

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Абдулкеримов И. Д., Пермяков А. А.

1. Введение

Современные тенденции обеспечения качества обработки ответственных изделий машиностроения требуют совершенствования технологических методов обработки. В работе рассмотрены корпусные детали пневмоаппаратуры из алюминиевых сплавов, которые работают под давлением до 1 МПа. Детали представляют собой отливки средней сложности с габаритными размерами от 50 до 160 мм, толщиной стенок от 2,5 до 8 мм и массой от нескольких десятков грамм до 1,5 кг. Литье под давлением (ЛПД), как малоотходный и высокопроизводительный процесс получения точных отливок сложной конфигурации с качественной поверхностью, широко применяется в машиностроении, автомобильной, тракторной, приборостроительной и многих других промышленности. Однако наряду с преимуществами ЛПД имеет один значительный недостаток – это повышенная газоусадочная пористость, и, как следствие, – низкая герметичность отливок для изделий, работающих под давлением.

В качестве присоединительных элементов корпусные детали пневмоаппаратуры имеют метрические (до М72), конические (до К 1 1/2") и трубные цилиндрические (до 2") резьбы. Получение таких резьб традиционными методами с использованием метчиков приводит к тому, что в процессе формирования резьбы происходит «вскрытие» пор. «Вскрытые» поры могут быть изолированными или образовывать систему сквозных каналов и стать причиной потери герметичности резьбового соединения. Для обеспечения герметичности резьбовых соединений в литых деталях с газоусадочной пористостью применяют различные герметики или метод вакуумной пропитки компаундами. Однако возникающие в процессе эксплуатации изделия линейные и объемные температурные расширения могут снижать работоспособность изделий из-за потери герметичности разъемных соединений.

Очевидно, при механической обработке корпусной детали необходимо в процессе формирования резьбы в корпусных деталях пневмоаппаратуры или предварительно перед ним «закрыть» эти поры и изолировать их друг от друга. Способ подготовки поверхностного слоя глухих отверстий в литых алюминиевых сплавах может основываться на применении специального деформирующего инструмента. Разработка технологии с применением деформирующего инструмента позволит получить плотный безпористый поверхностный слой и обеспечить герметичность резьбовых соединений в деталях, полученных методом ЛПД. Таким образом, обеспечение качества изготовления глухих резьбовых отверстий в корпусных деталях из алю-

миниальных сплавов с газоусадочной пористостью актуально. А обеспечение герметичности резьбовых соединений в изделиях пневмоаппаратуры, работающих под давлением до 1 МПа, является актуальной задачей.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объект исследования – технологический процесс изготовления деталей и сборки герметичных резьбовых соединений в изделиях пневмоаппаратуры из материалов с газоусадочной пористостью, работающих под давлением до 1 МПа.

