

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-4.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN417.pdf>

Статья опубликована 26.07.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Панова И.М., Панов А.Д. Анализ надежности соединений с натягом в особых условиях эксплуатации // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.891(048)

Панова Ирина Михайловна

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», Россия, Москва¹

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: Pim-07@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=803534

Панов Александр Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», Россия, Москва

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: pad-4850@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=13644

Анализ надежности соединений с натягом в особых условиях эксплуатации

Аннотация. В настоящее время все большее значение приобретают исследования поведения материалов в деталях и конструкциях, целью которых является обеспечение надежности работы при динамических воздействиях в различных условиях эксплуатации. Соединения с натягом также не являются исключением. Показателем их надежности является долговечность при определенных режимах и условиях эксплуатации. Одной из основных причин снижения долговечности соединений с натягом является фреттинг. В данной статье рассмотрено влияние некоторых эксплуатационных факторов на развитие фреттинга. Одним из таких факторов является воздействие отрицательных температур. Установлено, что при низких температурах увеличивается скорость развития поверхностных трещин, вследствие чего повышается вероятность фреттинг-усталости. Также учтено, что нагрузки на соединения при низких температурах могут быть как статическими, так и переменными. Указанные осложненные условия эксплуатации влияют на надежность соединений и требуют особого рассмотрения с учетом технологии изготовления соединения и обработки поверхностей деталей, а также выбора материалов. В данной работе авторами предложены уточненные расчетные зависимости для обоснованного выбора посадок соединений с натягом при их эксплуатации в условиях отрицательных температур с учетом действия переменных напряжений.

Ключевые слова: соединения с натягом; эксплуатация при переменных нагрузках; хладостойкость; усталость; фреттинг; фреттинг-коррозия; фреттинг-усталость

¹ 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, ст. 1

Введение

Соединения с натягом, или прессовые, имеют широкое применение, поскольку их выполнение не требует больших затрат, а сопрягаемые детали могут воспринимать значительные нагрузки, как статические так и переменные. Вместе с тем, высокая концентрация напряжений и склонность к контактной коррозии вызывают фреттинг [1], что снижает надежность и долговечность соединений. Большинство соединений при работе испытывают переменные нагрузки, как пульсирующие, так и ударные. Эксплуатируются соединения с натягом зачастую при низких температурах. Исследование хладостойкости материалов и элементов конструкций показало падение сопротивления хрупкому разрушению при некоторых закритических температурах эксплуатации. Причиной является то, что при низких температурах увеличивается скорость развития поверхностных трещин и повышается вероятность фреттинг-усталости. Такие усталостные повреждения являются типичными для соединений с натягом [2]. Среди основных факторов, влияющих на процесс фреттинга, в работе [3] также указаны: число накопленных циклов воздействия, характеристики напряженного состояния, температура подверженных фреттингу поверхностей и условия окружающей среды. Следует отметить, что недостаточная изученность влияния перечисленных факторов снижает прочностную надежность оборудования [4], [5]. Известно также, что долговечность деталей снижается из-за появления усталостных трещин; как показывает практика, усталостные трещины начинают появляться в местах концентрации напряжений в соединениях, причем, чаще это происходит у краев охватываемой детали. Заметим, что увеличение контактного давления и повышение твердости поверхностей препятствуют развитию процесса образования усталостных трещин. Помимо сказанного отметим, что долговечность соединений зависит также от контактной жесткости рабочих поверхностей, которая определяется не только свойствами материалов, но и микрогеометрией рабочих профилей, поскольку финишная обработка поверхностей определяет не только фактическую площадь контакта в соединении, но и поверхностную твердость, а также наличие остаточных напряжений в поверхностном слое.

Постановка задачи

Все выше сказанное в полной мере относится к соединениям, работающим при переменных нагрузках и при отрицательных температурах, поэтому целью данной работы является анализ основных факторов, снижающих надежность соединений с натягом в этих, особых условиях.

