

УДК 62-762:539.37

Е. В. Кулиш, аспирант

Ижевский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕССОВЫХ ПОЛИСОЕДИНЕНИЙ СО СПЛОШНОЙ И РАЗРЕЗНОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ВТУЛКОЙ

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследований напряженно-деформированного состояния и нагрузочной способности прессовых полисоединений. Разработанная методика расчета на основе аналитических и численных методов решения позволила построить эпюры средних напряжений в моделях полисоединения со сплошной и разрезной втулкой. Методика проверена в рамках экспериментального исследования.

В конструкциях современных машин и механизмов обширное применение получили соединения с гарантированным натягом благодаря возможности восприятия и передачи произвольно направленных высоких по величине нагрузок. Особый класс соединений с гарантированным натягом составляют многоконтактные прессовые соединения – полисоединения (ППС), имеющие минимум три детали в контакте. Такой тип соединений с натягом имеет широкое распространение в машиностроении ввиду ряда существенных преимуществ. Однако широкому применению прессовых полисоединений препятствует отсутствие доступных методик расчета их напряженно-деформированного состояния (НДС) и нагрузочной способности (НС).

К исследованию принята модель полисоединения, представленная на рис. 1, образованная радиальной посадкой с натягом трех стальных деталей (с промежуточной сплошной или разрезной втулкой). Особенностью решаемой многоконтактной задачи полисоединения является то, что в контакте одновременно находится несколько деформируемых тел.

Разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния и соответствующей ему нагрузочной способности прессовых полисоединений на основе проведенного исследования позволяет повышать эффективность конструкций полисоединений и имеет существенное значение для машиностроения, что предполагает проведение комплексного теоретического и экспериментального исследований прессовых полисоединений в зависимости от конструктивных параметров. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- исследование напряженно-деформированного состояния деталей прессовых полисоединений на основе решения многоконтактной задачи [1];
- разработка методики расчета прессовых полисоединений [2; 3];
- экспериментальная проверка разработанных теоретических методов расчета [4–6];
- моделирование технологического процесса сборки-разборки ППС [7].

Разработанные методики расчета реализованы в определении напряженно-деформированного состояния образцов прессовых полисоединений со сплошной и промежуточной втулкой. Для конечно-элементного расчета ППС со сплошной промежуточной втулкой принята осесимметричная модель с трехузловыми элемен-

тами, а для ППС с разрезной промежуточной втулкой – объемная модель с десяти-узловыми элементами. Геометрические модели позволяют имитировать фаски деталей и центрирующие отверстия вала, соответствующие образцам, принятым в натурном эксперименте. Для образца с разрезной промежуточной втулкой ширина зазора принята равной 3 мм. В табл. 1 представлены исходные данные для расчета. Все детали имеют одинаковые физико-механические свойства материала: коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па. Радиальные натяги в посадках составляют $N_1 = 0,05$ мм и $N_1 = 0,1$ мм. Угол конусной посадки $\alpha = 0,05^\circ$.

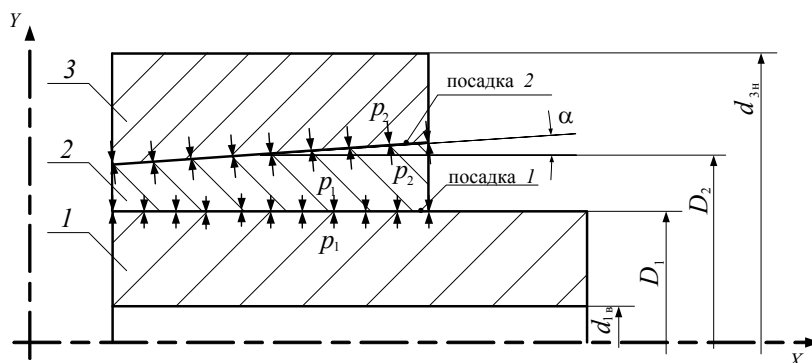


Рис. 1. Схема многоконтактного соединения с промежуточной втулкой (полисоединения):