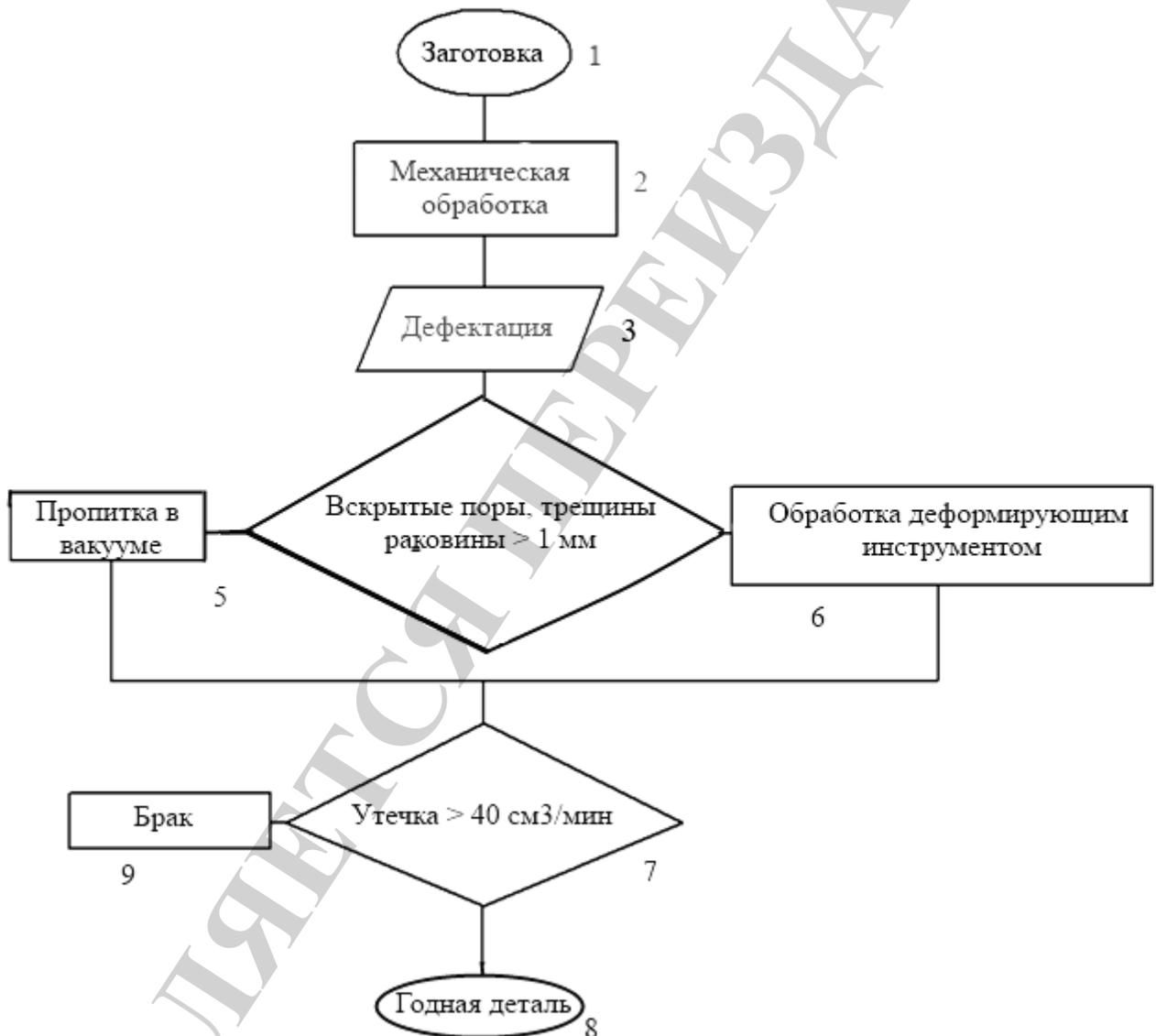


Рис. 1. Алгоритм выбора технологии обработки

Из алгоритма на рис. 1 видно, что после того как заготовка 1 пройдет механическую обработку 2, согласно технологическому процессу с применением таких видов обработки как операции сверления, зенкерования и растачивания. Деталь поступает на контрольную операцию 3 по проверке на качество поверхности методами визуального осмотра отверстия, на наличие пор и раковин, возникших после удаления механическим способом слоя металла. Если вскры-

тые поры или раковины имеют размеры по шаблону 4 более 1 мм, но не более 1,6 мм, то они отправляются на обработку методами поверхностно пластического деформирования 6. То есть с применением обработки предварительного деформирования с помощью деформирующего инструмента и дальнейшей накаткой резьбы деформирующими метчиками. Если же размеры пор и раковин меньше 1 мм, то деталь обрабатывается по существующему технологическому процессу на пропитку в вакууме компаундами 5. Именно эти методы являются наиболее эффективным способом при пропитке трещин и раковин размерами до 1 мм.

В последствии после обработки различными методами детали проверяются на стендах по измерению негерметичности 7. Деталь считается годной 8 при условии, что утечка должна не превышать $40 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Одним из наиболее проблемных мест является невыполнение условия по утечке, деталь признается не годной и брак 9 считается не исправимым.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – повышение качества изготовления глухих резьбовых отверстий в корпусных деталях из алюминиевых сплавов, полученных литьем под давлением (с газоусадочной пористостью). При этом применяется деформирующий инструмент для обеспечения герметичности резьбовых соединений в изделиях пневмоаппаратуры, работающих под давлением до 1 Мпа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести системный анализ проблемы получения герметичных разъемных соединений в корпусных деталях из алюминиевых сплавов, полученных литьем под давлением.

2. Для анализа технологических закономерностей поверхностно-пластического деформирования литых алюминиевых сплавов разработать методику экспериментальных исследований качества обрабатываемой поверхности в зависимости от количества циклов и угла деформации.

3. На основе исследования процесса поверхностно-пластического деформирования сплава АК12М2 разработать математическую модель, позволяющую определить геометрические параметры деформирующего инструмента и режимы его работы.

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработать деформирующий инструмент, обеспечивающий необходимое качество обработки поверхности резьбовых соединений в глухих отверстиях деталей из сплава АК12М2, полученных методом литья под давлением.

5. Разработать технологический процесс обработки глухих резьбовых отверстий в корпусных деталях из алюминиевых сплавов с газоусадочной пористостью для обеспечения герметичности резьбовых соединений в изделиях пневмоаппаратуры, работающих под давлением до 1 Мпа.

4. Исследование существующих решений проблемы

Наиболее производительная и имеющая большой потенциал для повышения эффективности обработки глухих резьбовых отверстий в литых алюминиевых сплавах, отмечена система обработки методами поверхностно-пластического деформирования, которая рассмотрена в ряде работ.

В [1] определен характер распределения нормальных контактных давлений вдоль поверхности контакта инструмента с обрабатываемым изделием в зависимости от градиента упрочнения поверхностного слоя. Также показано что для формирования плотного поверхностного слоя необходимы большие сдвиговые деформации, при которых происходит «залечивание» пор.