Во-первых, отметим, что в осложненных условиях эксплуатации следует повышать показатели точности геометрической формы поверхности, а также назначать требуемую шероховатость поверхностей деталей с учетом обеспечения повышенной прочностной надежности соединения. Однако, анализ технологии обработки деталей на ряде машиностроительных заводов показал, что в 70 % случаев параметры шероховатости обеих деталей назначают равными $R_{a1} = R_{a2}$, и обычно это составляет $R_a = 5 \dots 0,8$ мкм, а точность размеров принимают по 5...7 квалитетам точности, [6]. В работе [7] установлено, что наибольшей прочностью обладают соединения, выполненные с применением температурной сборки, и наиболее целесообразно шлифование для внутренней детали, и точение внешней, поскольку прочность соединения при этом возрастает в 1,5 раза. Во-вторых, при нагружении соединения в поверхностных слоях деталей упругие деформации переходят в упругопластические и местами в пластические. Этот переход нарастает с увеличением нагрузки, а происходящие физико-химические процессы приводят к значительным изменениям исходных свойств материалов. Детали машин и механизмов подвергаются действию вибрационных нагрузок, что является причиной механических колебаний в контакте [8]. Как известно, механические колебания в контакте являются основной причиной развития фреттинга. С другой стороны, действие

отрицательных температур в условиях переменных нагрузок также увеличивает интенсивность развития фреттинга, несмотря на то, что предел выносливости большинства металлов и сплавов увеличивается при отрицательных температурах, в среднем в полтора раза [9]. Однако, одновременно при низких температурах существенно возрастает скорость распространения усталостных трещин. Это особенно опасно в зоне критических температур, которые для большинства сталей находятся в диапазоне 80...100 °С. Если еще при этом на гармоническое нагружение накладываются ударные нагрузки, то несущая способность соединения исчерпывается. Снижение предела выносливости материалов деталей при фреттинге по данным [9] может достигать 50 %, при этом наблюдается рост вероятности разрушения P с ростом напряжений σ и числа циклов N .

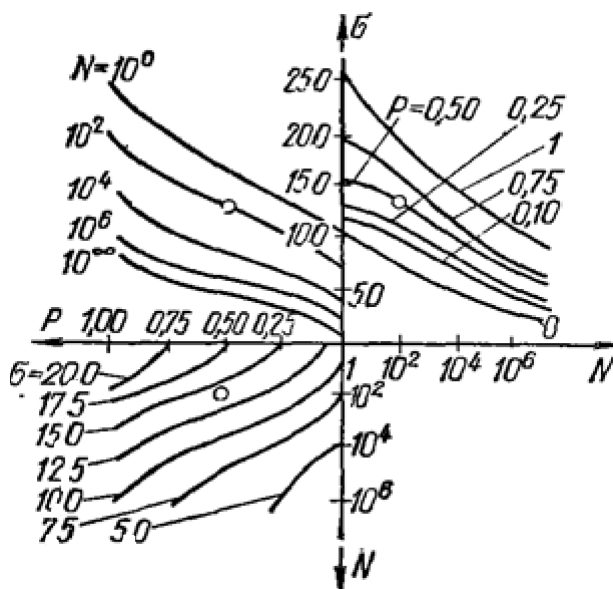


Рисунок 1. Диаграмма усталости материалов, учитывающая вероятность разрушения. Приведено из исследований работы [9]. Точка \circ соответствует значениям: $\sigma = 135$ Мпа, $N = 10^2$, $P = 0,05$.

Таким образом, надежность соединений с натягом снижается при переменных нагрузках, что также усугубляется действием отрицательных температур вследствие прогрессирования явлений фреттинга, и это должно быть учтено при подборе посадки.

Как известно, [10] несущая способность соединения определяется величиной контактного давления p . Обычно при его определении используют приближенные формулы, в которых присутствует коэффициент запаса сцепления, учитывающий рассеяние коэффициента трения. Действие переменных нагрузок рекомендуется учитывать занижением коэффициента трения примерно на 30-40%.