1 – охватываемая деталь (вал); 2 – промежуточная деталь (втулка);
3 – охватывающая деталь (ступица); D_1 – диаметр посадки 1;
 D_2 – средний диаметр посадки 2; $d_{1в}$ – внутренний диаметр охватываемой детали;
 $d_{3н}$ – наружный диаметр охватывающей детали; α – угол конусной посадки;
 p_1, p_2 – контактные давления соответствующих посадок

Условие сборки полисоединения: на первом этапе – запрессовка соединения «вал–втулка» по цилиндрической посадке; на втором этапе – запрессовка сборки «вал–втулка» со ступицей по конической посадке. По итогам расчета определены контактные давления в двух посадках полисоединения и параметры напряженно-деформированного состояния деталей (радиальные и тангенциальные напряжения).

Таблица 1. Исходные данные для моделирования прессового полисоединения

№ детали	Внутренний диаметр, мм	Наружный диаметр, мм	Длина, мм
1	$d_{1в} = 0$	$d_{1н} = 28,05$	$l_1 = 50$
2	$d_{2в} = 28$	$d_{2н} = 36/50$	$l_2 = 35$
3	$d_{3в} = 36/50$	$d_{3н} = 65$	$l_3 = 30$

В табл. 2 представлены данные для средних значений контактных давлений в зависимости от диаметра посадки «втулка–ступица» в сборке. На рис. 2, а и б показаны примеры построения полей эквивалентных напряжений с использованием возможностей аппарата метода конечных элементов (МКЭ).

Таблица 2. Средние значения контактных давлений p_k , МПа

№ посадки	Модель и методика расчета				
	полисоединения на основе формул Лямэ	посадок соединений с натягом на основе формул Лямэ	полисоединения на основе осесимметричной модели МКЭ	посадок соединений с натягом на основе осесимметричной модели МКЭ	полисоединения с разрезной втулкой на основе объемной модели МКЭ
	$D_1 = 36$ мм				
1	$p_{k1} = 215$	$p_{k1} = 71$	$p_{k1} = 195$	$p_{k1} = 65$	$p_{k1} = 70$
2	$p_{k2} = 133$	$p_{k2} = 95$	$p_{k2} = 125$	$p_{k2} = 89$	$p_{k2} = 80$
	$D_1 = 50$ мм				
1	$p_{k1} = 226$	$p_{k1} = 128$	$p_{k1} = 210$	$p_{k1} = 115$	$p_{k1} = 110$
2	$p_{k2} = 97$	$p_{k2} = 75$	$p_{k2} = 90$	$p_{k2} = 70$	$p_{k2} = 85$

В соответствии с данными, представленными в табл. 2, делаем вывод, что в полисоединении с промежуточной сплошной втулкой имеет место мультиплицирование и перераспределение значений контактных давлений. На примере модели посадки 1 с диаметром посадки $D_1 = 36$ мм установлено, что в одной посадке с меньшим начальным натягом значение контактного давления может оказаться выше, чем в другой посадке с большим начальным натягом, при условии, если жесткость деталей, образующих посадку 1, окажется выше жесткости деталей, образующих посадку 2.

Данные для объемной модели указывают на то, что значения контактных давлений в посадках соответствуют начальным величинам для двух различных соединений, где разрезная промежуточная втулка не является элементом, влекущим мультиплицирование значений давлений, однако происходит незначительное перераспределение значений в сторону выравнивания.

