

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДЕТАЛЕЙ

В.Б. Буланов, И.Е. Семенов-Ежов, А.А. Ширшов

Приведен краткий обзор экспериментальных и теоретических работ о концентрации напряжений в прессовых соединениях. Выполнен анализ работ, в которых решены задачи о запрессовке шайб, дисков и штифтов в пластины различного очертания, из материалов с одинаковыми и различными упругими свойствами с учетом и без учета шероховатости поверхностей. Также рассмотрены задачи о влиянии внешней нагрузки на концентрацию напряжений в болтовом соединении с радиальным натягом.

Ключевые слова: концентрация напряжений, коэффициент концентрации, натяг, прессовое соединение, контактное давление.

Введение

Обеспечение прочности и надежности конструкций при рациональном использовании материалов является одной из важнейших проблем машиностроения. Для выполнения условий прочности различных деталей машин конструктор должен иметь исчерпывающую информацию об ожидаемом поведении материала и конструкции в реальных условиях эксплуатации. Важной информацией являются данные о концентрации напряжений, формирующие расчетные максимальные напряжения в опасных сечениях деталей машин. Публикация новых справочных данных по концентрации напряжений позволит более широко использовать их для оценки прочности и обеспечения надежности как при создании новых, так и при модернизации действующих машин.

Накопленный к середине прошлого века материал по концентрации напряжений в деталях машин был обобщен в фундаментальных работах Савина Г.Н. [1] и Петерсона Р. [2]. В последующие годы было опубликовано много исследований о концентрации напряжений, полученных как экспериментальным, так и расчетным путем. В различной справочной литературе приведены данные о коэффициентах концентрации напряжений, например [3-6].

Цель работы заключается в составлении краткого обзора и систематизации сведений о концентрации напряжений в прессовых соединениях деталей различного назначения.

Соединения деталей с натягом

На практике при расчете соединений с натягом в первом приближении применяются зависимости, основанные на решении Ламе [4]. Эксперименты показывают, что при одинаковой длине сопрягаемых деталей на торцах соединения наблюдается некоторое снижение контактных напряжений по сравнению с расчетными. Если длина охватывающей детали (втулки, шестерни) меньше длины вала, то на торцах детали возникает концентрация напряжений [6].

Для оценки эффекта концентрации напряжений используют, как правило, теоретический коэффициент концентрации напряжений (ККН)

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{e, \max}}{\sigma_n}, \quad (1)$$

где $\sigma_{e, \max}$ – максимальное эквивалентное напряжение в зоне концентрации; σ_n – номинальное напряжение.

В прессовых соединениях за номинальное напряжение часто принимают контактное давление p_k , которое связано с относительным радиальным натягом Δ известным выражением [5]

$$p_k = \Delta \cdot E_2 / \left[\frac{E_2}{E_1} \left(\frac{1 + \alpha_1^2}{1 - \alpha_1^2} - \nu_1 \right) + \frac{1 + \alpha_2^2}{1 - \alpha_2^2} + \nu_2 \right], \quad (2)$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; α_1 и α_2 – отношения внутреннего радиуса детали к наружному; индекс 1 относится к охватываемой детали, а индекс 2 – к охватывающей (пластине).

Для частных случаев прессовых соединений выражение (2) упрощается. Так, при запрессовке сплошного диска в пластину из того же материала ($E_1 = E_2 = E$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = \alpha$, $\nu_1 = \nu_2 = \nu$), получим

$$p_k = \Delta \cdot E \cdot (1 - \alpha^2) / 2, \quad (3)$$

а при запрессовке сплошного металлического диска в пластину с малым отверстием из полимерного материала ($E_1 \gg E_2$, $\alpha_2 = \alpha < 0,1$)

$$p_k = \Delta \cdot E_2 / (1 + \nu_2). \quad (4)$$

Контактное давление согласно (2) зависит от упругих постоянных элементов соединения. Поскольку коэффициент Пуассона мало отличается у различных материалов (сталь $\nu \approx 0,25$, полимеры и алюминиевые сплавы $\nu \approx 0,35$), на величину p_k в наибольшей степени влияет отношение модулей упругости E_1 и E_2 . В качестве примера, иллюстрирующего это влияние, на рис. 1 приведены графики зависимости ККН от параметра $\alpha = a/b$ при постановке с натягом сплошного диска в круглую пластину, построенные по результатам работы [7]. Максимальное эквивалентное напряжение действует в ослабленном сечении (точка В, рис. 1), а максимальное контактное давление – на продольной оси пластины. За номинальное напря-

