

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.9:658.5:629.7

doi: 10.18698/0536-1044-2021-4-55-64

Совершенствование технологии получения соединений с натягом деталей типа «втулка — корпус» путем использования силового привода из сплава с эффектом памяти формы

О.В. Ломовской¹, Р.С. Загидуллин^{1,2}¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва² АО «Ракетно-космический центр «Прогресс»

Improving the Technology for Producing Pressure Couplings of Bushing-Housing Parts by Using a Power Drive Made of an Alloy with the Shape Memory Effect

O.V. Lomovskoy¹, R.S. Zagidullin^{1,2}¹ Samara National Research University named after academician S.P. Korolev² Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress

Предложена технология использования силового привода из сплава с эффектом памяти формы для повышения качества соединения с натягом деталей типа «втулка — корпус». Даны определение и современное представление об эффекте памяти формы. Выполнен обзор существующих подходов к получению соединения с натягом, указаны их недостатки. Проведен анализ видов и последствий потенциальных несоответствий (Failure Mode and Effects Analysis — FMEA) технологического процесса создания соединения с натягом деталей типа «втулка — корпус». Приведена схема предлагаемого процесса получения соединений с натягом с помощью силового привода из сплава с эффектом памяти формы. Продемонстрированы результаты экспериментального исследования зависимости контактного давления от радиальной подачи кольцевого силового элемента из сплава с эффектом памяти формы.

Ключевые слова: соединение с натягом, качество соединений, кольцевой силовой привод, эффект памяти формы, анализ рисков методом FMEA, контактное давление

The article describes the technology of using a power drive made of an alloy with the shape memory effect to improve the quality of the pressure couplings of bushing-housing. A comprehensive assessment of the existing approaches to the production of a pressure coupling is performed. The risk analysis of the technological process of pressing by the FMEA method is carried out. The flow diagram of the proposed process and the results of an experimental

study of the dependence of contact pressures on the radial expansion of a ring load-bearing element made of an alloy with the shape memory effect are presented.

Keywords: pressure couplings, quality, quality of connections, ring power drive, shape memory effect, FMEA risk analysis, pressing by the FMEA method, contact pressure

Качество изделий авиационной и ракетно-космической техники во многом определяется качеством технологических процессов сборки и испытаний. В связи с этим особое значение приобретает совершенствование технологических процессов производства изделий путем внедрения принципиально новых технологий, которые позволили бы снизить трудоемкость их изготовления при повышении надежности узлов.

Широкое применение в конструкциях авиационно-космической техники получили соединения с натягом (ССН) деталей типа «втулка — корпус». Это обусловлено простотой конструкции, хорошим центрированием сопрягаемых деталей и возможностью восприятия значительных статических и динамических (вибрационных и ударных) нагрузок [1–3].

Критериями качества ССН деталей типа «втулка — корпус» являются прочность, износостойкость и геометрическая точность. Однако наряду с перечисленными достоинствами ССН имеют такие недостатки, как сложность сборки и разборки соединения, высокие требования к шероховатости и точности изготовления деталей ССН, возможность снижения прочности соединения вследствие рассеивания сил сцепления, вызванного изменчивостью действительных размеров связываемых деталей.

Для устранения указанных недостатков необходимо упростить механизм получения ССН, обеспечить равномерное распределение упругопластических деформаций и напряжений на сопряженных поверхностях, исключить высокие требования к шероховатости и точности изготовления деталей. При этом представляет интерес радиальное деформирование соединяемых деталей по всей длине сопряжения, что позволяет избежать неравномерности деформаций и обеспечить одинаковые по значению напряжения в зоне контакта.

В целях определения недостатков и возможностей совершенствования ССН проведен анализ видов и последствий потенциальных несоответствий (Failure Mode and Effects Analysis — FMEA) технологического процесса запрессовки, хорошо зарекомендовавший себя в машиностроении [4]. В результате анализа даны

предложения по совершенствованию технологических процессов получения ССН деталей типа «втулка — корпус», в том числе с использованием силового привода из сплава с эффектом памяти формы (ЭПФ) [5–10].

Цель работы — совершенствование технологии получения ССН типа «втулка — корпус» путем использования силового привода из сплава с ЭПФ.

Применение силовых приводов с ЭПФ. Эффект памяти формы — свойство некоторых материалов восстанавливать в процессе нагрева или охлаждения первоначальную форму после предварительной деформации. Явление ЭПФ основано на так называемых термоупругих мартенситных превращениях, описанных в 40-х годах прошлого века советским ученым Т.В. Курдюмовым [5].

