

УДК 621.88.084

**А. В. Щенятский**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**В. В. Сеницына**, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**А. Н. Сеницын**, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ, СОБРАННЫХ МЕТОДОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ЗАПРЕССОВКИ \*

*Проводится обзор существующих подходов к расчету соединений с натягом. Рассматриваются явления, происходящие при продольной запрессовке непосредственно в области контакта на макро- и микроуровнях. Обозначены существующие проблемы в расчетах соединений с натягом. Предложена классификация способов механического метода сборки.*

**Ключевые слова:** соединение с натягом, напряженно-деформированное состояние, механический метод сборки, вибропрессовая сборка, поле натяга.

Соединения с натягом находят широкое применение в различных отраслях промышленности – от машиностроения до авиастроения. Возрастающие требования к надежности и качеству изделий, работающих в широких диапазонах нагрузок, скоростей, температур, требуют проведения всестороннего исследования влияния различных факторов (конструктивных, технологических, эксплуатационных) на напряженно-деформированное состояние (НДС) деталей соединения с натягом еще на стадии проектирования изделия.

В данной статье проводится обзор существующих подходов к расчету соединений с натягом с целью их анализа с точки зрения учета влияния различных факторов, возникающих при механическом способе сборки, на НДС деталей.

Механический метод сборки осуществляется путем продольного перемещения вала в отверстии ступицы под воздействием прессы и различных дополнительных устройств. Современные технологии позволяют обеспечить различные режимы механической сборки: прессовый, вибропрессовый [1], запрессовка с использованием ударных импульсов [2].

Сила запрессовки для традиционной продольной запрессовки определяется выражением

$$F_3 = F_0 = \pi \cdot d \cdot l \cdot p_k \cdot f_{тр}, \quad (1)$$

где  $d$  – номинальный диаметр соединения;  $l$  – длина сопряжения;  $p_k$  – контактное давление в соединении;  $f_{тр}$  – коэффициент трения при осевом сдвиге.

При использовании вибраций при сборке сила запрессовки изменяется по закону

$$F_3 = F_0 \cdot \sin wt. \quad (2)$$

Для первичной оценки НДС деталей соединения с натягом часто применяют зависимости Ляме – Гадолина [3], согласно которым наибольшие радиальные

напряжения находятся на поверхности контакта. Наибольшие окружные напряжения сжатия в охватываемой детали находятся у внутренней поверхности, в охватывающей – также у внутренней поверхности. Наибольшие эквивалентные напряжения возникают на внутренней поверхности охватываемой детали. Зависимости Ляме – Гадолина просты и удобны, однако получены они при принятии допущений идеальных форм сопрягаемых деталей и без учета явлений и нагрузок, возникающих в процессе сборки и эксплуатации соединений с натягом

Развитие вычислительной техники привело к развитию таких численных методов, как метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), метод граничных интегральных уравнений (МГИУ). МКЭ как наиболее популярный из них был реализован в различных пакетах прикладных программ: ANSYS, NASTRAN, Pro/Engineer.

Общее уравнение движения в конечно-элементной форме может быть представлено в виде [4]

$$[K]\{x\} + [B]\{\dot{x}\} + [M]\{\ddot{x}\} + \{F\} = 0, \quad (3)$$

где  $[K]$ ,  $[B]$ ,  $[M]$  – матрицы масс, демпфирования и жесткостей;  $\{x\}$ ,  $\{\dot{x}\}$ ,  $\{\ddot{x}\}$  – векторы узловых ускорений, скоростей и перемещений;  $\{F\}$  – вектор нагрузок.

МКЭ позволяет решать задачи определения НДС деталей сложной конструкции при различных граничных условиях, учитывать влияние различных нагрузок: осевой силы, крутящего момента, изгибающего момента [5]. На основе МКЭ разработаны следующие модели, учитывающие особенности контактного взаимодействия: микроскольжение, раскрытия стыка, динамическая модель трения.

Однако в настоящее время в данных программах при расчете НДС деталей соединений с натягом не рассматриваются явления, происходящие непосред-

ственно в зоне контакта деталей и приводящие к полной или частичной потере натяга во время запрессовки, потере нагрузочной способности, которая значительно снижается при повторной сборке и разборке соединения.