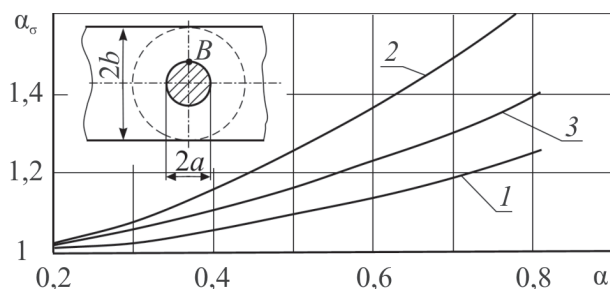


Рис. 1. Влияние жесткости сопрягаемых деталей на ККН кривая 1 соответствует $E_1 \gg E_2$, кривая 2 – $E_1 = E_2$, кривая 3 – $E_2 / E_1 = 0,3$

жение принято контактное давление, определяемое по формуле (2). Кривые 1 и 2 являются предельными для соединений, встречающихся в инженерной практике.

В работах [8–10] приведены результаты аналитических решений для некоторых частных случаев прессовых соединений. В работе [8] дано решение для полубесконечной пластины, в которую запрессована круглая шайба. В работе [9] помимо расчета некоторых типов прессовых соединений обсуждаются факторы, влияющие на точность получения аналитических результатов, а именно: свойства материала, технология сборки, характер приложения нагрузки, наличие микронеровностей и др. Частные случаи решения задачи о запрессовке круглых дисков в пластины из одинаковых материалов приведены в [10, 11].

В работе [12] приведено решение задачи о запрессовке сплошного диска в пластину со сложным контуром, описываемым уравнением улитки Паскаля. На рисунке 2 показано распределение относительных напряжений $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / p_k$ и $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / p_k$ в опасном сечении. За номинальное напряжение принято контактное давление p_k , определяемое выражением (3) при посадке жесткого диска в кольцо ($\alpha = 0,56$).

Решение получено аналитически с использованием теории функций комплексного переменного и конформных преобразований по методу, разработанному Г.В. Колосовым и Н.И. Мусхелишвили. Наиболее опасными ока-

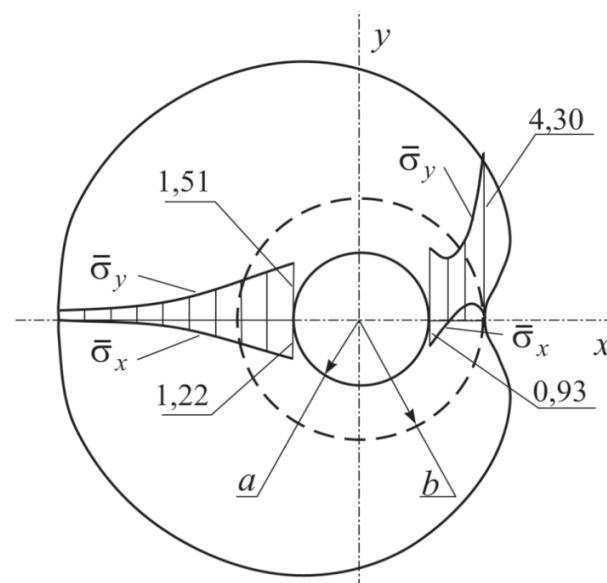


Рис. 2. Распределение относительных напряжений в опасном сечении пластины сложной формы при запрессовке в нее абсолютно жесткого диска

зались точки наружного контура, в которых имеет место одноосное напряженное состояние, и $\alpha_c = 4,30$.

Расчету соединений с натягом, элементы которых выполнены из различных материалов, посвящены работы Игнашова И.А. [13–15] и др. Однако данные о концентрации напряжений, приведенные в работах [8–15], являются весьма неполными, в частности, не исследовано влияние геометрических параметров элементов соединений.

При исследовании концентрации напряжений в прессовых соединениях поляризационно-оптическим методом возникают трудности при определении действительного натяга в полимерных моделях. В них помимо факторов, влияющих на точность измерений, отмеченных в [9], следует учитывать также релаксацию напряжений. Методика исключения погрешностей при определении напряжений в прессовом соединении полимерных моделей, возникающих вследствие ползучести, приведена в [16].