Феномен ЭПФ заключается в следующем. Материал в виде какого-либо полуфабриката (прутка, ленты, проволоки и т. п.), обладающий ЭПФ, пластически деформируют при температуре, превышающей температуру прямого мартенситного превращения, с целью придания ему определенной формы. Затем охлаждают до температур, обеспечивающих протекание мартенситного превращения, и деформируют в этой температурной области до получения иной формы.

При нагреве выше температуры обратного мартенситного превращения образец вновь восстанавливает форму, которая была ему придана при температуре, выше, чем у прямого мартенситного превращения.

Самым распространенным сплавом, используемым в силовых приводах на базе ЭПФ, является сплав ТН-1 или никелид титана, обладающий ярко выраженным ЭПФ и физико-механическими свойствами, обеспечивающими его эффективное применение на практике [5]. Сплав ТН-1 — титаноникелевый сплав с массовой долей никеля 55,07 % и титана 44,93 % имеет температуру плавления 1240...1310 °С и плотность 6,45 г/см³.

Существует ряд примеров использования материала с ЭПФ [6–10]. Так, в технологиче-

ских процессах обработки цилиндрических деталей применяют оправку с ЭПФ для закрепления тонкостенной детали при прецизионном шлифовании [5]. Оправка содержит рабочую часть, выполненную из материала с ЭПФ в виде единого целого с осевым отверстием и внешним недеформируемым слоем. В данном примере использование материала с ЭПФ позволило расширить эксплуатационные возможности при обеспечении точности центрирования, а также упростить конструкцию. Оправка успешно внедрена в производство АО «РКЦ «Прогресс».

Обзор подходов к получению ССН деталей типа «втулка — корпус». Конструкция современных летательных аппаратов содержит ряд ССН деталей указанного типа. Так, ССН встречаются в гидроприводах ракет-носителей для управления вектором тяги двигателей. Такие соединения конструктивно просты и хорошо воспринимают как статические, так и динамические нагрузки.

В основе ССН лежат упругопластические деформации, которые вызывают в зоне сопряжения поверхностей контактные давления и напряжения, обеспечивающие неподвижность соединяемых деталей и препятствующие их сдвигу (рис. 1).

Качество ССН деталей «типа втулка — корпус» зависит от их материала, конструктивных параметров, шероховатости и точности изготовления.

В современной аэрокосмической технике материалом деталей типа корпуса являются алюминиевые сплавы, конструкционные стали

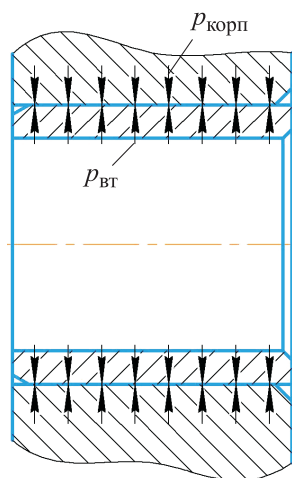


Рис. 1. Схема ССН деталей типа «втулка — корпус»: $P_{\text{корп}}$ и $P_{\text{вт}}$ — контактные давления корпуса и втулки

и композитные материалы (полимерные композитные, металлокомпозитные и пр.). Материал деталей типа втулки для ССН в зависимости от воспринимаемой нагрузки (статической или динамической) служат конструкционные легированные, коррозионно-стойкие, жаропрочные и жаростойкие стали, а также цветные сплавы (ЛАЖМц, БрАЖ9-4 и др.). Толщина стенок деталей типа втулки может составлять 0,75...30,00 мм [1–3, 5, 9, 10].

Другим важнейшим фактором обеспечения качества ССН является технология их создания. В настоящее время на предприятиях аэрокосмической отрасли широко распространены три основных подхода к получению ССН: продольный (запрессовка), поперечный (температурное воздействие на соединяемые детали) и продольно-прессовый (гидропрессовый) [1–3]. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки.

Запрессовка деталей является наиболее простым и распространенным подходом к получению ССН в машиностроительном производстве. Сущность этого подхода заключается в приложении осевой силы запрессовки $P_{\text{запр}}$ на торцевые поверхности охватываемой детали и ее жесткой фиксации (рис. 2). Напряжения и упругопластические деформации в соединяемых деталях создаются в этом случае еще в начале запрессовки.