Одним из таких явлений является неравномерное распределение натяга по окружности и длине сопряжения, характеризуемое полем натяга. Идеальная форма поля натяга представляет собой цилиндрическую поверхность.

На практике идеальная форма поля натяга недостижима в силу влияния в общем случае 3 основных факторов: геометрии деталей, взаимного положения собираемых деталей и технологии сборки.

Геометрия деталей как влияющий на поле натяга фактор характеризуется отклонениями от размера и формы деталей, а также шероховатостью сопрягаемых поверхностей соединения. В результате отклонений макропрофилей (изогнутость, отклонение профиля охватываемой детали и отверстия охватываемой детали от окружности, отклонение от цилиндричности) сопрягаемых поверхностей деталей соединения могут быть получены различные варианты формы поля натяга: натяг может быть неравномерным по длине окружности и длине сопряжения. Некоторые случаи распределения натяга для осесимметричных случаев схематично представлены на рис. 1.

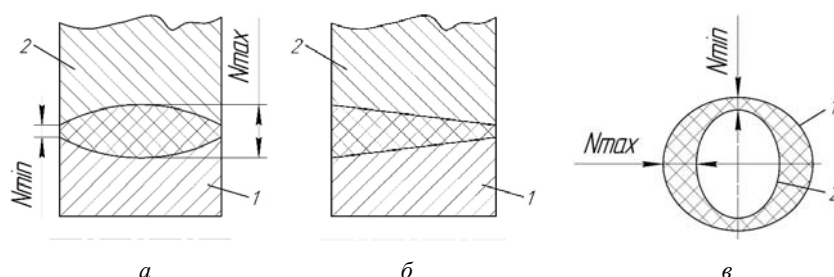


Рис. 1. Возможные варианты поля натяга при отклонениях формы макропрофиля деталей соединения (1 – вал, 2 – втулка): а – изогнутость; б – отклонение от цилиндричности; в – отклонения профиля от окружности

С учетом рассмотренных возможных отклонений поле натяга имеет достаточно сложную объемную форму, а число вариантов формы бесконечно.

В точном машиностроении необходимо эффективное управление реальным полем натяга на основе измерения, построения топографии поверхностей деталей и определения оптимального их взаимоположения. Для серийного производства такой подход к управлению полем натяга неприемлем в связи с его трудоемкостью и дороговизной.

Для серийного производства предлагается построение моделей распределения натяга и определение предельной нагрузочной способности. Расчет соединений с натягом с учетом допусков на форму деталей позволит уточнить поле натяга, определить зоны концентрации напряжений, разработать рекомендации по назначению допусков на форму и размер деталей исходя из задач оптимизации распределения натяга, снижения концентрации контактных давлений и получения максимальной нагрузочной способности. Решение объемной задачи позволит определить влияние относительного положения деталей на поле натяга.

Следующим явлением, возникающим на макро- и микроуровне, является изменение поля натяга, обусловленное способами сборки соединений с натягом. На макроуровне изменение поля натяга возникает в процессе продольной сборки в результате выдавливания материала втулки из зоны контакта продольными силами к торцу соединения.

На микроуровне в процессе продольной запрессовки в результате движения вала по втулке происходит смятие и срез микронеровностей, в результате которого действительный натяг в соединении снижается.

Для учета смятия микронеровностей в результате сборки соединений с натягом общеизвестна следующая формула:

$$N_{\phi} = N_p + 1,2(Rz_1 + Rz_2), \quad (4)$$

где  $Rz_1, Rz_2$  – шероховатости сопрягаемых поверхностей деталей;  $N_{\phi}, N_p$  – фактический и расчетный натяги.

Однако зависимость (4) не учитывает метод сборки и предполагает равномерное смятие микронеровностей по всей длине соединения. В действительности же при термических методах сборки смятия и среза микронеровностей происходит меньше, чем при продольной запрессовке. Смятие микронеровностей будет неравномерно по длине соединения при продольной запрессовке. Так, вероятно, наибольшее смятие микронеровностей будет наблюдаться со стороны начала запрессовки (точка А на рис. 5), а наименьшее смятие микронеровностей будет наблюдаться у противоположного торца соединения.