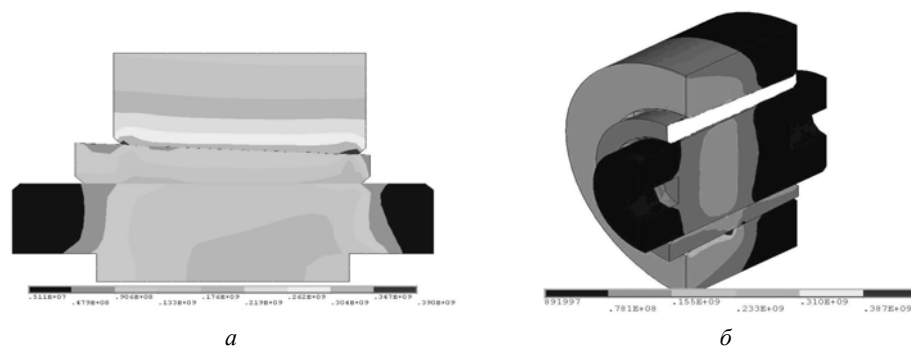


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в полисоединении (расчет МКЭ), МПа:
а – со сплошной втулкой; б – разрезной втулкой

На рис. 3, а и б представлены эпюры средних напряжений для осесимметричных моделей полисоединения со сплошной промежуточной втулкой, полученные по методикам расчета на основе аналитических зависимостей и метода конечных элементов. Расхождение результатов для приближенной модели, рассчитанной по

аналитическим зависимостям и для модели со сложной геометрией, рассчитанной МКЭ, составило 7 % в абсолютном выражении. Конечно-элементная модель указывает на равномерное распределение контактных давлений вдоль посадок и существенную разницу средних значений в посадках 1 и 2, обусловленную различными величинами жесткостей деталей, образующих посадки.

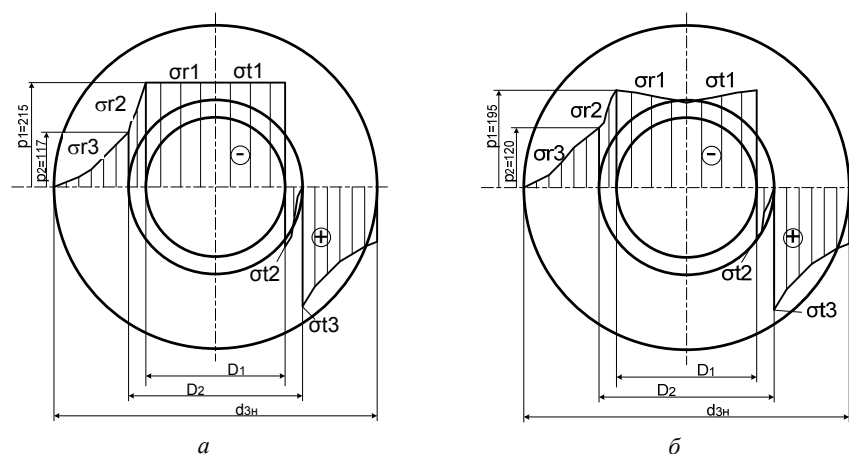


Рис. 3. Эпюры средних напряжений в деталях полисоединения со сплошной втулкой:
а – аналитический расчет; б – расчет МКЭ

На рис. 4, а и б представлены эпюры напряжений в сечении с наибольшей окружающей податливостью промежуточной разрезной втулки (максимальные значения) и средних напряжений, рассчитанных для фронтального к разрезу сечения полисоединения. Выявлено, что в полисоединении с разрезной втулкой распределение напряжений в деталях, а соответственно контактных давлений вдоль посадок, характеризуется неравномерностью, обуславливающей низкую надежность конструкции при высоких нагрузках.