В качестве технологической оснастки для запрессовки деталей в зависимости от типа производства применяют приспособления с ручным (винтовым, реечным, эксцентриковым, маятниковым) и механизированным (электро-механическим, пневматическим, гидравлическим, электромагнитным, электровибрационным) приводом [1–3]. Выбор того или иного

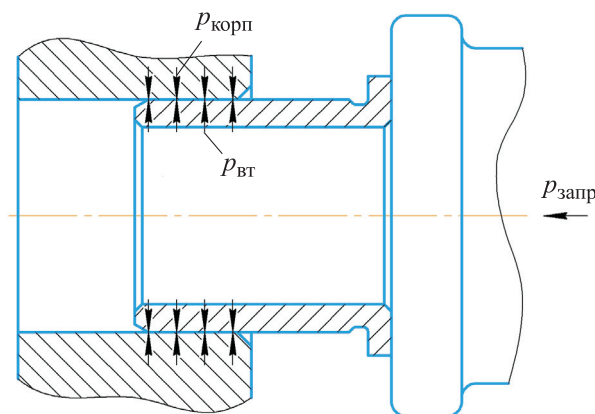


Рис. 2. Схема запрессовки втулки в корпус

приспособления для запрессовки обусловлен ее усилием, материалом и конструктивными параметрами соединяемых деталей.

Приспособления с ручным приводом позволяют запрессовывать детали в труднодоступных местах, но из-за невысоких силовых возможностей их применение при запрессовке крупных деталей ограничено. Для запрессовки деталей, требующих значительных рабочих усилий, применяют механизированные приспособления с пневматическим, гидравлическим или пневмогидравлическим приводом.

Недостатки такого подхода заключаются в том, что в процессе запрессовки деталей микронеровности сопрягаемых поверхностей срезаются, в результате чего прочность и надежность ССН снижаются. Кроме того, при больших натягах запрессовки происходят деформации вплоть до разрушения сопрягаемых тонкостенных деталей [1–3].

Подход, основанный на температурном воздействии на соединяемые детали, позволяет исключить недостатки, свойственные запрессовке. В основе подхода лежит явление теплового расширения (сжатия) материалов, при котором происходит изменение линейных размеров твердого тела и его объема [1–3]. Данный подход к получению ССН можно реализовать нагревом охватываемой детали, ее охлаждением и комбинированным способом.

Способ нагрева охватываемой детали позволяет получать ССН средних и крупных деталей, например, дисков турбин, крупных подшипников, бандажей, зубчатых колес, длинных и тонкостенных втулок и др.

Недостатками этого способа являются возможность образования окалины на поверхностях сопрягаемых деталей, снижение твердости и окисление их поверхностей, высокие затраты на нагрев. Напряжения и деформации, возникающие в процессе нагрева деталей, способствуют возникновению микротрещин, рост которых в процессе эксплуатации может привести к разрушению соединения деталей.

Способ охлаждения охватываемой детали исключает перечисленные недостатки. Соединения, изготовленные таким способом, на 10...15 % прочнее ССН, полученных нагревом охватываемой детали [1–3]. Этот способ целесообразно применять при посадке тонкостенных втулок, штифтов, осей и других элементов в крупногабаритные корпусные детали. Охлаждение осуществляется как без контакта,

так и с контактом деталей с охлаждающей средой.

Недостатками такого способа являются возможность возникновения коррозии на поверхностях сопрягаемых деталей, наличие теплового зазора, образующего в процессе их нагрева до температуры окружающей среды после посадки (например, при посадке втулок с буртиком) и значительные затраты на охлаждающую среду.

В некоторых марках сталей при охлаждении наблюдаются фазовые превращения, в результате которых происходит рост деталей. Это приводит к снижению качества ССН, вследствие чего детали необходимо выдерживать в узком диапазоне температур. В связи с применением охлаждающей среды необходимо строго соблюдать требования техники безопасности.

Комбинированный способ, основанный на одновременном нагреве и охлаждении охватываемой детали, позволяет создавать ССН деталей с большим натягом при наименьших затратах на усилие сборки. Это уменьшает деформации деталей при сборке и повышает качество соединений.

Гидропрессовый подход получения ССН обеспечивает большой натяг, поэтому его рекомендуют применять для запрессовки крупных подшипников качения, зубчатых колес, фланцев и т. д. К недостаткам такого подхода относятся необходимость обеспечения герметичности для подвода масла и невозможность применения для запрессовки тонкостенных втулок вследствие их деформации [1–3].

Для определения направлений совершенствования технологий проведена их комплексная оценка качества и сравнение с использованием экспертного подхода, получившего распространение в квалиметрии и являющегося элементом методики развертывания функции качества [11, 12].

На основе известных недостатков и ограничений требования к получению ССН обобщены в пять групп с установленным баллом значимости (по десятибалльной шкале): обеспечение посадки, трудоемкость, бездефектность, безопасность и универсальность.

Проведена экспертная оценка степени выполнения требований указанными технологиями по пятибалльной шкале (1 — требование не выполняется, 5 — требование выполняется в полной мере). Наибольшая комплексная оценка качества наблюдается у гидропрессового

подхода (371 балл). Несмотря на низкую оценку безопасности и трудоемкости, подход обладает высокой экспертной оценкой обеспечения посадки и бездефектности. На втором месте — запрессовка (349 баллов). Разрабатываемая технология должна соответствовать как требованиям по обеспечению посадки и бездефектности, так и остальным требованиям.