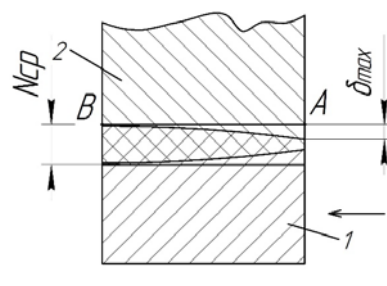


Рис. 2. Общая форма изменения поля натяга при продольной запрессовке

Зависимость фактического поля натяга от основных факторов носит нелинейный характер и требует дополнительных исследований для получения значимых величин смятия микронеровностей, установления влияния твердости деталей на изменение формы поля натяга при продольной запрессовке.

Также при продольной запрессовке возможно явление *микросварки* и связанное с ним явление *образования задиrow*. В общем случае микросварка контактируемых поверхностей может быть предусмотрена намеренно, как в работе [6], для повышения прочности соединений. Но в процессе продольной запрессовки она может быть нежелательна, так как при движении вала происходит разрыв участков сварки, вырывание материала, образование задиrow и царапин на контактируемых поверхностях. Явления микросварки могут возникать при высоком качестве сопрягаемых поверхностей, высоких температурах, низких скоростях запрессовки.

Известны 4 модели видов контактов сопрягаемых поверхностей для упругого, упруго-пластического, пластического контакта с упрочнением и пластического контакта, кратко описанные в работе [1]. Однако необходимые и достаточные условия возникновения микросварки не описаны, не определены модели распределения участков микросварки.

Результаты анализа явлений и проблем, возникающих в зоне контакта соединений с натягом на микро- и макроуровне, обобщены в таблице. Для решения обозначенных проблем требуется разработка новых математических моделей и проведение дополнительных исследований.

Рассмотренные явления, возникающие в зоне контакта при продольной запрессовке, будут иметь различную степень проявления в зависимости от па-

раметров сборочного процесса. Так, явления микросварки наиболее вероятны при низких скоростях продольной запрессовки, когда возникают схватывания сопрягаемых поверхностей.

Для структуризации информации и определения области дальнейших исследований предлагается следующая классификация способов механического метода сборки соединений с натягом (рис. 3).

#### Результаты анализа явлений, возникающих в зоне контакта соединений с натягом

Явления, возникающие в зоне контакта	Требуемые математические модели и исследования
Неравномерное распределение натяга по окружности и длине сопряжения	Функция распределения (поле) натяга для определенного класса точности
Вынос металла из зоны контакта	Исследование явления выноса материала: объем выдавливаемого материала, условия возникновения выдавливания
Срез и смятие микронеровностей в процессе продольной запрессовки	Функция потери натяга при продольной запрессовке
Микросварка деталей при высоком качестве сопрягаемых поверхностей	Необходимые и достаточные условия возникновения микросварки
	Модель образования точечного «жесткого» контакта при микросварке
	Модель распределения участков микросварки
Повреждение сопрягаемых поверхностей	Модель разрыва участков микросварки
	Модель образования задиrow и царапин на контактируемых поверхностях

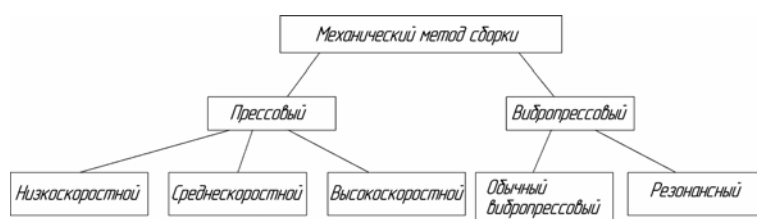


Рис. 3. Классификация способов механической сборки соединений с натягом

Установлено, что при прессовом способе механической сборки скорость запрессовки оказывает влияние на характер диаграммы, величину конечного усилия запрессовки, величину контактных давлений, а следовательно, и на общее НДС состояние деталей [3]. Учитывая влияние скорости запрессовки на конечное НДС деталей, прессовый способ сборки соединений с натягом на первом этапе предлагается разделить на низкоскоростной ( $v < 5$  м/мин), среднескоростной ( $5$  м/мин  $< v < 50$  м/мин) и высокоскоростной ( $v > 50$  м/мин) (рис. 3).

