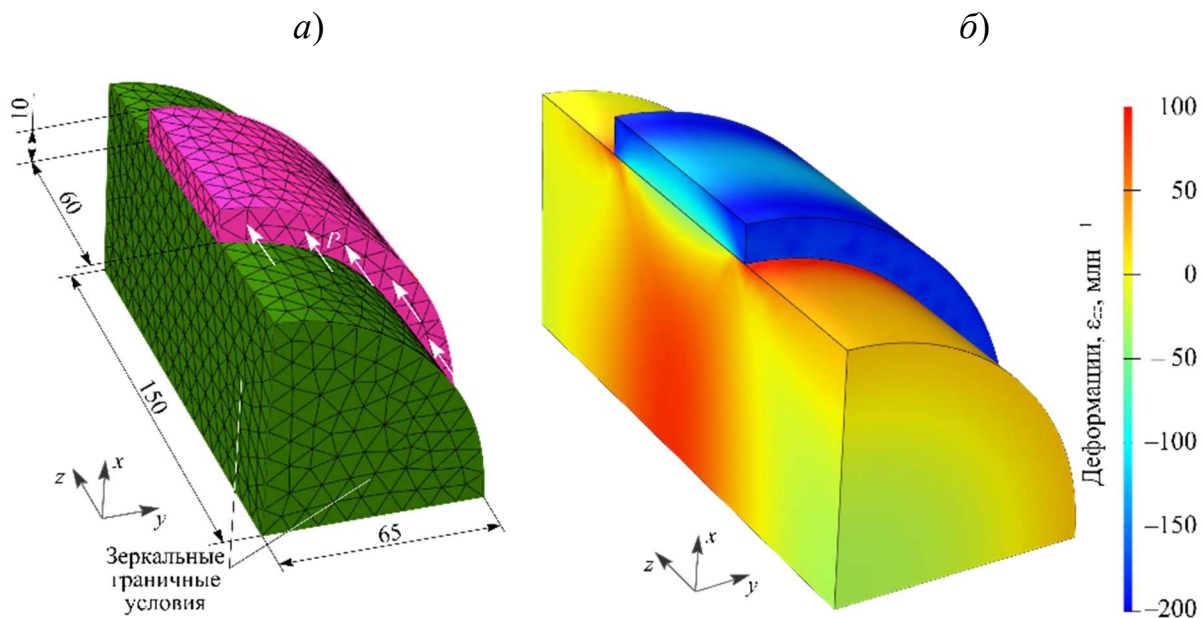


Рис. 2 – Модель кольца на валу с прессовой посадкой (а) и результаты расчета упругих механических напряжений ε_{zz}

Задача расчета распределения упругих деформаций при посадке кольца на вал с натягом при наличии трением является статистически неопределимой. Упругие деформации зависят не только от граничных условий, но и от начальных. При этом рассчитываемое стандартными пакетами решение (рис. 2 б) является лишь одним из возможных.

Распределение упругих деформаций ε_{zz} при посадке с натягом без внешней нагрузки (рис. 3) зависит от коэффициента трения. Все деформации являются отрицательными, кольцо сжато в осевом направлении. При изменении коэффициента трения от 0,01 до 0,5 деформации изменяются на 62 млн^{-1} . Таким образом напряжения трения на границе соединения оказывают достаточно влияние на упруги деформации на поверхности кольца при обычной чувствительности тензометрической системы $2,5 \text{ млн}^{-1}$ (0,5 МПа).

Основная неопределенности анализа результатов конечно-элементного моделирования связаны со неоднозначностью идентификации закономерностей распределения упругих деформаций, связанной с влиянием начальных условий (рис. 3) и существенно трехмерным характером деформирования тела, влиянием деформаций в одном направлении на деформации в двух других.

