

При этом между наружной обоймой подшипника 3 и внутренним отверстием зубчатого колеса 2 имеется зазор для исключения восприятия радиального усилия прокатки подшипником. Разработанная конструкция обеспечивает осевое биение вала не более 0,05 мм.

Разработанная конструкция клетки включает в свой состав узел вертикального нагружения верхнего блока валков, осуществляемого по шейке верхнего вала усилием 8 кН, позволяющим обеспечить необходимую жесткость новой клетки в диапазоне малых усилий деформирования (от 50 до 100 кН).

Исследования вертикальной и осевой жесткости показали, что величина вертикальной жесткости новых клеток равна 400 кН/мм и не имеет начального участка нелинейной жесткости.

Осевая жесткость имеет нелинейный характер и в диапазоне действующих осевых усилий (до 10...15 % от вертикального усилия) равна 100 кН/мм. Осевой зазор в подшипниковых опорах снижен до 0,05 мм.

Библиографические ссылки

1. Исследование условий прокатки на стане «280-2» и разработка мероприятий, направленных на повышение точности прокатки / В. П. Шеногин, С. А. Нелюбин, А. В. Храбров и др. // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 424–429.

2. Нелюбин С. А., Шеногин В. П., Тепин Н. В. Условия обеспечения производства проката повышенной точности на мелкосортных станах // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 1. – С. 453–456.

V. P. Shenogin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

N. V. Tepin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

System approach to design of rolling stands

It is proposed in the paper to apply the method of morphological analysis when designing the rolling stand. The design of the new rolling stand is offered, with a new principle of preliminary roller loading in its essence. It allowed obtaining a linear characteristic of the stand stiffness for the whole range of acting forces. The developed rolling stand allowed to improve the accuracy and stability of rolling products.

Keywords: design, rolling, stand

Получено: 02.11.12

УДК 621.88.084

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор;

Е. С. Чухланцев, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ПОЛИКОНТАКТНЫЕ НЕРАВНОЖЕСТКИЕ СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ И АНАЛИЗ ИХ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ

Рассмотрены различные виды соединений с натягом. Выявлены новые виды подобных соединений. Проведена их классификация. Определены перспективы направления по анализу их нагрузочной способности.

Ключевые слова: соединения с натягом, нагрузочная способность, поликонтактные неравножесткие соединения с натягом

Разработке новых конструкций соединений с натягом и методов их расчета уделено значительное внимание [4, 6, 8]. На первом этапе нагрузочная способность увеличивалась путем изменения натяга, площади посадки в большую сторону или уменьшения высоты микронеровностей [4]. В дальнейшем в зону сопряжения стали вводить различные материалы (прослойки), повышающие коэффициент трения в сопряжении [7]. Соединения рассматривались как поликонтактные, однако для проведения расчетов на прочность применялись следующие допущения:

- соединения рассматривались только как осесимметричные;
- материал для изготовления деталей соединения считается однородным;

- физико-механические характеристики промежуточных прослоек не учитываются;

- контакт происходит в условиях сухого трения с коэффициентом трения k ;

- пренебрегается зависимость величины коэффициента трения от величины относительной скорости смещения контактирующих поверхностей;

- линеаризация граничных условий;

- снесение граничных условий на недеформированные граничные поверхности;

- обе сопряженные криволинейные поверхности считаются идеально ровными.

Если высота прослойки становилась значительной, то предложенный метод не давал достаточно точных результатов. Далее в работе [6] была предложена новая методика расчета пресовых полисо-

единений с целью оптимизации напряженно-деформированного состояния и соответствующей ему нагрузочной способности, позволяющей повышать прочность, эффективность и надежность машин с конструкциями полисоединений.

Многообразие подходов к проектированию, теории расчета, оценке технического состояния и совершенствованию существующих конструкций поликонтактных соединений с натягом (ПКС) требует их классификации и дальнейшего разделения на несколько групп, принципиально отличающихся друг от друга. Проведенный анализ показал, что поликонтактные соединения с натягом можно разделить на две большие группы (рис. 1).

В случае, если поликонтактное соединение с натягом состоит из нескольких деталей, имеющих смещенные на величину эксцентриситета внешнюю и внутреннюю поверхности, то предложенные ранее способы определения нагрузочной способности [5] требуют дальнейшего развития.

Анализ созданных ранее методик расчета нагрузочной способности соединений с натягом показал нецелесообразность их применения при расчете НДС и нагрузочной способности поликонтактных неравножестких соединений с натягом (ПКНС). Следовательно, возникает необходимость в создании новой методики расчета НДС и нагрузочной способности ПКНС.