Анализ рисков технологического процесса получения ССН на основе метода FMEA. Анализ видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) является одним из базовых методов обеспечения качества и успешно применяется в автомобилестроении и авиакосмической отрасли с середины прошлого века [4, 12–15].

Наибольшее снижение рисков при наименьших затратах на анализ достигается на этапах проектирования продукции и технологических процессов. Как в автомобилестроении, так и в авиакосмической отрасли проведение анализа FMEA становится «золотым стандартом», базовым условием постоянного совершенствования продукции и процессов.

Для поиска направлений повышения качества процесса получения ССН проведен анализ FMEA наиболее распространенного в производстве технологического процесса запрес-

совки с использованием ручных приспособлений. Технологические процессы создания ССН на основе температурного воздействия и гидрпрессового подхода несут дополнительные риски.

Рассмотрены следующие операции технологического процесса запрессовки: подготовка деталей (включая влияние результатов этапа изготовления), установка втулки, подлежащей запрессовке в оснастку, подборка оснастки, запрессовка вручную и снятие детали с оснастки.

Конструктивная схема приспособления с ручным винтовым приводом для запрессовки втулки в отверстие корпусной детали приведена на рис. 3.

Приспособление работает следующим образом. Втулку 4, подлежащую запрессовке, устанавливают на центрирующую втулку 5, которую в свою очередь по переходной посадке запрессовывают в корпус 9. Через отверстие центрирующей втулки продевают ось 6. Снизу на нее монтируют упорный стакан 8 и шайбу 7 для стопорения, а сверху — нажимной стакан 3.

Нажимной стакан фиксируют с помощью накидной гайки 2. На ось накручивают упор 1 с ручками 11, который, воздействуя на торец нажимного стакана, приводит в действие механизм запрессовки втулки в корпус. Для снижения силы трения между упором и нажим-

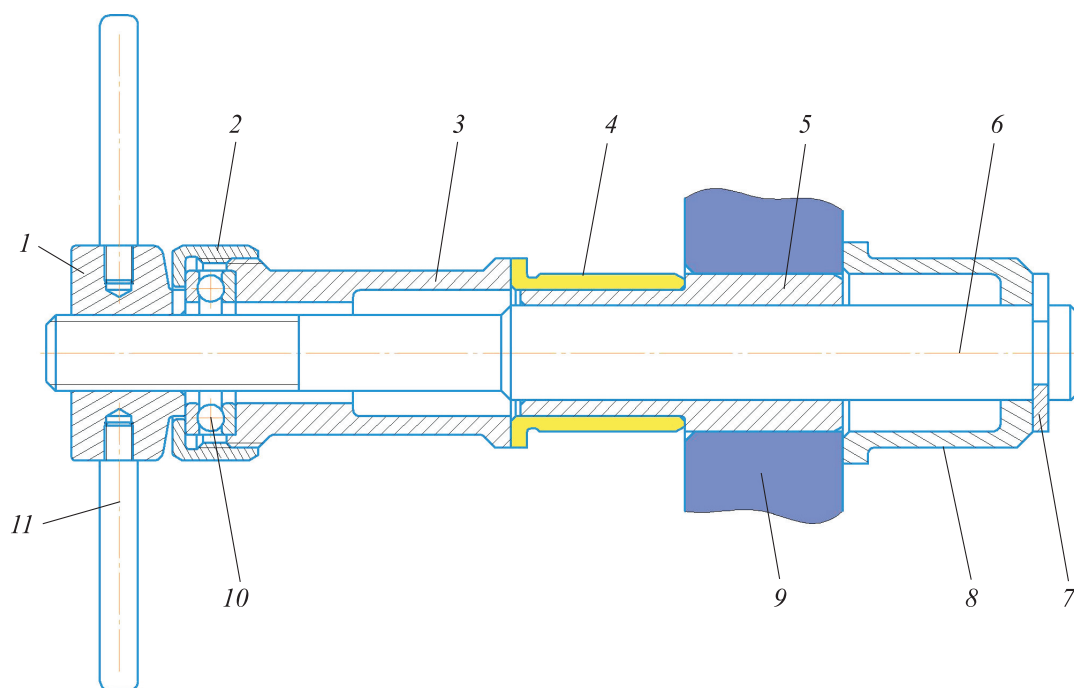


Рис. 3. Конструктивная схема приспособления с ручным винтовым приводом для запрессовки втулки в отверстие корпусной детали

ным стаканом используют упорный подшипник 10.