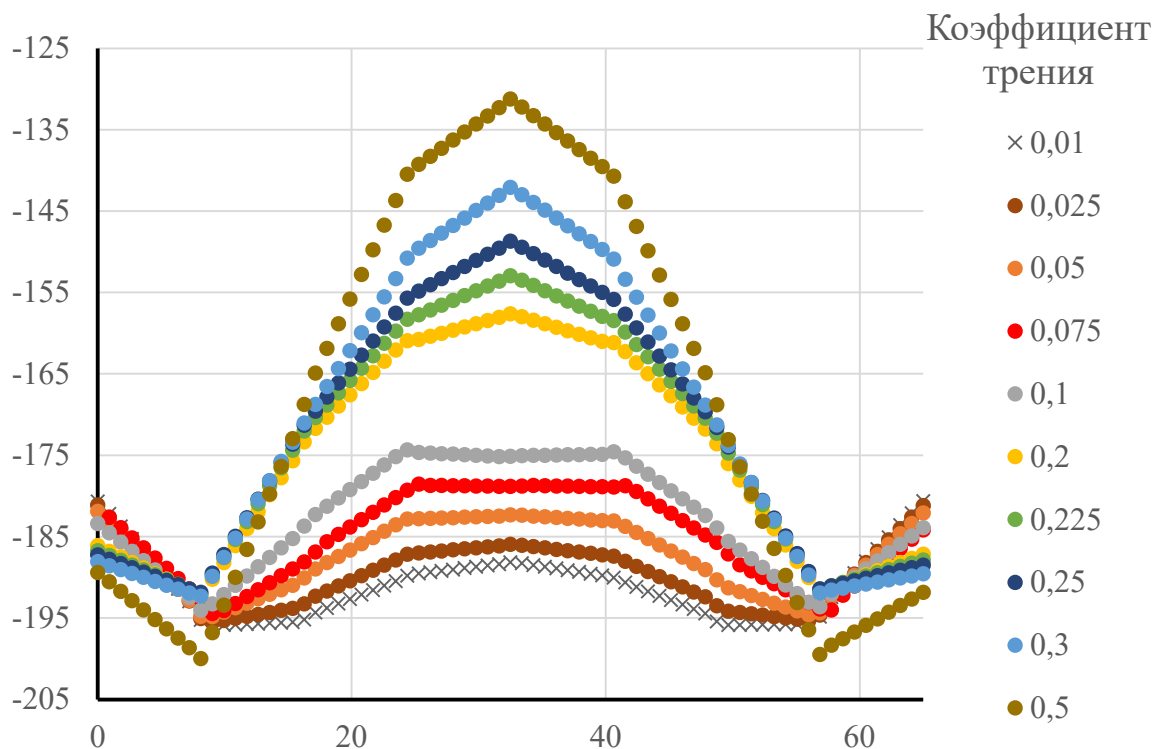


Рис. 3 – Распределение упругих деформаций ϵ_{zz} вдоль кольца по результатам расчета соединения с натягом 110 мкм с различными значениями коэффициента трения

Моделирование поведения прессового соединения под внешней нагрузкой проводилось при постоянном натяге и варьировании коэффициента трения. Это позволило исключить влияние разбиения объекта на конечные элементы на результаты расчетов и упростить процесс сравнения результатов. Механическая нагрузка воспроизводилась равномерно распределенным давлением по торцевой плоской поверхности кольца (рис. 2 а). Для оценки деформаций, вызванных только внешней силой, рассматривалось их приращение к деформациям от прессовой посадки.

Деформации при увеличении внешней нагрузки монотонно возрастают по абсолютной величине (рис. 4). Распределение деформаций по длине кольца имеет характерный ломаный характер, что очевидно связано с проскальзыванием сопряженных поверхностей кольца относительно вала. На всех зависимостях вблизи концов кольца на расстоянии до 10 мм наблюдаются изломы, связанные с влиянием толщины кольца 10 мм.

При коэффициенте трения 0,025 и меньше в средней части кольца в области от 10 до 55 мм зависимость деформаций от расстояния блика к линейно, изломы графиков практически не идентифицируются (рис. 4 а). Для коэффициентов трения больше 0,075 при нагрузках от 12 до 20 кН однозначно идентифицируются изломы графиков (рис. 4 б, в, г). Излом сопровождается областью протяженностью 10 мм, в которой наклон графика уменьшается в 2-3 раза. При увеличении коэффициента трения координата точки излома смещается ближе к краю кольца с нагрузкой, а значение деформаций увеличивается. Эта закономерность может быть использована для оценки сил трения в прессовом соединении.