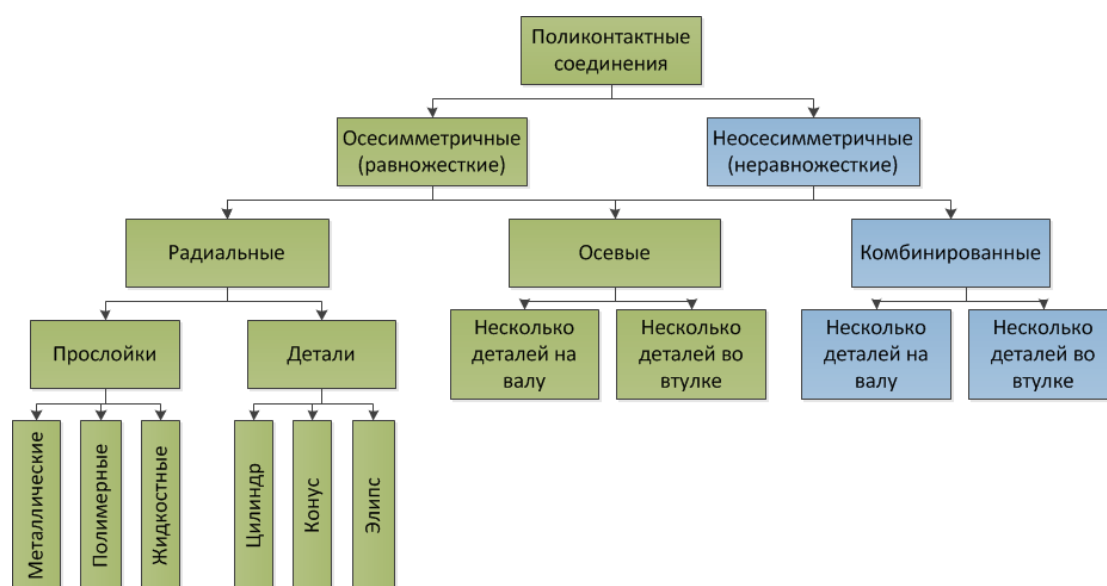


Рис. 1. Классификация поликонтактных соединений с натягом

Дальнейшие исследования ПКНС выявили ряд конструктивных особенностей исполнения данного вида соединений. ПКНС могут использоваться в нефтегазовом машиностроении в качестве основы для создания устройств перекоса, обеспечивающих требуемые взаимосвязанные смещения колонны направленного бурения в радиальном и угловом направлениях [1].

Проведенные исследования конструктивных особенностей ПКНС выявили возможность создания нескольких принципиально отличающихся друг от друга типов конструктивного исполнения соединения (рис. 2).

В зависимости от требуемой степени точности позиционирования в пространстве ПКНС могут состоять из двух, трех и более контуров (рис. 3) [2].

Также следует отметить, что на работоспособность и величину нагрузочной способности особое влияние оказывает способ сборки-разборки и позиционирования соединения в пространстве по радиальным координатам.

Проведенный анализ показал наличие нескольких способов, применяемых для разъединения соединений с натягом. На наш взгляд, наиболее актуальными для применения в ПКНС являются:

- гидравлический способ;
- термический способ.

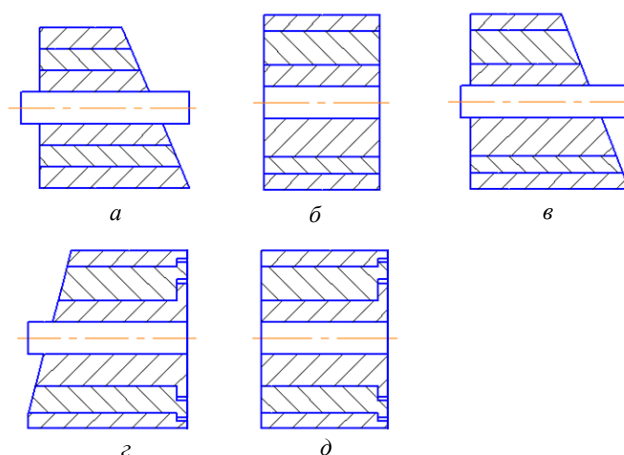


Рис. 2. Различные типы конструктивного исполнения поликонтактного неравножесткого соединения: а – неравножесткое по длине; б – неравножесткое по радиусу; в – комбинированное; г – комбинированное с осевыми упорами

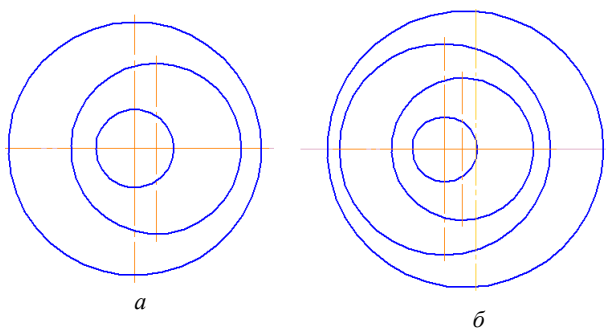


Рис. 3. ПКНС: а – двухконтурные; б – трехконтурные

Однако дальнейшие исследования показали, что каждый из представленных способов разъединения деталей ПКНС имеет как ряд преимуществ, так и недостатков.