В [2] показана разработанная теоретическая модель, позволяющая рассчитывать параметры напряженно-деформированного состояния толстостенных заготовок, обработанных деформирующим протягиванием. Однако, в этом исследовании не рассмотрена обработка глухих резьбовых отверстий ввиду не возможности применения дорнования для данной операции.

В [3] представлен один из путей ее решения изготовления сборного деформирующего элемента, состоящего из стального несущего кольца и наружной твердосплавной части. Однако, этот способ невозможно применить для обработки глухих отверстий.

Авторами [4] разработан деформирующий инструмент, позволяющий обрабатывать глухие отверстия деталей из алюминиевых сплавов с газоусадочной пористостью. Но при этом не разработано технологическое обеспечение для применения данного инструмента.

Автор [5] исследовал теоретические зависимости утечки герметизирующих металлических соединений от условий обработки контактирующих поверхностей деталей. Однако при этом автор не учел влияние давлений до 1 МПа, а также влияние газоусадочной пористости и возникновения брака вследствие механической обработки.

В [6] рассмотрены конструктивные элементы торцовых уплотнений, технология изготовления, требования к монтажу, но не учтены влияния меж полостных утечек вследствие «вскрытия» пор механической обработкой.

Разработанный в работе [7] новый уплотнительный материал работает при высоких температурах, но при этом не учтено влияние вибраций возникающих во время эксплуатации изделия, а также влияние отрицательных температур.

В [8] показано, как определить крутящий момент затяжки для предварительного натяжения мишени в процессе предварительной затяжки резьбового фланца в деталях работающих под давлением. Однако, не показано влияние поверхности профиля резьбы на герметичность.

В работе [9] рассматривается резьбовое соединение для масляных трубок и обсадной колонны, и его отказ из-за ухудшения рабочих характеристик уплотнения и прочности соединения. Однако, не показано влияние удаления литейной корки и эффекта «вскрытия» пор.

Новый, не инвазивный ультразвуковой метод, который обеспечивает непосредственное средство картирования проникновения жидкости в резьбовые си-

стемы, в [10] не рассматривает способы герметизации раковин возникших вследствие механической обработки.

Мелкогабаритные метчики МЗ-М6 и обработка с их помощью деталей из алюминиевых сплавов рассматриваются в работе [11]. Но в этой работе не учтено влияние газоусадочной пористости возникающей при литье, так как рассматривается только прокат, что не является актуальным с точки зрения производства пневмооборудования. Также не учтено значение типоразмеров резьбовых отверстий применяемых в пневмораспределительных устройствах.

Из проведенного анализа литературных данных установлено, что вопрос обработки глухих резьбовых отверстий в деталях полученных литьем из алюминиевых сплавов методами поверхностно пластического деформирования является малоизученным. Также отсутствуют исследования технологических свойств алюминиевого сплава с газоусадочной пористостью полученного литьем под давлением и методики проектирования технологических операций обработки, как фактора производительности и качества обработки разъемных соединений.

5. Методы исследования

На основе системного анализа исследованы проблемы получения герметичных разъемных соединений в корпусных деталях из алюминиевых сплавов, полученных литьем под давлением. Теоретические исследования базируются на основных положениях технологии машиностроения и теории резания. На базе основных положений теории поверхностно-пластического деформирования построена методика экспериментальных исследований качества обрабатываемой поверхности в зависимости от количества циклов и угла деформации. Анализ макроструктурных снимков поверхностей, полученных до деформирования и после, выполнен с использованием программы «FemtoScan Online» (Россия).

Для исследования закономерностей механики ППД предложена следующая методика: ППД осуществляется по наружной поверхности цилиндрической литой заготовки получаемой литьем под давлением из сплава АК12М2 (рис. 2).