Рассмотрены виды потенциальных несоответствий технологического процесса получения ССН: отклонение характеристик деталей (диаметра, шероховатости поверхности) от целевых значений, несоосность расположения и несоответствие расположения втулки, подлежащей запрессовке, недостаточное усилие предварительной фиксации нажимного стакана гайкой, излишнее или недостаточное усилие запрессовки, повреждение детали при снятии с оснастки.

С разной степенью вероятности возможными причинами могут быть факторы, связанные с оснасткой, выполнением технологической операции, подготовкой деталей и т. д. К ним относятся недостаточные возможности производственного процесса производства деталей (индекс воспроизводимости процесса $C_{pk} < 1,33$), нестабильность производственных условий, недостаточное время выдержки деталей в стабильных условиях, отсутствие или несовершенство направляющих для подсорбки, недостаточная точность измерительной системы, неправильное приложение усилия и сложность конструкции оснастки.

В соответствии с методом FMEA [4] проведена оценка значимости последствий несоответствий, а также вероятности возникновения и обнаружения причин несоответствий. Получены значения приоритетного числа рисков по каждой потенциальной причине несоответствий. Предложены мероприятия по совершенствованию процесса.

Основными мерами по контролю и предотвращению потенциальных причин несоответствий являются статистическое управление производственным процессом, контроль производственных условий, квалификация персонала, контроль технологической дисциплины, периодическая поверка и калибровка средств измерения, периодический анализ и совершенствование технологического процесса. В то же время эти меры не обеспечивают необходимого уровня риска процессов.

Стандартным подходом к снижению рисков является разработка мероприятий по совершенствованию мер предупреждения и контроля причин потенциальных несоответствий. Для ручной запрессовки предлагаются следующие мероприятия: автоматизация статистического управления процессом, повышение его возможностей до $C_{pk} > 1,67$), автоматическое управление

и корректировка температуры окружающей среды, защита от ошибок с регистрацией времени и условий выдерживания деталей, упрощение подготовительного этапа путем разработки новой технологии, предусматривающей минимальное количество этапов подготовки, автоматизированная подача усилия для достижения необходимого соединения.

Указанные мероприятия частично реализованы в других вариантах получения ССН, достаточно затратны, не повышают эффективность процесса и поэтому не нашли широкого применения в производстве.

Предлагается использовать новый технологический процесс, который не содержит проанализированных источников рисков, проще в реализации и потенциально способен обеспечить более высокое качество ССН. Эффективным и в достаточной степени проработанным способом решения такой задачи на современном этапе развития технологий является применение приспособления радиального действия с кольцевым силовым приводом из сплава с ЭПФ [7–10].

Технологический процесс получения ССН деталей типа «втулка — корпус» на базе ЭПФ. Рассмотрим технологический процесс получения ССН деталей указанного типа с помощью силового привода из сплава с ЭПФ. Такой подход реализован с помощью механизированного приспособления многоразового использования, основой конструкции которого служит силовой привод из сплава с ЭПФ в виде кольца.

Кольцевой силовой привод из сплава с ЭПФ позволяет управлять остаточными напряжениями в сопрягаемых деталях за счет строго заданных радиальных перемещений рабочих поверхностей, способен развивать значительные рабочие давления. Применение данного способа обеспечивает снижение трудоемкости, себестоимости и повышение качества ССН деталей.

Предлагаемая схема процесса получения ССН деталей типа «втулка — корпус» приведена на рис. 4. Приспособление состоит из кольцевого силового элемента с ЭПФ (ЭПФ-привод 3), установленного в отверстие втулки 2 и предназначенного для деформирования соединяемых деталей (втулки и корпуса 1) в радиальном направлении.

Процесс получения ССН осуществляется следующим образом. В соединяемые детали с минимальным зазором устанавливают ЭПФ-

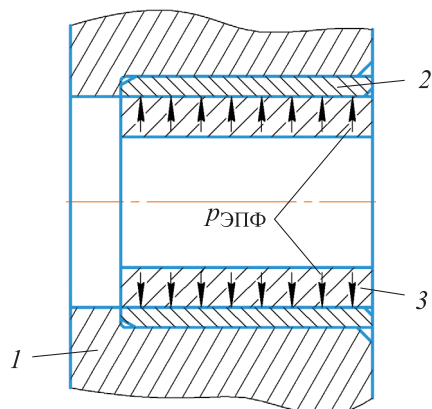


Рис. 4. Схема процесса получения ССН деталей типа «втулка — корпус» с использованием ЭПФ-привода:
 $P_{ЭПФ}$ — давление, оказываемое ЭПФ-приводом на поверхность втулки

привод в виде кольца, и подводят к нему тепловую энергию (тепловой воздушный поток, электрический нагревательный элемент и т. д.). ЭПФ-привод нагревается до температуры завершения обратного мартенситного превращения, в процессе которого увеличивает диаметр, воздействуя на соединяемые элементы и упруго деформируя их.