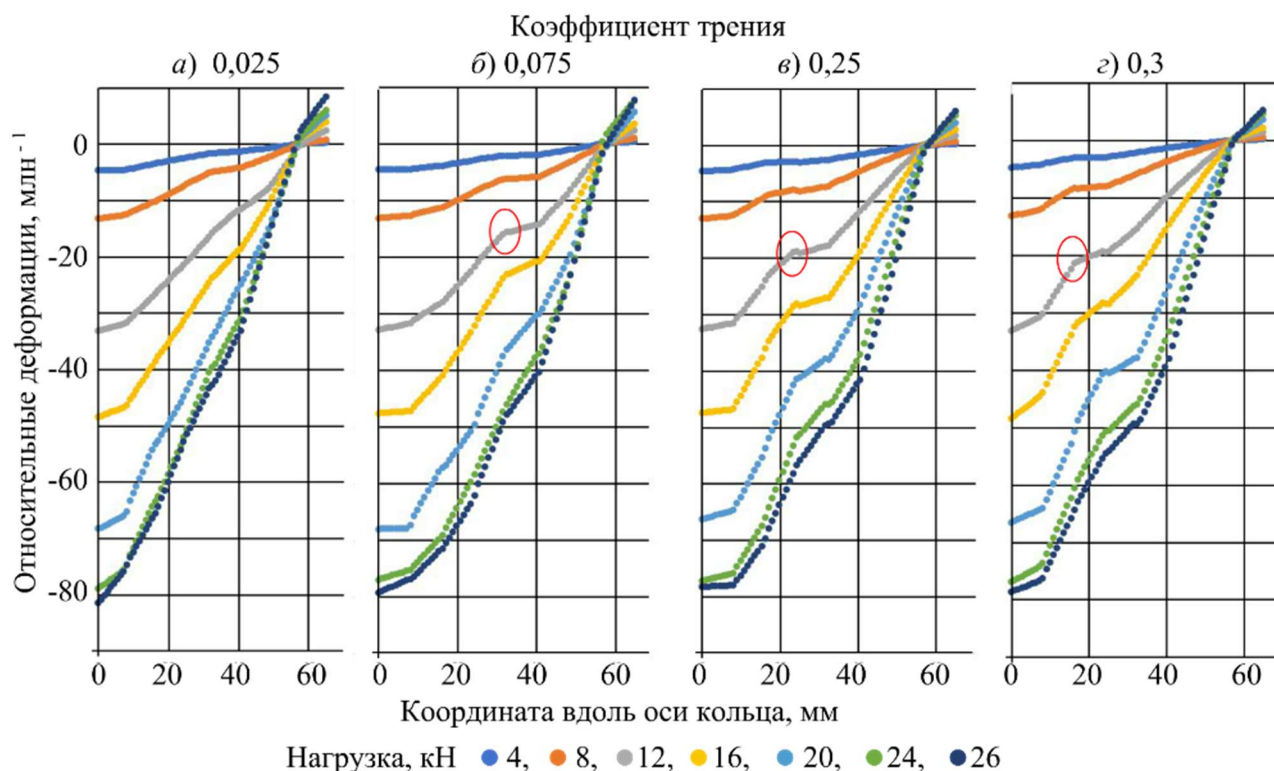


Рис. 4 – Распределение изменения упругих деформаций ϵ_{zz} вдоль кольца подшипника при различной механической нагрузке и коэффициенте трения в месте соединения с валом

Результаты конечно-элементного моделирования (рис. 5) при локальном тепловом воздействии на поверхность кольца однозначно идентифицируются три этапа деформирования. На первом начальном этапе наблюдается неравномерное распределение температуры кольца по толщине (рис. 5 б). При этом тепловое воздействие создает эквивалентный момент силы \vec{M} . Кольцо приобретает эллипсность, при которой в одном сечении размер уменьшается, а в другом – увеличивается. Это вызывает повышение показаний датчика деформаций на свободных кольцах и образцах с зазором. На образцах с натягом этот этап отсутствует, так как вал ограничивает уменьшение диаметра кольца.