В работе [17] приведена номограмма и дано ее подробное описание для определения максимального окружного напряжения σ_ϕ , возникающего в пластинах при запрессовке в них дисков и колец в зависимости от геометрических параметров, модулей упругости и относительного натяга. В [18–20] приведены результаты исследования концентрации напряжений при запрессовке сплошных дисков у края полуплоскости, в углу прямоугольной пластины, в проушины кронштейнов, а также в кольцевые пластины.

Эпюры относительных эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_e$, определенных по критерию наибольших касательных напряжений, на поверхности по дуге контакта в пластине, у края которой запрессован жесткий диск ($\alpha = a/b = 0,67$), показаны на рис. 3 [18].

Контактное давление p_k вычисляли по формуле (2) при $E_2/E_1 = 0$ и $\alpha_2 = 0$. Максимальное значение эквивалентного напряжения получается в точке C , контактного давления – в точке A . На наружном контуре пластины напряженное состояние – одноосное, т.е. $\bar{\sigma}_e = \bar{\sigma}_x$. При $\alpha > 0,6$ эквивалентные напряжения в точке M становятся больше значения $\bar{\sigma}_e$ в точке C . В работе [8] приведено решение для аналогичного соединения, элементы которых выполнены из одинаковых материалов.

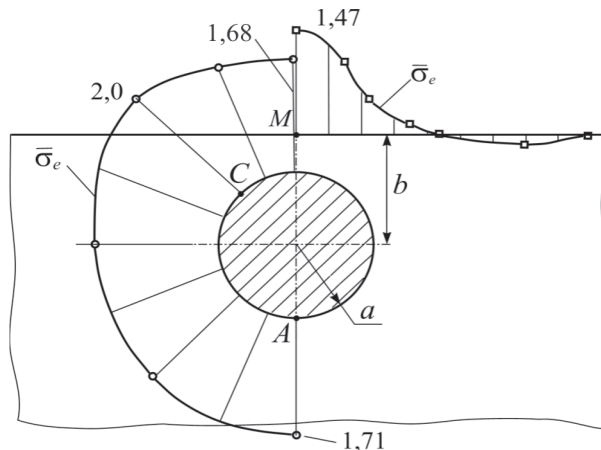


Рис. 3. Распределение относительных эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_e = \sigma_e / p_k$ на поверхности пластины и по дуге контакта ($\alpha = 0,67$)

Результаты экспериментального исследования концентрации напряжений при запрессовке двух дисков в широкую полосу приведены в работах [7, 17].

При исследовании соединений с натягом в трехмерной постановке использовали как теоретические методы – аналитические и численные, в основном с использованием метода конечных элементов (МКЭ), так и экспериментальный метод фотоупругости. В работе [21] на основе уравнений теории упругости решена задача о запрессовке втулки в отверстие корпуса. В [22] рассмотрена посадка жесткого бандажа на вал, а в [23] получены результаты для более общего случая прессового соединения двух толстостенных оболочек с учетом шероховатости поверхностей. В работе приведена эпюра контактного давления, которая позволяет определить коэффициент концентрации напряжений около торцов наружной оболочки при различной длине соединяемых деталей.

Наиболее полно задача о посадке втулки на сплошной вал рассмотрена в [5]. Приведены эпюры контактных давлений и значения ККН для различных форм втулок и их положения на валу. Там же показано влияние фаски на величину максимальных напряжений. Работа [24] посвящена анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) при внедрении жесткого диска (дорна) в массивный цилиндр.

Одна из первых методик исследования посадочных напряжений в объемных деталях с применением метода «замораживания» приведена в [25, 26]. Однако в [27] отмечается, что способ горячей посадки неприменим для моде-

В работах [24, 30] получены данные о концентрации напряжений в массивном цилиндре при запрессовке в него дисков и болтов с использованием метода оптически чувствительных вклеек, свободного от недостатков, свойственных методу «замораживания». В [24] проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами расчета методом конечных элементов.