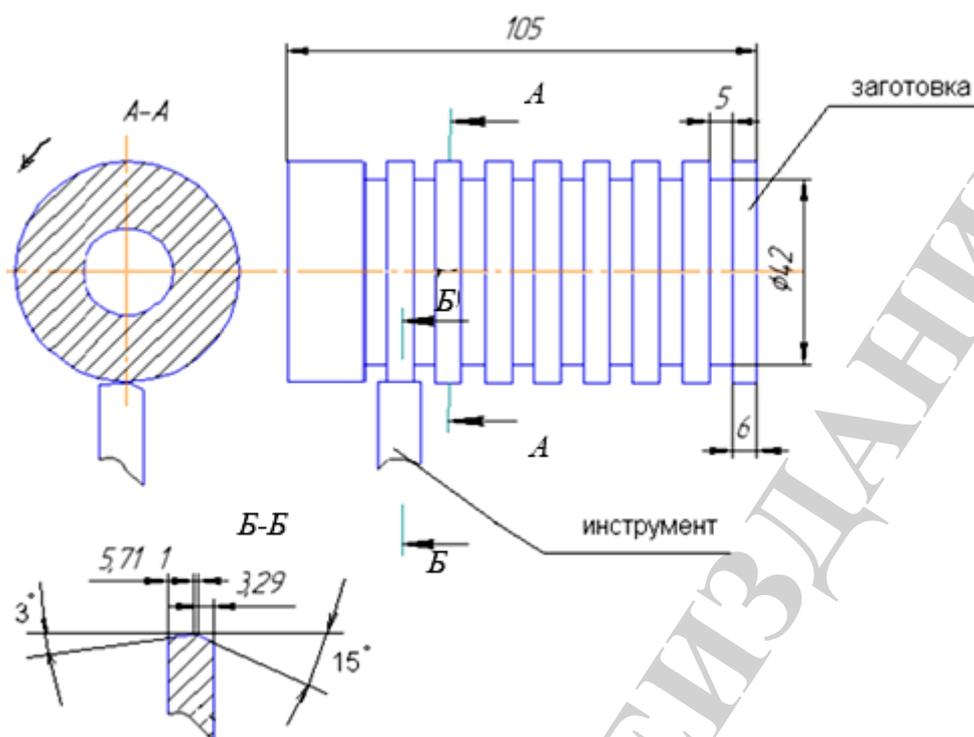


Рис. 2. Методика исследования закономерностей механики поверхностно пластического деформирования литых алюминиевых сплавов

Для обеспечения пористости такой же, как у обработанных изделий модели (заготовки) отливались при тех же технологических условиях, но с разными плотностями. Плотность варьировалась с помощью применения различных усилий прессования при литье для обеспечения адекватности модели к производственным изделиям. Параметры плотности определялись по известным зависимостям с точностью $\pm 0,001 \text{ г/см}^3$.

Обкатка проводилась с помощью деформирующих инструментов. Деформирующие инструменты были изготовлены с помощью перешлифовки прямых проходных резцов из быстрорежущей стали марки P6M5K5 с точностью $\pm 0^{\circ}10'$

6. Результаты исследований

Структурный анализ показал, что при выглаживании поверхности формируются аналогично, но при этом предварительно корка удаляется обтачиванием. Для формирования плотного поверхностного слоя необходимы большие сдвиговые деформации, при которых происходит «залечивание» пор. В исследовании применили многоцикловое (ступенчатое) ППД с числом циклов 8–15. Для этого были нарезаны выступы (пазы) для каждого из выступов на каждой из моделей применили свое количество циклов тем самым представилась возможность проанализировать влияние количества циклов на качество поверхности. Циклом считали контактное взаимодействие модели с деформирующим инструментом за один оборот шпинделя. Количество оборотов шпинделя 25 об/мин и поперечную подачу 0,05 мм/об приняли согласно рекомендациям по скорости деформирования.