На втором этапе (рис. 5 з) температура кольца по толщине распределена достаточно равномерно и основной градиент температур направлен по окружности кольца, что эквивалентно нагружению горизонтальной силой \vec{F} (рис. 5 з). При этом датчик регистрирует уменьшение деформаций. На последнем третьем этапе линейные размеры кольца увеличиваются в результате теплового расширения. Рассчитанные временные зависимости относительных деформаций (рис. 5 а) и температуры (рис. 5 б).

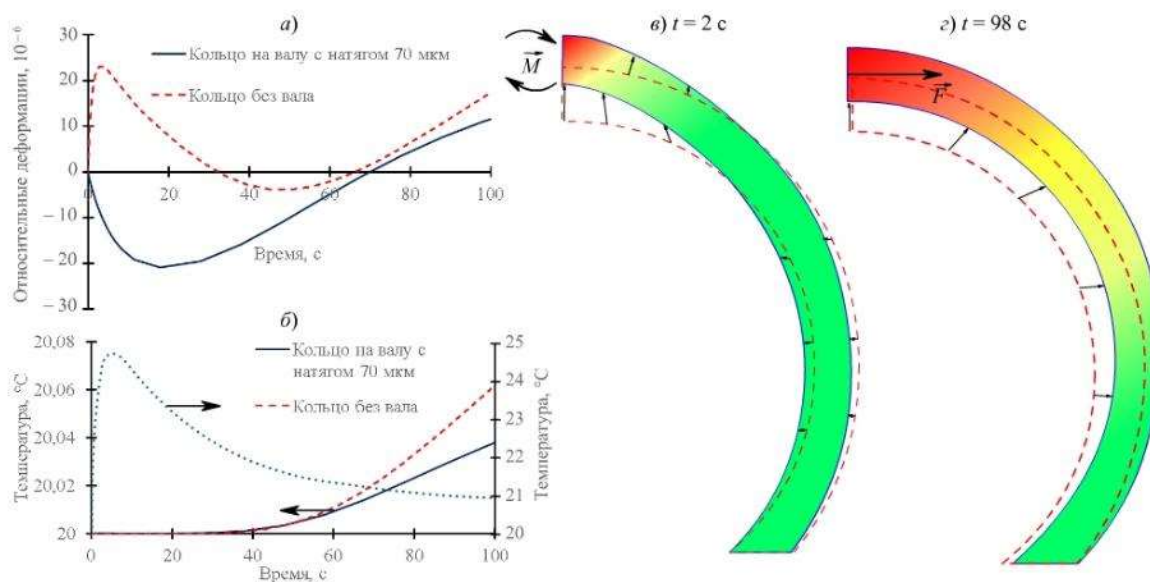


Рис. 5 – Результаты моделирования методом конечных элементов свободного кольца подшипника и прессового соединения с натягом: зависимости деформаций (а) и температуры (б) от времени, форма свободного кольца и температурное поле через 2 с (в) и 98 с (з) от начала нагрева

Эксперименты по тепловому воздействию и механическому нагружению образцов прессовых соединений проводились с использованием тензометрической системы Динамика-3 (рис. 6).



Рис. 6 – Схема испытаний при тепловом (а) и механическом (б) нагружении

При тепловом воздействии на элемент кольца локальные изменения температуры ΔT создают деформации во всем образце, которые эквивалентны действиям в нагретом элементе материала объемных сил: радиальных и касательных. Деформации вала во времени развиваются немонотонно (рис. 8). На начальном этапе нагрева регистрируется растяжение вала, затем на интервале от 80 до 145 с наблюдается локальный максимум и снижение уровня деформаций на (5-10) % (рис. 8 а). Уменьшение деформаций связано со уменьшением градиента температуры из-за остывания нагревателя.