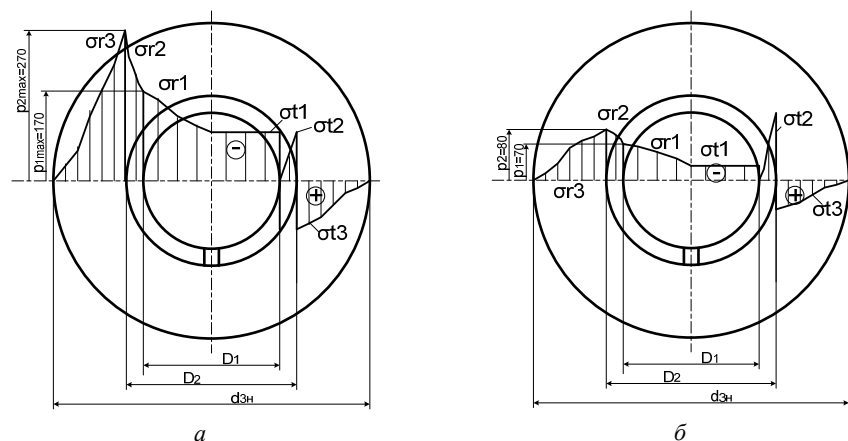


Рис. 4. Эпюры напряжений в деталях полисоединения с разрезной втулкой (расчет МКЭ):
а – максимальные; б – средние

Результаты теоретических исследований прессовых полисоединений подтверждены в рамках натурных испытаний. Выполнено две серии эксперимента для полисоединения с промежуточной сплошной и разрезной втулкой, которые позволяли оценить влияние конструктивных параметров на нагрузочную способность (сопротивление осевому сдвигу) полисоединения, собранного методом продольной запрессовки. Для рациональной организации эксперимента выполнено его планирование. В табл. 3 и 4 представлены матрицы планирования серий эксперимента.

Таблица 3. Матрица планирования серии дробно-факторного эксперимента со сплошной втулкой

№ опыта	X_0	$X_1 (N_1, \text{мкм})$	$X_2 (N_2, \text{мкм})$	$X_3 (D_2, \text{мм})$	$X_4 (d_3, \text{мм})$	Y
1	+	-(25)	-(40)	-(36)	-(65)	
2	+	+(50)	-(40)	-(36)	+(80)	
3	+	-(25)	+(100)	-(36)	+(80)	
4	+	+(50)	+(100)	-(36)	-(65)	
5	+	-(25)	-(40)	+(50)	+(80)	
6	+	+(50)	-(40)	+(50)	-(65)	
7	+	-(25)	+(100)	+(50)	-(65)	
8	+	+(50)	+(100)	+(50)	+(80)	

Таблица 4. Матрица планирования серии полнофакторного эксперимента с разрезной втулкой

№ опыта	X_0	$X_1 (N_2, \text{мкм})$	$X_2 (D_2, \text{мм})$	Y
1	+	-(100)	-(36)	
2	+	-(100)	+(50)	
3	+	+(200)	-(36)	
4	+	+(200)	+(50)	

Для эксперимента с полисоединением со сплошной втулкой (табл. 3) имеем четыре варьируемых фактора (относительные величины к диаметру посадки «вал–втулка»): натяг в посадке «вал–втулка» $\frac{N_1}{D_1} \rightarrow X_1$, натяг в посадке «втулка–ступица» $\frac{N_2}{D_1} \rightarrow X_2$, диаметр посадки «втулка–ступица» $\frac{D_2}{D_1} \rightarrow X_3$, наружный диаметр ступицы $\frac{d_{3н}}{D_1} \rightarrow X_4$. Для эксперимента с разрезной втулкой (табл. 4) $\frac{N_2}{D_1} \rightarrow X_1$, $\frac{D_2}{D_1} \rightarrow X_2$.

Контактные давления в рамках натурального эксперимента определялись косвенно через измеренные усилия распрессовки P_{dis1} посадки «вал–втулка» по формуле

$$p_k = P_{dis1} / \pi D_1 l_2 f_{dis}, \quad (1)$$

где f_{dis} – коэффициент трения в посадке, принятый равным 0,15. Контактные давления в рамках вычислительных экспериментов со сплошной втулкой получены по

разработанным методикам расчета, основанным на аналитических зависимостях и методе конечных элементов, для разрезной втулки – только на основе метода конечных элементов. На рис. 5 представлены диаграммы сравнения контактных давлений в полисоединении в соответствии с матрицами планирования (табл. 6 и 7).