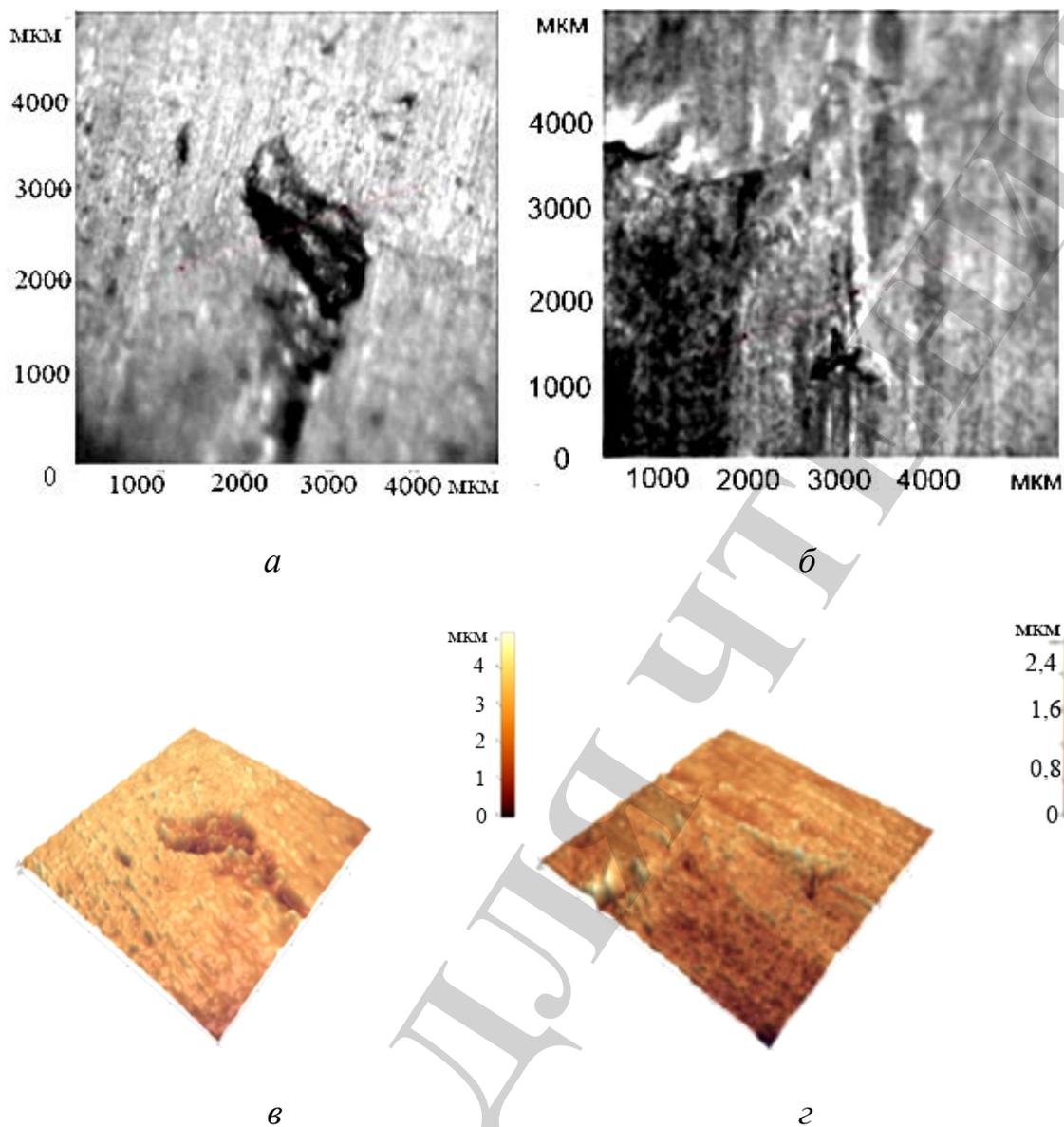


Рис. 3. Заготовка № 1 с плотностью $\rho=2,735$ г/см³ и инструментом с углом деформации 4 градуса при скорости деформации $\xi=3,77$ м/мин, $S_p=0,05$ мм/об: *а* – макрофотография «вскрытой» поры; *б* – макрофотография «закрытой» поры после деформирования; *в* – топография «вскрытой» поры обработанной в программе «FemtoScan Online» (Россия); *з* – топография «вскрытой» поры обработанной в программе «FemtoScan Online» (Россия)

В ходе проведения эксперимента были получены следующие данные (рис. 3) для заготовки с плотностью $\rho=2,735$ г/см³ и инструментом с углом деформации 4 градуса при скорости деформации $\xi=3,77$ м/мин, $S_p=0,05$ мм/об. Из макроснимков (рис. 3, *а*, *б*) и топографии (рис. 3, *в*, *з*) видно, что закрытие поры после 8-ми циклов происходит не полностью и как следствие не происходит сдвиговых деформаций. Исходя из этих данных, видим, что данные режимы не являются оптимальными. Следовательно, количество циклов должно быть увеличено.

В дальнейшем для этой же заготовки проведя ряд сравнений пор до и после деформирования. Пришли к выводу, что оптимальными режимами являют-

ся угол деформации 4 градуса при скорости деформации $\xi=3,77$ и 13 циклов нагружения (рис. 4).

Для выявления эффекта «закрытия» пор и наиболее качественной поверхности использовали визуальные методы наблюдения с помощью микротвердомера ПМТ-3 (Россия). Поры и макротрещины на поверхности заготовки были сфотографированы до и после ППД (рис. 3, 4).

На основании этих данных можем утверждать, что при ППД алюминиевого сплава АК12М2 возможно получение качественной поверхности.

Сравнивая значения, пришли к тому, что скорость деформации при холодно пластическом деформировании влияет не так значительно на качество поверхности АК12М2, как количество циклов и угол деформации.