При использовании гидравлического способа разъединения деталей ПКНС возникает необходимость введения масла под высоким давлением в рабочую зону контакта соединения, что приведет к гарантированному разъединению деталей.

Недостатками данного способа являются неравномерное распределение масляной прослойки в рабочей зоне контакта соединения, обусловленное неравножесткостью сопрягаемых деталей, а также необходимость точного расчета давления масла, подаваемого в зону контакта, позволяющего работать соединению в условиях упруго-пластических деформаций.

При использовании термического способа разъединения деталей ПКНС возникает необходимость в изготовлении деталей соединения из материалов, отличающихся друг от друга физико-механическими свойствами. При выборе материала для изготовления деталей соединения особое внимание обращается на коэффициент теплового расширения.

К недостаткам данного способа разъединения деталей ПКНС можно отнести неоднородность материала для изготовления всех частей соединения. Поэтому для достижения наилучшего эффекта (многократная разбираемость соединения) коэффициент теплового расширения охватываемой детали должен быть меньше коэффициента расширения охватываемой детали.

Проведенные исследования термических и гидравлических ПКНС с натягом доказали высокую эффективность использования подобных соединений в условиях работы, приближенных к критическим (высокие нагрузки, перепады температур и т. д.).

Однако дальнейший анализ работы ПКНС показал, что при длительной интенсивной эксплуатации соединения в критических условиях работы может происходить пластическая деформация одной из рабочих контактных поверхностей, что, в свою очередь, сильно снижает нагрузочную способность соединения.

Проведенный анализ изложенной выше проблемы позволил сделать выводы о необходимости разработки новых подходов к восстановлению нагрузочной способности термических и гидравлических

поликонтактных неравножестких соединений с натягом.

Перед началом восстановительных работ возникает необходимость в проведении качественного причинно-следственного анализа и выявления повреждений рабочих поверхностей и самих составных частей ПКНС. Для этого на первом этапе восстановительных работ осуществляется разборка соединения термическим способом. На втором этапе производится оценка нагрузочной способности соединения методом конечных элементов (МКЭ) с учетом требуемых геометрических изменений посадочных поверхностей. В случае, если нагрузочная способность, определенная МКЭ ранее, удовлетворяет заявленным требованиям, происходит замена детали, испорченной пластической деформацией, на новую. Четвертый этап заключается в восстановлении остальных рабочих поверхностей соединения шлифованием. Последний этап заключается в термической или гидравлической сборке соединения с натягом.

Дальнейшие исследования восстановленного ПКНС с натягом позволяют сделать выводы об изменении величины нагрузочной способности соединения по сравнению с предыдущим (ПКНС до восстановления).

Определение нагрузочной способности ПКНС после восстановления производится в соответствии с заданным расчетным алгоритмом [3].

В рассматриваемом нами случае в контакте сразу находится несколько неравножестких тел (рис. 3), следовательно, для определения нагрузочной способности ПКНС в осевом направлении необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \int_{l=0}^l \int_{\theta=0}^{\theta=360^\circ} P_{k1ij} \cdot f_{\text{тр}1ij} \cdot r_{1i} d\theta_i dz_j; \\ \int_{l=0}^l \int_{\theta=0}^{\theta=360^\circ} P_{k2ij} \cdot f_{\text{тр}2ij} \cdot r_{2i} d\theta_i dz_j; \\ \int_{l=0}^l \int_{\theta=0}^{\theta=360^\circ} P_{k3ij} \cdot f_{\text{тр}3ij} \cdot r_{3i} d\theta_i dz_j; \end{cases} \quad (1)$$

где P_k – контактное давление в i -й момент времени работы соединения; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; r_i – радиус деталей ПКНС в i -й момент времени работы соединения; l – длина сопрягаемых деталей; θ – угол относительного поворота сопрягаемых деталей.