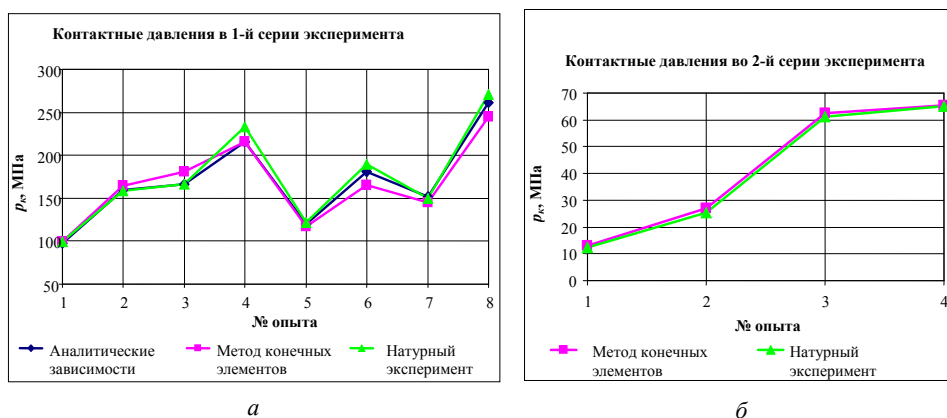


Рис. 5. Контактные давления в полисоединении:
а – серия со сплошной втулкой; б – серия с разрезной втулкой

По результатам обработки данных серии натурального эксперимента со сплошной втулкой (для 5%-го уровня значимости однородность дисперсий по критерию Кохрена $G_{\text{таб}}(f_1=8, f_2=1)=0,68 > G_p=0,65$; значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента: $t_0=120,7$, $t_1=26,8$, $t_2=22,4$, $t_3=5,1$, $t_4=5,0$ при $t_{\text{кр}}(f=2)=4,3$; адекватность уравнения по критерию Фишера $F_{\text{кр}}(f_1=3; f_2=8)=4,1 > F_p=1,1$. Запишем математическую модель в натуральных координатах:

$$p_k = 830,0 - 584666,6 \frac{N_1}{D_1} + 3066,0 \frac{N_2}{D_1} + 27,1 \frac{d_{2н}}{D_1} - 320,3 \frac{d_{3н}}{D_1} + 254441,9 \frac{N_1}{D_1} \frac{d_{3н}}{D_1}. \quad (2)$$

Аналогично для серии эксперимента с разрезной втулкой: для 5%-го уровня значимости $G_{\text{таб}}(4,1)=0,91 > G_p=0,52$; $t_0=80,7$, $t_1=42,3$, $t_2=8,2$ при $t_{\text{кр}}(2)=4,3$; $F_{\text{кр}}(1;4)=7,7 > F_p=7,0$:

$$p_k = -95,0 + 21167,8 \frac{N_2}{D_1} + 46,6 \frac{d_{2н}}{D_1} - 5820,1 \frac{N_2}{D_1} \frac{d_{2н}}{D_1}. \quad (3)$$

Определена погрешность значений параметра оптимизации, полученных на основе методики расчета полисоединений относительно экспериментальных данных. Для эксперимента со сплошной промежуточной втулкой погрешность составила 6 % для методики на основе зависимостей Лямэ–Гадолина и 12 % – для МКЭ. Для эксперимента с разрезной втулкой погрешность МКЭ составила 8 %. Полученные погрешности указывают на приемлемую точность разработанной методики расчета. Подтверждено взаимное влияние посадочных зон и перераспределение контактных давлений в полисоединении.