Переменные нагрузки, действующие на соединения, могут быть как осевые, так и скручивающие. Кроме того, вал испытывает переменный изгиб, чистый, консольный, комбинированный, а также круговой и плоский. Примером могут служить соединения зубчатых колес с валами в редукторах, дисков турбин с валами, колес и осей рельсового транспорта. [11]. Установлено, что при переменных осевых нагрузках, изменяющихся с частотой, не превышающей 10 Гц, нет существенного изменения долговечности соединения по сравнению со статическим нагружением. Это также справедливо относительно влияния переменных скручивающих моментов. Таким образом, наибольшее влияние оказывают переменные напряжения при изгибе вала. Опытами установлено существенное снижение прочности соединения при консольном переменном изгибе при увеличении амплитуды цикла

с возможным полным нарушением неподвижности соединения. При этом зависимость прочности соединения от амплитуды напряжений (1) носит линейный характер, из чего можно принять, что прочность при динамическом нагружении снижается по сравнению со статической на величину, пропорциональную $\beta\sigma_a$.

$$(pf)_{дин} = (pf)_{ст} - \beta\sigma_a d / l, \quad (1)$$

где: коэффициент β отражает угол наклона графика линейной зависимости усилия распрессовки F , характеризующей прочность соединения после консольного кругового изгиба, от амплитуды изгиба σ_a . На рис. 1 показаны результаты испытаний для двух способов выполнения посадки: механической сборки 1 и тепловой сборки 2.

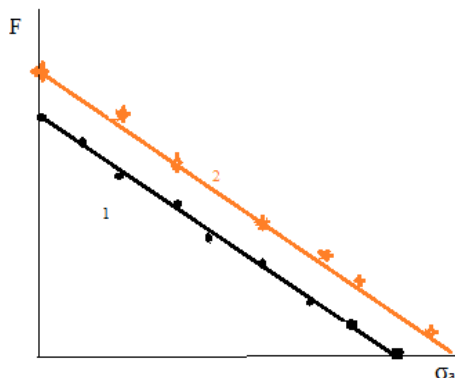


Рисунок 1. Зависимость усилия распрессовки F от амплитуды напряжений при изгибе σ_a .
(составлено авторами)

Опыты показали повышение несущей способности соединения с увеличением абсолютных размеров соединения, а коэффициент β линейно зависит от величины отношения l/d . Также установлено, что подобная линейная зависимость характерна для всех перечисленных видов изгиба. Общей причиной снижения прочности является появление зон проскальзывания между деталями. Повышение надежности соединения достигается введением дополнительного коэффициента запаса сцепления. Этот коэффициент определяется как отношение предельного статического момента к наибольшему моменту при динамическом нагружении. Таким образом, использование зависимости (1) при определении контактного давления позволяет более точно учесть влияние динамического нагружения.

Другим важным обстоятельством, влияющим на надежность посадки, является температурный фактор. Для повышения долговечности соединения в условиях низких температур необходимо анализировать хладостойкость материалов деталей соединения, учитывая, что способность к пластической деформации резко снижается в области отрицательных температур. Температурные границы хладноломкости зависят, помимо прочего, от напряженно-деформированного состояния деталей. В зоне отрицательных температур у некоторых сталей и сплавов происходят фазовые превращения, приводящие к изменению размеров, и как следствие, к ослаблению натяга.

Ослабление натяга при отрицательной температуре можно найти из выражения:

$$\Delta N = d\Delta\alpha\Delta t, \quad (2)$$

где: d – диаметр посадки, $\Delta\alpha$ – разность коэффициентов линейного расширения материалов втулки и вала, Δt – перепад температур от 20 °С до некоторой отрицательной температуры. Как видно из графика рис. 2, построенного для разных сочетаний материалов вала

и втулки, при диаметрах до 100 мм, [11] такое ослабление натяга при перепаде температур в 80 °С весьма существенно.