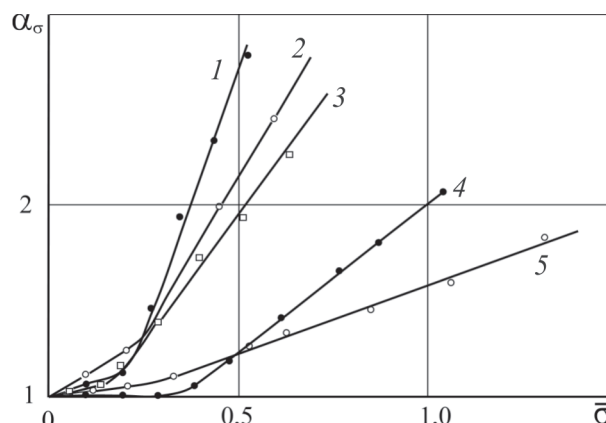
При нагружении соединения с радиальным натягом внешней нагрузкой происходит изменение контактного давления вплоть до образования зазоров. Примеры способов приложения внешней нагрузки к соединению показаны на рис. 4.

На рисунке 5 изображены графики изменения α_s на поверхности контакта широкой пластины с запрессованным штифтом в зависимости от относительного напряжения $\bar{\sigma} = \sigma/p_k$, являющегося внешней нагрузкой, для пяти вариантов. Эквивалентное напряжение определено по критерию максимальных касательных напряжений; за номинальное напряжение принято эквивалентное напряжение в пластине, возникающее только при действии натяга. В этом случае для широкой полосы принято $\sigma_{en} = 2p_k$, где p_k определяется по формуле (4). Номера около кривых соответствуют схемам приложе-

В [31] впервые отмечено влияние трения на контактной поверхности на точность определения $F_{\text{пр}}$.

Предельная нагрузка в низкосдвиговом од-
норядном и двухрядном болтовых соединени-
ях оказалась практически равной значению $F_{пр}$
для пластины с одиночным отверстием [32].

Рис. 4. Варианты нагружения модели соединения с радиальным натягом при определении предельной нагрузки



56

ционно-оптическим методом приведены в [34], численно МКЭ – в [35].

Заключение

Приведенные в кратком обзоре работы являются дополнением к классическим обзорам опубликованным ранее. Повышению их достоверности и практической ценности способствовало во многих случаях использование различных методов исследования – аналитических, численных и экспериментальных.

Список литературы

1. Савин Г.Н., Тульчий В.Н. Справочник по концентрации напряжений. – Киев: Вища школа. 1976. – 410 с.
2. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир. 1977. – 302 с.
3. Кагаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. – М.: Машиностроение. 1985. – 224 с.
4. Иосилевич Г.Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин. – М.: Машиностроение. 1981. – 223 с.
5. Иосилевич Г.Б. Детали машин. – М.: Машиностроение. 1988. – 367 с.
6. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение. 1993. – 640 с.
7. Stresses due to interference-fit Pins and bushes in plats, strips or lungs // Engineering Sciences Data Unit. 1971. 8 p.
8. Тарабасов Н.Д. Расчет напряженных посадок в машиностроении. – М.: Машгиз, 1961. – 364 с.
9. Тарабасов Н.Д. Новый прием решения задач прессовых соединений // Расчеты на прочность. 1969. Вып. 14. С. 63–75.
10. Антипин П.К. Определение напряжений от посадки круглых дисков в пластину с криволинейным контуром // Расчеты на прочность и жесткость устойчивость и колебания. 1965. С. 43–47.
11. Крюкова Н.М. Об одной плоской задаче теории упругости для изотропной кусочно-однородной среды // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1966. № 5. С. 43–51.
12. Угодчиков А.Г. О расчете посадочных напряжений в некоторых типах прессовых соединений // Труды Горьковского инж.-строит. института. Вып. 25. 1956. С. 28–43.
13. Игнашов И.А. Напряженное состояние квадратной пластины с запрессованной круглой шайбой из другого материала // Изв. вузов. Машиностроение. 1969. № 9. С. 49–53.
14. Игнашов И.А. Напряженное состояние пластинки, ограниченной кривой частного вида, с несколькими запрессованными в нее круглыми шайбами из другого материала // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1971. № 1. С. 86–89.
15. Игнашов И.А. Напряженное состояние в круглой пластинке с несколькими запрессованными в нее круглыми шайбами из другого материала // Упругость и неупругость. Сб. трудов МГУ. Вып. 2. 1971. С. 74–82.
16. Семенов-Ежов И.Е. Моделирование контактных напряжений в прессовых соединениях // Изв. вузов. Машиностроение. 1979. № 5. С. 20–24.
17. Семенов-Ежов И.Е. Концентрация напряжений в соединениях с натягом // Справочник. Инженерный журнал. 2000. № 4. С. 21–25.
18. Семенов-Ежов И.Е. Контактные напряжения в пластинах при запрессовке в них сплошных дисков // Изв. вузов. Машиностроение. 1980. № 1. С. 8–10.
19. Семенов-Ежов И.Е. Контактные напряжения в прессовых соединениях // Расчеты на прочность. 1981. Вып. 22. С. 65–71.
20. Семенов-Ежов И.Е., Саков В.А., Старшинин В.И. Контактные напряжения в дисках с отверстиями при запрессовке в них круглых шайб // Изв. вузов. Машиностроение. 1988. № 11. С. 3–5.
21. Старшинин В.И., Сухова Н.А. Запрессовка втулки в отверстие корпуса // Изв. вузов. Машиностроение. 1976. № 7. С. 9–19.
22. Бабешко В.А., Калиничук В.В. О взаимодействии жесткого бандаж с упругим цилиндром // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1973. № 3. С. 165–167.
23. Хворостухин Л.А., Шишкин С.В. Об осесимметричном контакте двух толстостенных оболочек с учетом шероховатости посадочных поверхностей // Изв. вузов. Машиностроение. 1980. № 2. С. 5–11.
24. Семенов-Ежов И.Е., Старшинин В.И. Напряженно деформированное состояние упругого цилиндра при посадке в него с натягом жесткого диска // Расчеты на прочность. 1986. Вып. 27. С. 52–56.
25. Сурков А.И., Монахов-Ильин Г.П. Исследование напряжений в деталях, соединенных посадкой с натягом с применением замораживания // Заводская лаборатория. 1967. № 6. С. 755–756.