Это вызывает в зоне сопряжения поверхностей равномерные контактные давления и напряжения, обеспечивающие неподвижность соединяемых деталей и препятствующие их сдвигу. После завершения процесса деформирования сопрягаемых деталей нагрев отключают, и происходит охлаждение силового элемента до температуры окончания прямого мартенситного превращения. ЭПФ-привод принимает исходные геометрические размеры, и силовой элемент можно установить в следующие соединяемые детали, после чего процесс получения ССН может быть повторен.

Для успешного применения предложенных механизированных приспособлений с кольцевым силовым приводом из сплава с ЭПФ необходима методика проектирования со строго заданным диапазоном изменения их диаметров в зависимости от номенклатуры сечений и материала соединяемых элементов. Запланировано использование современных робастных методов проектирования [4, 12–15] и проведение ряда экспериментальных исследований для определения зависимости рабочих перемещений поверхности силового элемента от жесткости системы *втулка — корпус* с применением технологии планирования экспериментов.

На кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва разработана аналитическая модель, связывающая размеры заготовки, кольцевого силового элемента из сплава с ЭПФ и параметры его подготовки с напряженно-деформированным состоянием материалов соединяемых деталей. В основе указанной модели лежит решение задачи термоупругого функционирования силового элемента с ЭПФ [8].

Проведены экспериментальные исследования по определению нормальных давлений, возникающих в ССН, полученных с помощью кольцевого силового элемента из сплава с ЭПФ деталями. Для экспериментальных исследований использованы кольцевые силовые элементы (втулки) с внешним диаметром 22 мм, длиной 32 мм (рис. 5) и радиальной подачей 0,05; 0,10 мм; 0,015 и 0,20 мм.

С помощью указанных силовых элементов выполняли радиальное пластическое деформирование втулок из сплава БрАЖ9-4 (с внешним диаметром 22 мм и длиной 32 мм) в корпус из стали 45. Подачу тепловой энергии осуществляли с помощью теплового воздушного потока.

Результаты экспериментального исследования зависимости контактного давления q от радиальной подачи Δ кольцевого силового элемента из сплава с ЭПФ приведены на рис. 6.

Следующим этапом экспериментальных исследований станет планирование эксперимента (включая методы Тагути) и определение прочности ССН сопрягаемых деталей в зависимости

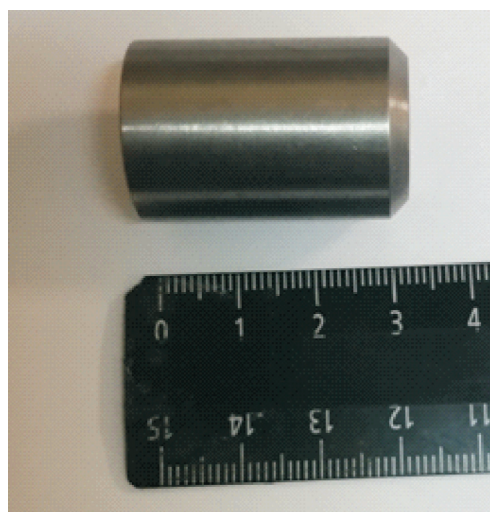


Рис. 5. Втулка из сплава с ЭПФ

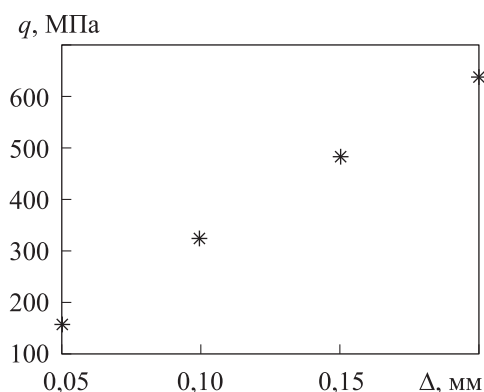


Рис. 6. Зависимость контактного давления q от радиальной подачи Δ кольцевого силового элемента из сплава с ЭПФ

от радиальной подачи кольцевого силового элемента, а также применение планирования экспериментов для оценки устойчивых значений характеристик силового привода с целью обеспечения стабильности качества получаемого соединения.

При разработке предлагаемого технологического процесса получения ССН планируется применение метода разворачивания функции качества QFD и анализ FMEA.

Выводы

1. Проведены анализ литературы, экспертный анализ и сравнение существующих подходов к получению ССН деталей типа «втулка — корпус» и анализ технологического процесса запрессовки методом FMEA. Для повышения качества создания ССН предложено применять радиальное пластическое деформирование на базе ЭПФ.

2. Приведена схема процесса получения ССН деталей указанного типа с использованием ЭПФ-привода.