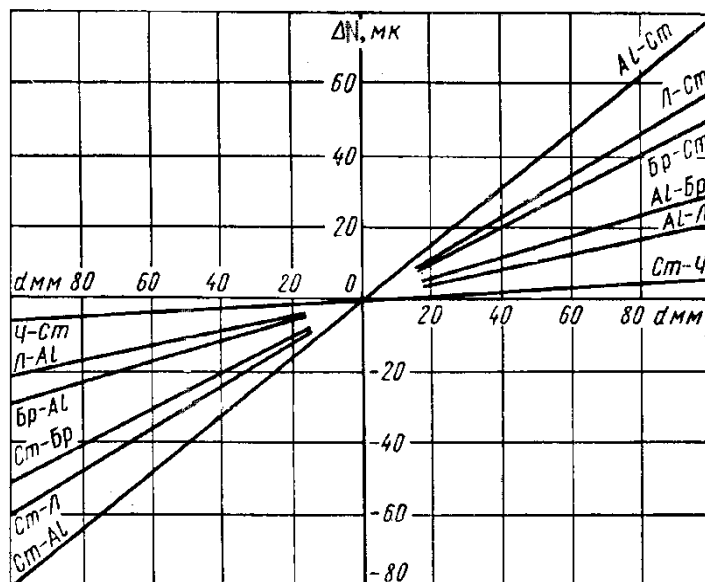


Рисунок 2. Температурное изменение посадок для разных сочетаний материалов втулки и вала при перепаде температур от нормальной, 20°С до отрицательной -60°С. Приведено по данным работы [11]

График построен с учетом значений $\Delta\alpha\Delta t$, где $\Delta\alpha=\alpha_1-\alpha_2$, разность коэффициентов линейного расширения втулки и вала. При этом при чугунной ступице и стальном вале натяг незначительно увеличивается с уменьшением температуры, а если вал чугунный, а ступица стальная, то наоборот, натяг уменьшится на такую же величину. Можно также определить соответствующие значения изменения натяга для сочетаний материалов втулки и вала: латунь-алюминий, бронза-алюминий, сталь-бронза, сталь-латунь и сталь алюминий, а также наоборот. Расчетные значения произведения $\Delta\alpha\Delta t$ можно взять из таблицы 1 [11].

Таблица 1

Приведена в работе [11]

Материал втулок	Материал валов			
	Алюминиевые сплавы	Латуни	Бронзы	Стали
Алюминиевые сплавы	0	0,00021	0,00029	0,00080
Латуни	-0,00021	0	0,00008	0,00059
Бронзы	-0,00029	-0,00008	0	0,00051
Стали	-0,00080	-0,00059	-0,00051	0
Чугуны	-0,00086	-0,00065	-0,00057	-0,00006

При назначении посадки рассчитанная по нагрузке исходная посадка должна быть изменена с учетом температурной поправки. При этом происходит уменьшение допуска посадки предпочтительно за счет поля допуска вала. Кроме того, в работе [11] также рекомендовано повысить класс чистоты обработки поверхностей, и, если возможно, отдавать предпочтение материалам с более близкими коэффициентами линейного расширения. Немалую роль в оценке надежности соединений с натягом при отрицательной температуре играет анализ хладостойкости соединений и хладноломкости материалов. При эксплуатации соединений в условиях отрицательных температур возрастает скорость коррозии при

фреттинге, а за счет снижения трещиностойкости возрастает и усталость при фреттинге. Отмеченные негативные явления зависят также от напряженно-деформированного состояния деталей соединения. Температурные макронапряжения постепенно выравниваются по сечению деталей, вызывая нарушение равновесия внутренних напряжений, при этом переход к новому равновесному состоянию вызывает изменение размеров и формы деталей соединения, что и является причиной температурного изменения посадки.