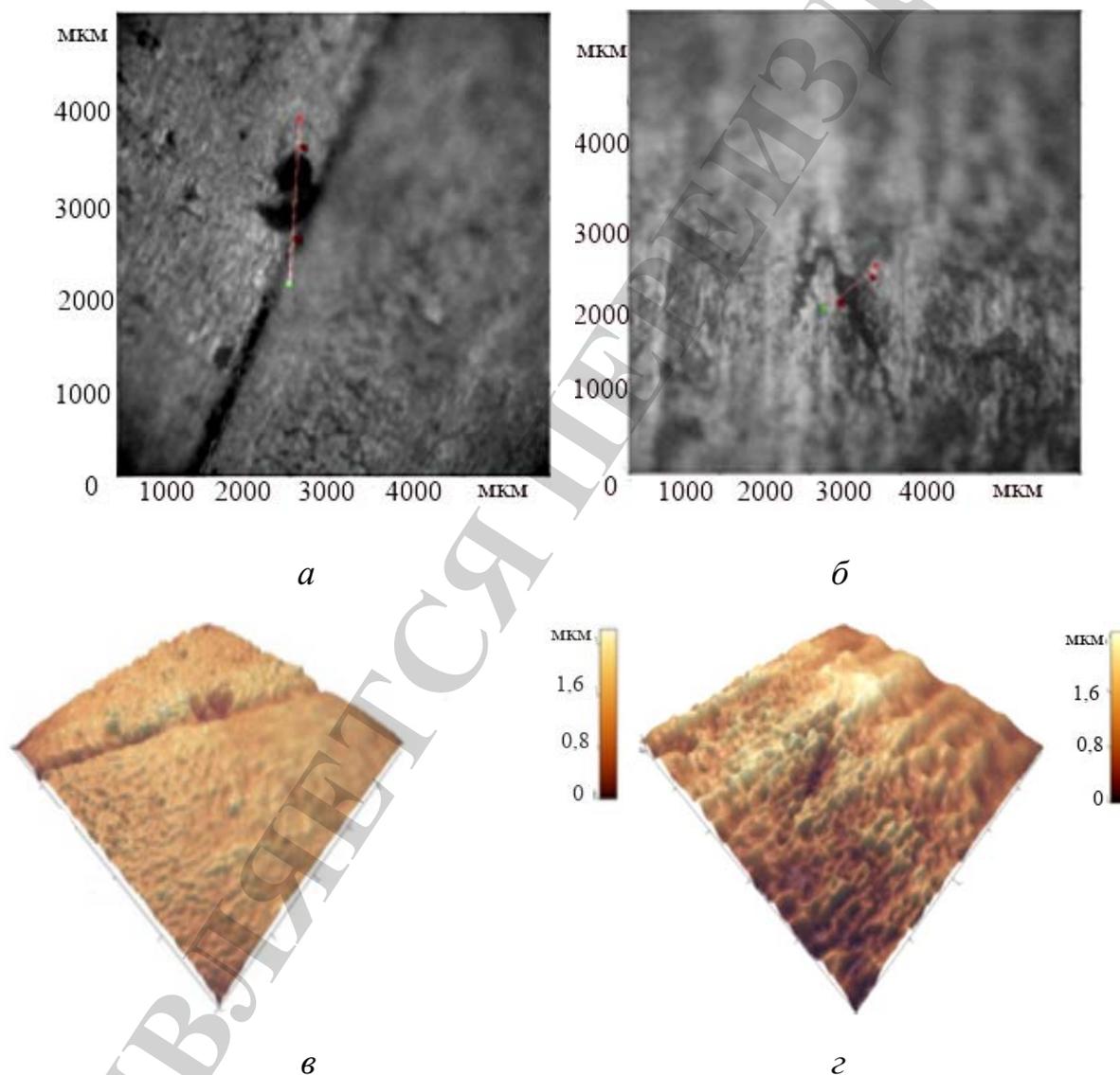


Рис. 4. Заготовка № 1 с плотностью $\rho=2.735$ г/см³ и инструментом с углом деформации 4 градуса при скорости деформации $\xi=3,77$ м/мин, $S_p=0,05$ мм/об: *а* – макрофотография «вскрытой» поры; *б* – макрофотография «закрытой» поры после деформирования; *в* – топография «вскрытой» поры обработанной в программе «FemtoScan Online» (Россия); *г* – топография «вскрытой» поры обработанной в программе «FemtoScan Online» (Россия)

С учетом выше приведенных данных и представленных результатов в работах [12–14], был создан деформирующий инструмент (рис. 5).