3. Представлены результаты экспериментального исследования зависимости контактного давления от радиальной подачи кольцевого силового элемента из сплава с ЭПФ.

Литература

- [1] Замятин В.К. *Технология и оснащение сборочного производства машиноприборостроения*. Москва, Машиностроение, 1995. 608 с.
- [2] Новиков М.П. *Сборка изделий машиностроения*. Москва, Машиностроение, 1983, т. 1, 480 с.
- [3] Новиков М.П. *Основы технологии сборки машин и механизмов*. Москва, Машиностроение, 1980. 592 с.
- [4] Дмитриев А.Я., Вашуков Ю.А., Митрошкина Т.А. *Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники*. Самара, СГАУ, 2016. 76 с.
- [5] Богданович В.И., Родин Н.П., Ломовской О.В. *Применение материалов с эффектом памяти формы в производстве летательных аппаратов*. Самара, СГАУ, 2007. 64 с.
- [6] Тюлевин С.В., Назаров Д.В., Богданович В.И., Ломовской О.В., Шаров А.А. *Оправка для закрепления тонкостенной детали при прецизионном шлифовании*. Патент 2616738 РФ, бюл. № 11, 2017. 8 с.
- [7] Ломовской О.В., Феоктистов О.В., Феоктистова О.В. Основополагающие принципы применения устройств с силоприводом из сплава с памятью формы для стыковки-сварки ответственных деталей трубопроводов в системах и агрегатах железнодорожных газотурбинных установок. *Вестник Самарского государственного университета*, 2006, № 9(49), с. 55–65.
- [8] Феоктистов В.С., Феоктистов О.В., Ломовской О.В. Запрессовка труб в трубные доски теплообменников тепловозных энергетических установок инструментом с рабочей частью из материала с эффектом памяти формы. *Наука и техника транспорта*, 2006, № 2, с. 82–91.
- [9] Барвинок В.А., Богданович В.И., Грошев А.А., Плотников А.Н., Ломовской О.В. Методика проектирования силовых приводов из материала с эффектом памяти формы для ракетно-космической техники. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2013, т. 15, № 6, с. 272–277.
- [10] Барвинок В.А., Богданович В.И., Ломовской О.В., Вишняков М.А., Грошев А.А. Разработка реверсивных силовых приводов из материалов с эффектом памяти формы для

- устройств, применяемых в узлах расчеховки космических аппаратов. *Известия СНЦ РАН*, 2011, т. 13, № 4–2, с. 301–306.
- [11] Чекмарев А.Н. *Квалиметрия и управление качеством. Часть 1. Квалиметрия*. Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. 172 с.
- [12] Загидуллин Р.С., Баринов П.В., Буркова В.А., Глушков С.В., Митрошкина Т.А. Современные методы улучшения качества проектирования специальной технологической оснастки для испытаний сборочно-защитного блока научно-энергетического модуля. *Качество и жизнь*, 2019, № 2(22), с. 44–53, doi: 10.34214/2312-5209-2019-22-2-44-53
- [13] Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А., Шутемова Е.В., Кончиц А.В. Совершенствование сборочных процессов с использованием методики планирования экспериментов лисхин и метода анализа рисков FMEA. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2015, № 8, с. 44–48.
- [14] Митрошкина Т.А., Дмитриев А.Я., Лаптев Н.И., Богатеев Г.Г. Современные инновационные методы структурирования качества продукции и управления рисками. *Вестник Казанского технологического университета*, 2014, т. 17, № 8, с. 330–332.
- [15] Dmitriev A., Mitroshkina T. Improving the Efficiency of Aviation Products Design Based on International Standards and Robust Approaches. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 476, pp. 012009, doi: 10.1088/1757-899X/476/1/012009