Математическая модель процесса сборки-разборки прессового полисоединения построена на основе методики расчета с применением аппарата метода конечных элементов. Модель позволяет производить построение эпюр параметров НДС в режиме реального времени и моделей графиков запрессовки-распрессовки. Выполнено моделирование сборки-разборки и сравнение с оригиналом для одного из комплектов полисоединений, принятого в экспериментальном исследовании (рис. 6).

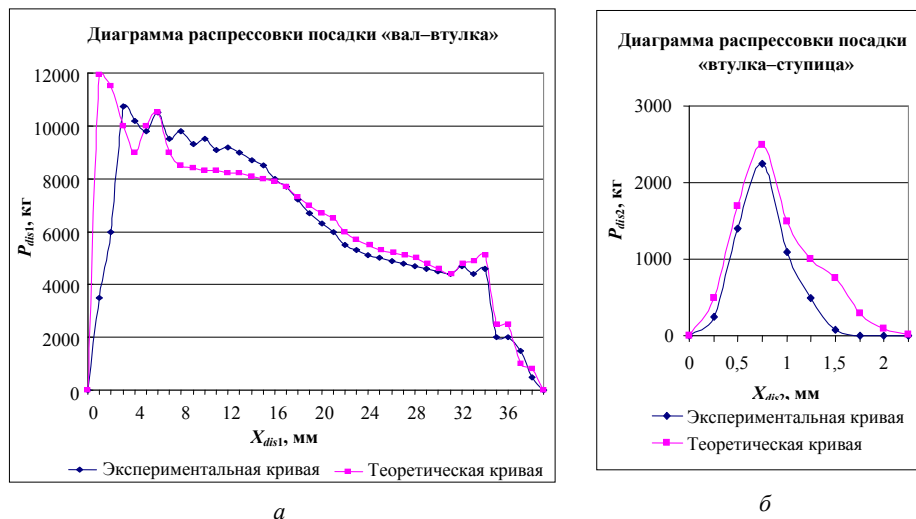


Рис. 6. Графики распрессовки образца полисоединения: а – посадка 1; б – посадка 2

В соответствии с графиками распрессовки расхождение средних значений для теоретических и экспериментальных данных составило: для посадки 1 – 12 %; для посадки 2 – 10 %.

Список литературы

1. Kulish E. V. Numerical-analytical Methods in Perfection of Assembly Technique of Joints in Main Machines Units / E. V. Kulish, M. M. Abashev, A. V. Ivannikova, A. V. Schenyatskiy. – Budapest : Pollack Periodica. – 2006. – Vol. 1. – № 2. – P. 71–82.
2. Кулиш, Е. В. Методика расчета прессовых полисоединений / Е. В. Кулиш, Ю. В. Турыгин // Вестник машиностроения. – 2007. – № 9. – С. 9–11.
3. Кулиш, Е. В. Решение контактной задачи прессовых полисоединений / Е. В. Кулиш, Ю. В. Турыгин, Д. Мага // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2008. – № 1. – С. 33–41.
4. Кулиш, Е. В. Методика экспериментального исследования нагрузочной способности прессовых полисоединений. // Автоматизация и прогрессивные технологии : сб. тр. V межотрасл. науч.-техн. конф. Т. 1. – Новоуральск : Изд-во НГТИ, 2007. – С. 136–139.
5. Kulish, E. System of full-scale study for press-fit polyjoints. 2-nd International Scientific Conference on Special Technology «Special Technology – 2008». – Bratislava, 2008. – P. 173–176.
6. Кулиш, Е. В. Планирование эксперимента исследования прессовых полисоединений: тр. I науч.-иссл. конф. студентов, магистрантов, аспирантов факультета «Управление качеством» ИжГТУ. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2008. – С. 49–53.
7. Kulish, E. Load capacity and mode of deformation of press fit polyjoints / E. Kulish, Y. Turygin : 11-th International Symposium on Mechatronics «Mechatronika-2008» (Trencianske Teplice). – Slovakia, 2008. – P. 41–44.