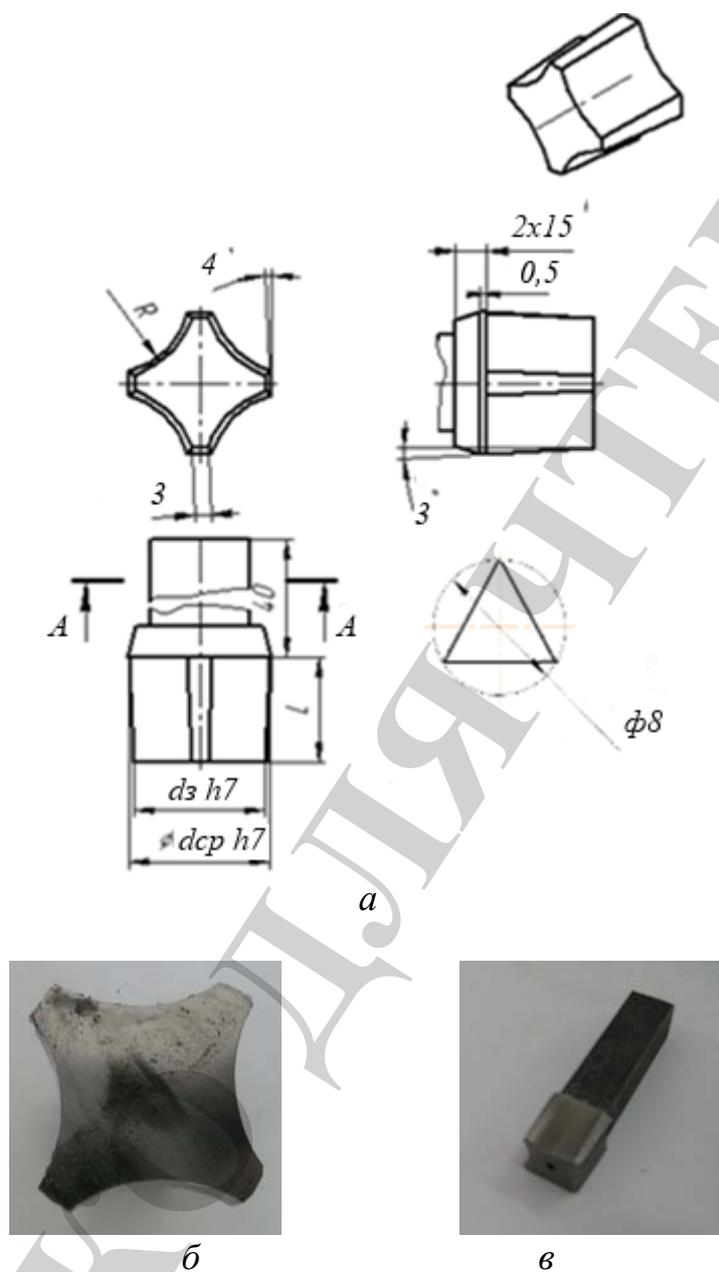


Рис. 5. Деформирующий инструмент: *а* – конструктивные размеры деформирующего инструмента; *б* – изготовленный деформирующий инструмент вид с торца; *в* – изготовленный деформирующий инструмент

Созданный инструмент состоит из хвостовика ($\phi 8$ мм) и деформирующей части (L), которая в свою очередь имеет четыре деформирующих пера. Угол наклона перьев деформирующих частей составляет 4 градуса. У деформирующей части есть заборная (d_3), деформирующая (d_{cp}), калибрующая ($d_{cp,0.5}$) и для обратного выхода инструмента из детали обратный конус.

Обработка с применением нового разработанного деформирующего инструмента детали корпус крана ПКР25, выпускаемого на ОАО «Пневматика»

(г. Симферополь, Крым) позволило получить герметичные разъемных соединений в деталях из алюминиевых сплавов.

Результаты проведенных исследований позволили дать практические рекомендации по технологическому обеспечению герметичности резьбовых соединений деталей на основе поверхностно-пластического деформирования, которые внедрены на предприятиях.

Внедрение нового (перспективного) технологического процесса обработки резьбового отверстия корпуса пневмораспределительного крана вместо пропитки в вакууме позволило повысить производительность. А также уменьшить шероховатость поверхности обработанных поверхностей соединения, а также повысить дальнейшую эксплуатационную надежность.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Разработана технологическая операция с использованием деформирующего инструмента как часть нового технологического процесса обработки глухих резьбовых отверстий в корпусных деталях из алюминиевых сплавов с газоусадочной пористостью. В базовом технологическом процессе после механической обработки детали выбраковываются в случае вскрытия пор размером свыше 1 мм (остальные подвергаются последующей пропитке компаундами). А в новом технологическом процессе вскрытые поры размером до 1,6 мм устраняются обработкой деформирующим инструментом, снижая долю брака до 5 %.

Разработаны практические рекомендации и результаты теоретических и экспериментальных исследований по повышению качества обработки глухих резьбовых отверстий деформирующим инструментом. Разработки внедрены на ОАО «Пневматика» (г. Симферополь, Крым) в технологических процессах обработки изделий пневмоаппаратуры, работающих под давлением до 1 МПа. Это позволило снизить технологическую себестоимость и получить экономический эффект в размере 18207,44 грн. за счёт снижения трудоёмкости обработки и затрат на технологические жидкости при вакуумировании.

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования связаны с тем обстоятельством, что в существующем технологическом процессе обработки детали ПКР25 вводится новый технологический переход, тем самым увеличивая долю основного времени механической обработки детали.

Opportunities. Дополнительные возможности, обеспечивающие достижение цели исследования, кроются в том что повышение качества изготовления глухих резьбовых отверстий в корпусных деталях из алюминиевых сплавов, полученных литьем под давлением (с газоусадочной пористостью). А для обеспечения герметичности их резьбовых соединений в изделиях пневмоаппаратуры, работающих под давлением до 1 МПа на производстве используют дорогостоящую пропитку деталей компаундами в вакууме, что существенно влияет на себестоимость продукции.

Threats. Сложности во внедрении полученных результатов исследования связаны с разработкой новой технологической документацией, а также с произ-

водством нового деформирующего инструмента для разных типоразмеров отверстий под резьбы.

Таким образом, SWOT-анализ результатов исследований позволяет обозначить основные направления для успешного достижения цели исследований. Среди них:

- разработать технологический процесс обработки глухих резьбовых отверстий в корпусных деталях из алюминиевых сплавов с газоусадочной пористостью.

- обеспечить герметичность резьбовых соединений в изделиях пневмоаппаратуры, работающих под давлением до 1 МПа, с использованием деформирующего инструмента для различных типоразмеров резьб;

- разработать технологический процесс обработки глухих резьбовых отверстий в корпусных деталях из алюминиевых сплавов с учетом отсутствия дальнейшей пропитки в вакууме деталей.