26. Сурков А.И., Монахов-Ильин Г.П. Моделирование деталей, соединенных посадкой с натягом // Труды ВНИИМетмаша. 1972. № 31. С. 120–123.
27. Mather J., Baines B.H. A three dimensional investigation of shrink fit stress distribution // Strain. 1970. No 3. P. 105–108.
28. Семенов-Ежов И.Е., Шишов А.А. Неуставившаяся ползучесть в диске из вязкоупругого материала // Изв. вузов. Машиностроение. 1974. № 6. С. 28–31.
29. Семенов-Ежов И.Е., Старишин В.И. О применении различных расчетных и экспериментальных методик к решению осесимметричной задачи теории упругости материала // Изв. вузов. Машиностроение. 1971. № 1. С. 13–16.
30. Дунаев В.В. Семенов-Ежов И.Е., Шишов А.А. Экспериментальное исследование концентрации напряжений при постановке болтов с натягом // Расчеты на прочность. 1983. Вып. 23. С. 122–126.
31. Сухарев И.П. Прочность шарнирных узлов машин. – М.: Машиностроение. 1977. – 168 с.
32. Ушаков Б.Н., Даширабданов В.Д., Дунаев В.В. Исследование поляризации оптическим методом напряжений в болтовых соединениях с натягом // Изв. вузов. Машиностроение. 1983. № 3. С. 14–18.
33. Даширабданов В.Д., Степанов Н.А., Сухарев И.П., Ушаков Б.Н. Напряженное состояние в болтовых соединениях с натягом при сдвиговых нагрузках // Изв. вузов. Машиностроение. 1984. № 9. С. 30–34.
34. Семенов-Ежов И.Е., Степанов Н.А., Сухарев И.П. Напряженно деформированное состояние ступицы двуплечего рычага // Изв. вузов. Машиностроение. 1990. № 3. С. 26–31.
35. Буланов В.Б., Семенов-Ежов И.Е., Шишов А.А. Концентрация напряжений в симметричном двуплечем рычаге при поперечном изгибе // Вестник машиностроения. 2013. № 9. С. 18–21.

Материал поступил в редакцию 05.11.13

**БУЛАНОВ
Владимир Борисович**

E-mail: bulanov1937@mail.ru
Тел.: (926) 071-99-52

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: статические задачи теории упругости, экспериментальные методы. Автор более 40 научных статей.

**СЕМЕНОВ-ЕЖОВ
Игорь Евгеньевич**

E-mail: semenovezhov@mail.ru
Тел.: (495) 474-18-92

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: экспериментальные методы. Автор более 100 научных статей.

**ШИРШОВ
Анатолий Артемович**

E-mail: chirchovaa@mail.ru
Тел.: (495) 686-44-26

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: статические задачи теории упругости, пластичности, ползучести. Автор более 100 научных статей.