Из рис. 4 видно, что значение радиуса деталей ПКНС r_i является переменной величиной и зависит от угла относительного поворота сопрягаемых деталей θ исследуемого соединения:

$$r_i = f(\theta). \quad (2)$$

Величина контактного давления ПКНС является величиной переменной и зависит от множества факторов: относительного угла поворота сопрягаемых деталей, величины натяга и длины сопрягаемых деталей.

$$P_k = f(r_i, \theta_i, N_i, l_i), \quad (3)$$

где r_i – радиус деталей ПКНС в i -й момент времени работы соединения; θ – угол относительного поворота сопрягаемых деталей; N_i – величина натяга; l_i – длина сопрягаемых деталей.

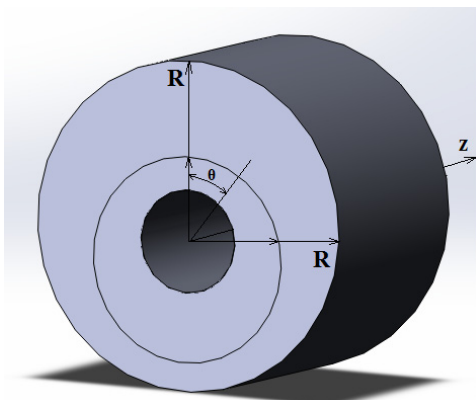


Рис. 4. Поликонтактное неравножесткое соединение

При решении системы уравнений (1) для каждой исследуемой зоны контакта ПКНС будут получены различные величины нагрузочной способности. Следовательно, определяющим нагрузочную способность всего соединения в целом будет являться наименьшее из полученных значений.

При разработке расчетного алгоритма нагрузочной способности ПКНС [3] было учтено все многообразие граничных условий и явлений при сборке и разборке, а также дальнейшей эксплуатации ПКНС.

Дальнейший проведенный анализ ПКНС позволяет предположить, что основными факторами, влияющими на величину нагрузочной способности соединения, являются:

- геометрия сопрягаемых деталей;
- относительный угол поворота сопрягаемых деталей;
- длина сопрягаемых деталей;
- физико-механические свойства материалов;
- величина натяга;
- НДС сопрягаемых деталей;
- конструктивные особенности соединения;

– способы формирования и обеспечения относительного смещения деталей соединения.

Переменные по радиусу жесткостные характеристики сопрягаемых деталей не позволяют достичь требуемой точности расчетов НДС и нагрузочной способности классическими методами [6]. Применение современных концепций математического моделирования [8] обеспечит возможность рассмотрения подобных соединений как контактных задач с переменными граничными условиями, обусловленными физикой взаимодействия сопрягаемых поверхностей и жидкостных прослоек высокого давления.

Следовательно, при разработке математической модели ПКНС были учтены граничные условия, обусловленные технологией сборки-разборки, параметрами рабочей жидкости, конструкцией и размерами соединения.

Библиографические ссылки

1. Патент № 111878 Управляемый механизм перекося / Чухланцев Е. С., Щенятский А. В. (РФ) – 2011.
2. Чухланцев Е. С., Щенятский А. В. Анализ конструкций эксцентриковых механизмов и существующих методов расчета их нагрузочной способности // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2011. – № 2. – С. 188–193.
3. Shchenyatsky, A. V., Chukhlantsev, E. S. Calculation of load capacity of poly contact of rigid joints unevenly // Strojárstvo/Strojrenství. – 2012. – Vol. 3. – URL: <http://www.engineering.sk/index.php/english/613-calculation-of-load-capacity-of-poly-contact-of-rigid-joints-unevenly> (дата обращения: 15.11.2012).
4. Абрамов И. В., Фаттиев Ф. Ф. и др. Высоконапряженные соединения с гарантированным натягом. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2002. – 300 с.
5. Кулиш Е. В., Турыгин Ю. В. Методика расчета прессовых полисоединений // Вестн. машиностроения. – 2007. – № 9. – С. 9–11.
6. Кулиш Е. В. Напряженно-деформированное состояние и нагрузочная способность прессовых полисоединений : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06. – Ижевск, 2009. – 142 с.
7. Щенятский А. В. Напряженно-деформированное состояние и нагрузочная способность многослойных соединений с натягом : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06. – Ижевск, 1993. – 171 с.
8. Щенятский А. В. Теория и технология гидропрессовых соединений с натягом : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.02, 05.02.08. – Ижевск, 2003. – 357 с.

A. V. Shchenyatsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
E. S. Chukhlantsev, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Multiple-contact uneven stiffness interference joints and analysis of their load-carrying capacity

Different types of joints with interference are considered. New types of such joints are revealed. Their classification is performed. Prospective directions of their load-carrying capacity analysis are determined.

Keywords: interference joints, load-carrying capacity, multiple-contact uneven stiffness interference joints

Получено: 02.11.12