Наибольшее распространение получил низкоскоростной прессовый способ механической сборки. Таким способом собирают колеса и оси железнодорожного транспорта. Так, при запрессовке ко-

лес на ось или зубчатых колес на ось или колесный центр для колесных пар скорость движения плунжера гидравлического пресса не должна превышать 3 мм/с [7].

Для улучшения процесса механической сборки, взаимной ориентации осей собираемых деталей, снижения усилия запрессовки могут применяться вибрации [1]. Вибрации могут прикладываться в продольном и поперечном направлениях. В случае совпадения частот прикладываемых колебаний с собственной частотой колебаний деталей требуется оценка влияния резонансных колебаний на деформации контактирующих поверхностей. Стоит также отметить, что распространение волны в процессе сборки происходит при изменяющихся внешних условиях: изменение длины сопряжения в процессе

запрессовки, изменение условий контактирования, снятие микронеровностей, вынос материала из зоны контакта.

Таким образом, влияние волновых колебаний на НДС деталей соединения с натягом в процессе сборки требует дополнительных исследований. Для определения результирующего НДС деталей соединения с натягом при вибропрессовой сборке требуется совместное решение задач механики деформируемого твердого тела и распространения волны в твердом теле.

### Выводы

1. Для получения высокопрочных соединений с натягом продольно-прессовым методом сборки необходимо разработать динамическую модель контактирования, учитывающую явления, возникающие непосредственно в зоне сопряжения на макро- и микроуровне в процессе сборки.

2. Для совершенствования процесса вибропрессовой сборки необходимо исследовать влияние волновых колебаний на НДС деталей соединения с натягом и разработать методику расчета сопряженных задач механики деформируемого твердого тела и распределения упругой волны.

### Библиографические ссылки

1. Использование ультразвуковых колебаний малой амплитуды для формирования прессовых соединений с анализом прочностных характеристик / Д. В. Анкудинов, О. М. Батищева, В. А. Папшев, В. Г. Шуваев // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. «Технические науки». – 2011. – № 2(30). – С. 102–110.
2. Гусейнова Н. Р. Запрессовка деталей с использованием крутильных и осевых ударных импульсов. – М., 1963. – С. 3–19. – (Передовой научно-технический и производственный опыт № 20-63-424/9).
3. Берникер Е. И. Посадки с натягом в машиностроении. – М. ; Л. : Машиностроение, 1966. – 166 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / под ред. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
5. Напряженно-деформированное состояние деталей соединения с натягом под действием изгибающего момента / И. В. Абрамов, А. И. Абрамов, А. Н. Сеницын, В. В. Сеницына // Вестник машиностроения. – 2010. – № 8. – С. 18–21.
6. Пат. РФ № 2357848. Способ запрессовки твердосплавных зубков в корпус шарошки бурового долота / Р. М. Богомолов, А. Г. Ицук, В. И. Кремлёв, Н. В. Носов, В. Г. Шуваев, В. А. Паншев ; Опубли. 10.06.2009.
7. ГОСТ 11018-2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – Введен в действие 01–01–2013.

---

*A. V. Shchenyatskiy*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*V. V. Sinitsyna*, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*A. N. Sinitsyn*, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Approaches to Deflection Mode Evaluation of Mechanically Assembled Interference Fit

*This article provides a review of existing approaches to the interference fit calculation. The phenomena occurring directly in the contact area on the macro and micro levels during the longitudinal pressing are considered. The existing problems in the interference fit calculations are designated. Classification of mechanical assembly methods is presented.*

**Keywords:** interference fit, mode of deformation, press assembly, vibropress fitting, field of interference.

Получено 08.07.14