Как известно для втулки наиболее опасными являются точки, расположенные на её внутренней поверхности, где действуют радиальные σ_r и окружные σ_t напряжения, а поскольку при этом возникает плоское напряженное состояние, то условие прочности по теории максимальных касательных напряжений представим в виде:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (3)$$

где: $\sigma_1 = \sigma_t$, а $\sigma_3 = \sigma_r$. Зависимость разрушающих напряжений от температуры при испытании на трещиностойкость показывает падение номинальных разрушающих напряжений, $\sigma_{\text{раз}}$ при отрицательных температурах.

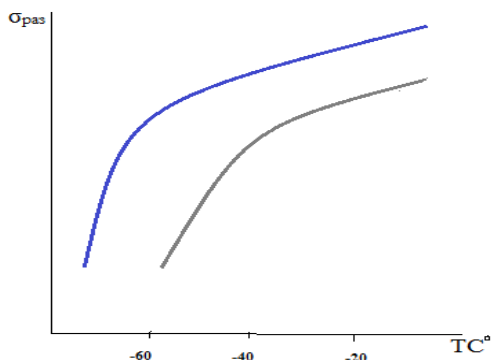


Рисунок 4. Падение номинальных разрушающих напряжений при испытаниях на трещиностойкость в зоне отрицательных температур у легированных и среднеуглеродистых сталей (по данным авторов)

Действие отрицательных температур приводит к более интенсивному разрушению поверхностей деталей, [12] вследствие накопления повреждений и потери пластичности с понижением температуры, как это показано на рис. 4.

Потеря пластичности с понижением температуры эксплуатации конструкционных сталей, как показано в [13], может быть проиллюстрирована зависимостью, представленной на рис. 5.

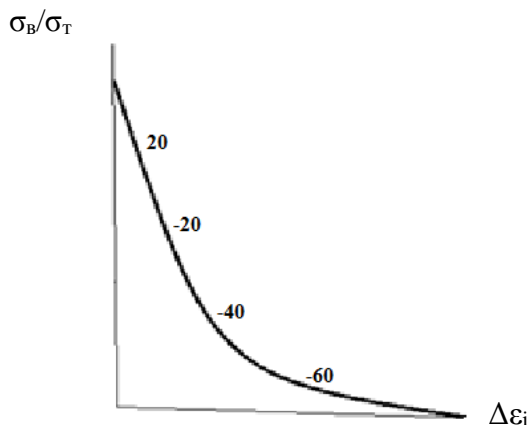


Рисунок 5. Предельная кривая потери пластичности при изменении температуры от 20°C до -60°C (по данным авторов)

Разрушение поверхности соединения с трещиной, возникшей при статическом или циклическом нагружении определяется уровнем местных пластических деформаций в вершине трещины, а при недостаточной хладостойкости переходит в хрупкое. Заметим, что интенсивность напряжений $\sigma_i = \sigma_{\text{ЭКВ}}$ в поверхностных слоях деталей нарастает с увеличением температурных деформаций ε_i в соответствии с зависимостью (4):

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m, \quad (4)$$

где: коэффициент A и показатель степени m зависят от материала и интенсивности напряжений при данной температуре. Расчетный натяг N в соединении может быть определен с учетом формулы Ляме, согласно [10] по формуле (5):

$$N = A \varepsilon_i^m \left[1 - \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 \right] \frac{d}{2} \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right), \quad (5)$$

где: d – диаметр соединения, d_2 – наружный диаметр охватываемой детали, C_1, C_2 – коэффициенты в формуле Ляме, E_1, E_2 – модули упругости материалов внутренней и внешней деталей.

Совокупное воздействие переменных нагрузок и отрицательных температур может привести к преждевременному ослаблению натяга. В этом случае при определении контактного давления с учетом амплитуды переменных нагрузок по формуле (1) следует использовать увеличенный коэффициент запаса сцепления, а затем, воспользовавшись выражением (5), получить расчетный натяг и подобрать необходимую посадку.