Для оценки временных параметров сигналов деформаций рассчитана их скорость изменения в скользящем окне длительностью 2 с (рис. 7 б) и 50 с (рис. 7 в). Временная зависимость скорости деформаций (рис. 7 б) содержит нестационарные пульсации, которые наблюдаются только в области высоких значений скорости изменения деформаций. На интервале от 80 до 145 с, на котором скорость близка к нулю и, следовательно, изменения напряжений в материале кольца не происходит, амплитуда пульсации не превышает 10 % их максималь-

ного значения. Пульсации скорости отражают дискретный характер локального «проскальзывания» кольца и вала, когда напряжение на границе превышает силы трения.

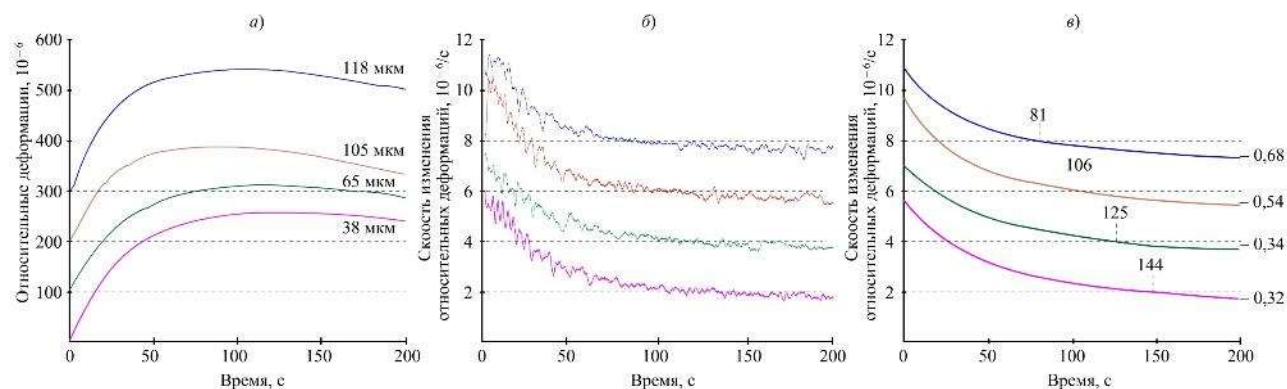


Рис. 7 – Временные зависимости деформаций (а) валов прессовых соединений с различными натягами, измеренные датчиком поз. 2 рис. 3 б, и скорости изменения деформаций, усредненные на интервале 2 с (б) и 50 с (в)

Время достижения максимума деформаций определялось по изменению знака скорости (рис. 7 в), рассчитанной в скользящем окне длительности 50 с, что позволило сгладить пульсации. Эти времена коррелируют с натягами прессовых соединений с коэффициентом корреляции 0,97 и коэффициентом пропорциональности – 0,71 мкм/с. В образцах с высокими значениями натяга реализуются большие значения нормальных напряжений и напряжений трения на границе соединения. В этих условиях для деформирования вала в таких прессовых соединениях требует более высоких градиентов температур. Поэтому процессы деформирования вала останавливаются при снижении градиента температуры, связанном с исчерпанием запаса тепловой энергии нагревателя.

Выводы. Экспериментально и методами математического моделирования определена связь параметров зависимости деформаций от времени с параметрами прочности соединения: усилиями запрессовки и моментом затяжки. Установлены требования разделения зон воздействия на объект и измерения деформаций, экспериментально показана возможность такого разделения для колец подшипников и болтовых соединений пластин. Обнаружена связь максимума и градиента деформаций с прочностью

соединения с коэффициентом корреляции 0,97. В результате экспериментов установлена немонотонность скорости деформирования, вызванная дискретностью проскальзывания сопряженных поверхностей соединений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10110, <https://rscf.ru/project/23-29-10110/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

Литература

1. *Allal Bedlaoui, Hamid Boutoutaou. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023, V. 128, P. 2407-2418.*
2. *В.Н. Федоринин, С.А. Бехер, В.С. Выплавень [и др.]. Автометрия. 2023, Т. 59, С. 33-42.*