References

- [1] Zamyatin V.K. *Tekhnologiya i osnashcheniye sborochnogo proizvodstva mashinopriborostroyeniya* [Technology and equipment for Assembly production of machine tools]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1995. 608 p.
- [2] Novikov M.P. *Sboroka izdeliy mashinostroyeniya* [Assembly of mechanical engineering products]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1983, vol. 1, 480 p.
- [3] Novikov M.P. *Osnovy tekhnologii sborki mashin i mekhanizmov* [Fundamentals of machine and mechanism Assembly technology]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1980. 592 p.
- [4] Dmitriyev A.Ya., Vashukov Yu.A., Mitroshkina T.A. *Robastnoye proyektirovaniye i tekhnologicheskaya podgotovka proizvodstva izdeliy aviatsionnoy tekhniki* [Robust design and technological preparation of production of aircraft products]. Samara, SGAU publ., 2016. 76 p.
- [5] Bogdanovich V.I., Rodin N.P., Lomovskoy O.V. *Primeneniye materialov s efektom pamyati formy v proizvodstve letatel'nykh apparatov* [The use of materials with shape memory effect in the manufacture of aircraft]. Samara, SGAU publ., 2007. 64 p.
- [6] Tyulevin S.V., Nazarov D.V., Bogdanovich V.I., Lomovskoy O.V., Sharov A.A. *Opravka dlya zakrepleniya tonkostennoy detali pri pretsizionnom shlifovanii* [Mandrel for fixing a thin-walled part during precision grinding]. Patent RF no. 2616738, 2017.
- [7] Lomovskoy O.V., Feoktistov O.V., Feoktistova O.V. An application of devices with power gear from an alloy with shape memory effect to joining–weldings of details of pipelines in systems and units of railway gaz–turbine installations. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2006, no. 9(49), pp. 55–65 (in Russ.).
- [8] Feoktistov V.S., Feoktistov O.V., Lomovskoy O.V. On the technology of pipe insertion into the pipe plates of a diesel locomotive power installation heat exchanger by means of a special tool with the test portion composed of a shape memory material. *Nauka i tekhnika transporta*, 2006, no. 2, pp. 82–91 (in Russ.).
- [9] Barvinok V.A., Bogdanovich V.I., Groshev A.A., Plotnikov A.N., Lomovskoy O.V. Design method of power drives from material shape memory effect for rocket and space technology. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, vol. 15, no. 6, pp. 272–277 (in Russ.).
- [10] Barvinok V.A., Bogdanovich V.I., Lomovskoy O.V., Vishnyakov M.A., Groshev A.A. Development of reversible power drives from materials with the effect of memory of form for devices, applied in the knots of check off of space vehicles. *Izvestiya SNTs RAN*, 2011, vol. 13, no. 4–2, pp. 301–306 (in Russ.).
- [11] Chekmarev A.N. *Kvalimetriya i upravleniye kachestvom. Chast' 1. Kvalimetriya* [Qualimetry and quality management. Part 1. Qualimetry]. Samara, SGAU publ., 2010. 172 p.

- [12] Zagidullin R.S., Barinov P.V., Burkova V.A., Glushkov S.V., Mitroshkina T.A. Modern methods for improving the design quality of special technological equipment for testing the Assembly and protection unit of the scientific and energy module. *Kachestvo i zhizn'*, 2019, no. 2(22), pp. 44–53 (in Russ.), doi: 10.34214/2312-5209-2019-22-2-44-53
- [13] Dmitriyev A.Ya., Mitroshkina T.A., Shutemova E.V., Konchits A.V. Improving of assembly processes using the design of experiment technique lis-hin and the risk analysis method FMEA. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2015, no. 8, pp. 44–48 (in Russ.).
- [14] Mitroshkina T.A., Dmitriyev A.Ya., Laptev N.I., Bogateyev G.G. Modern innovative methods of product quality structuring and risk management. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 8, pp. 330–332 (in Russ.).
- [15] Dmitriyev A., Mitroshkina T. Improving the Efficiency of Aviation Products Design Based on International Standards and Robust Approaches. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 476, pp. 012009, doi: 10.1088/1757-899X/476/1/012009

Статья поступила в редакцию 25.11.2020

Информация об авторах

ЛОМОВСКОЙ Олег Владиславович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении». Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (443086, Самара, Российская Федерация, ул. Московское шоссе, д. 34, e-mail: oleg.lomovskoi@yandex.ru).

ЗАГИДУЛЛИН Радмир Салимьянович — аспирант кафедры «Производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении». Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; инженер-конструктор. АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» (443009, Самара, Российская Федерация, ул. Земеца, д. 18, e-mail: Zagidullin_Radmir@mail.ru).

Information about the authors

LOMOVSKOY Oleg Vladislavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering. Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (443086, Samara, Russian Federation, Moskovskoye Shosse, Bldg. 34, e-mail: oleg.lomovskoi@yandex.ru).

ZAGIDULLIN Radmir Salimyanovich — Postgraduate, Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering. Samara National Research University named after academician S.P. Korolev; Design Engineer, Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress (443009, Samara, Russian Federation, Zemetsa St., Bldg. 18, e-mail: Zagidullin_Radmir@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ломовской О.В., Загидуллин Р.С. Совершенствование технологии получения соединений с натягом деталей типа «втулка — корпус» путем использования силового привода из сплава с эффектом памяти формы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 4, с. 55–64, doi: 10.18698/0536-1044-2021-4-55-64

Please cite this article in English as:

Lomovskoy O.V., Zagidullin R.S. Improving the Technology for Producing Pressure Couplings of Bushing-Housing Parts by Using a Power Drive Made of an Alloy with the Shape Memory Effect. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 4, pp. 55–64, doi: 10.18698/0536-1044-2021-4-55-64