Заключение

Для повышения несущей способности соединений с натягом в осложненных условиях эксплуатации рекомендуется упрочняющая поверхностная обработка деталей и нанесение антикоррозионных покрытий. Выполнение посадки предпочтительно температурным способом. При выборе материалов деталей следует стремиться к сочетанию материалов с минимальной разницей коэффициентов температурного расширения, поскольку ослабление натяга в зоне отрицательных температур пропорционально разнице коэффициентов температурного расширения материалов деталей. Рекомендуется повышение класса точности и чистоты обработки поверхностей деталей с применением шлифования для внутренней поверхности охватываемой детали.

Несущая способность соединения снижается пропорционально амплитуде переменных напряжений. Наибольшее влияние оказывают напряжения изгиба. В связи с потерей пластичности материалов деталей при отрицательных температурах происходит увеличение скорости распространения усталостных трещин. Воздействие отрицательных температур увеличивает вероятность фреттинг-коррозии.

Фреттинг-усталость и фреттинг-коррозия являются основной причиной снижения долговечности соединений с натягом при переменных нагрузках и отрицательных температурах. Обоснованный выбор посадки с натягом согласно рекомендациям данной статьи повышает надежность соединения в осложненных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панова И.М., Язева Е.А. Анализ основных особенностей фреттинга деталей машин. Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2016. Том 4, №2.
2. Панова И.М., Язева Е.А. Фреттинг ответственных деталей машин. Современное состояние естественных и технических наук. «Спутник+» Москва 2015.
3. Дж. Коллинз. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ предсказание предотвращение Москва, Мир, 1984.
4. Захаров М.Н. Прочностная надежность оборудования М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 123 с.
5. Остяков Ю.А., Шевченко И.В. Проектирование деталей и узлов конкурентоспособных машин: учебное пособие – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 335 с.
6. Голубовский В.В., Прохоров С.Г. Технологические особенности сборки соединений с натягом. Пензенский государственный технологический университет, 2002.
7. Малицкий И.Ф., Чернятина Е.В. Влияние шероховатости и способов обработки на прочность сопряжения с натягом. Украина. «Машинобудування», №13, 2014.
8. Котенева Н.В., Перфильева Н.В., Перфильева А.Д. Исследование контактного взаимодействия твердых тел в условиях вибрационных нагрузок. Вестник ТГУ т.18, Вып. 4. 2013.
9. Трощенко В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках. Киев, Наук. Думка. 1978.
10. Детали машин. Под ред. Ряховского О.А. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014.
11. Гречищев Е.С., Ильяшенко А.А. Соединения с натягом. Расчеты, проектирование, изготовление. М. Машиностроение 1981 г. 247 с.
12. Елизаветин М.А. Повышение надежности машин. М. Машиностроение. 1973.
13. Махутов Н.А., Лыглаев А.В., Большаков А.М. Хладостойкость. Метод инженерной оценки Новосибирск. 2011 г.

Panova Irina Mikhailovna

Bauman Moscow state technical university after N.E. Bauman, Russia, Moscow
E-mail: Pim-07@mail.ru

Panov Alexander Dmitrievich

Bauman Moscow state technical university after N.E. Bauman, Russia, Moscow
E-mail: Pad-4850@mail.ru

Reliability analysis of connections with an interference fit in special operating conditions

Abstract. Currently, the growing importance of the study of the behaviour of materials and structures in detail, the purpose of which is to ensure reliability and durability under dynamic impacts in different operating conditions. the connections with an interference fit are no exception. Indicator of reliability is longevity in certain modes and conditions ekspluatácii. One of the main reasons for the decrease of durability of connections with an interference fit is fretting. In this article the influence of some factors on the development of operational frettinga. One such factor is exposure to freezing temperatures. Also take into consideration that the load on the connection at low temperatures can be both static and variable. These complicated operating conditions affect the reliability of connections, and require special consideration given the manufacturing technology of connection and surface treatment of parts, as well as the choice of materials. In this paper we propose the qualified payment according to informed choices of landing with an interference fit connections when operating in conditions of freezing temperatures.

Keywords: connection with an interference fit; operation under variable loads; hladostojkost; fatigue and fretting