8. Выводы

1. На основе системного анализа проблемы обеспечение качества изготовления и получения герметичных разъемных соединений в корпусных деталях из алюминиевых сплавов, полученных литьем под давлением (с газоусадочной пористостью), установлено, что при получении резьбы традиционными методами с использованием режущих метчиков происходит «вскрытие» пор. Поры могут образовывать систему сквозных каналов и стать причиной брака (до 20 % изделий), не устранимого даже последующими методами пропитки компаундами.

2. На основе исследования технологических особенностей алюминиевого сплава АК12М2 и процесса его поверхностно-пластического деформирования определены условия обеспечения качества обрабатываемой поверхности в зависимости от количества циклов и угла деформации. Это позволило разработать математическую модель определения геометрических параметров деформирующего инструмента и режимов его работы. Режимы: количество циклов нагружения 12–13, угол деформации 4 градуса, скорость деформации $\zeta=3,77$ м/мин при поперечной подаче $S=0,05$ мм/об. Режимы обеспечили требуемое качество обработки поверхности под резьбу в глухих отверстиях деталей из сплава АК12М2.

3. Анализ результатов обработки деформирующим инструментом показал, что брак в виде неполного профиля резьбы возникает в следствии неточного расчета среднего диаметра отверстия под накатывание. Полученная модель профиля дюймовой резьбы для расчета диаметра под обработку накатыванием дала возможность определить средний диаметр отверстия под накатывание для трубных резьб первого (предпочтительного) ряда. Расчетные конструктивные и технологические параметры обработки поверхностно-пластическим деформированием сплава АК12М2 позволили создать новый деформирующий инструмент для глухих отверстий [4].

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан деформирующий инструмент, обеспечивающий необходимое качество

обработки поверхности резьбовых соединений в глухих отверстиях деталей из сплава АК12М2, полученных методом литья под давлением.

5. Разработана технологическая операция с использованием деформирующего инструмента как часть нового технологического процесса обработки глухих резьбовых отверстий в корпусных деталях из алюминиевых сплавов с газосадочной пористостью. В новом технологическом процессе вскрытые поры размером до 1,6 мм устраняются обработкой деформирующим инструментом, снижая долю брака до 5 %.

Литература

1. Sheikin, S. E. Nauchnye osnovy tehnologicheskogo upravleniia mikrorel'efom poverhnosti i uprochneniem poverhnostnogo sloia pri deformiruiushchem protiaivanii [Text]: Thesis of the Doctor of Technical Sciences / S. E. Sheikin. – Kyiv, 2007. – 337 p.

2. Tsehanov, Yu. A. Mehanika deformiruiushchego protiaivaniia kak nauchnaia osnova otsenki kachestva detalei i rabotosposobnosti instrumenta s iznosostoikimi pokrytiami [Text]: Thesis of Doctor of Technical Sciences / Yu. A. Tsehanov. – Kyiv, 1993. – 385 p.

3. Deformiruiushchii element protiazhki [Text]: Patent of the USSR № 1609623, MKI5 V 24 V 39/02, B 23 D 43/02 / Riabko O. O., Kritskii A. D., Lobanova L. V., Tsehanov Yu. A., Sheikin S. E. – Appl. № 4640784/31–2; Filed 20.01.1989; Publ. 30.11.1990, Bull. № 44. – P. 36.

4. Instrument for processing dead openings in parts made of aluminum alloys by casting [Electronic resource]: Patent of Ukraine № 56193 / Abdulkherimov I. D., Tsekhanov Yu. O., Paderin V. M., Kurkchy E. U. – Appl. № u201005976; Filed 18.05.2010; Publ. 10.01.2011; Bull. № 1. – Available at: \www/URL: <http://uapatents.com/2-56193-instrument-dlya-obrobki-glukhikh-otvoriv-v-detalyakh-z-alyuminievhikh-splaviv-otrimanikh-littyam.html>

5. Eremenkova, I. V. Tehnologicheskoe obespechenie germetichnosti nepodviznykh raziemnykh metallicheskih soedinenii [Text]: Thesis of PhD: 05.02.08 / I. V. Eremenkova. – Briansk, 2005. – 13 p.

6. Kondakov, L. A. Uplotneniia i uplotnitel'naia tehnika [Text]: Handbook / L. A. Kondakov et al.; ed. by A. I. Golubev, L. A. Kondakov. – Ed. 2. – Moscow: Mashinostroenie, 1994. – 445 p.

7. Karl, C. CFD-Simulation für den Kühlkreislauf eines Lkw-Dieselmotors [Text] / C. Karl, U. Feldhaus // MTZ – Motortechnische Zeitschrift. – 2008. – Vol. 69, № 2. – P. 116–123. doi:10.1007/bf03227279

8. Yu, Q. M. Finite Element Study on Pre-Tightening Process of Threaded Connection and Failure Analysis for Pressure Vessel [Text] / Q. M. Yu, H. L. Zhou // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 130. – P. 1385–1396. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.307

9. Araujo, A. C. Thread milling as a manufacturing process for API threaded connection: Geometrical and cutting force analysis [Text] / A. C. Araujo, G. M. Mello, F. G. Cardoso // Journal of Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 18. – P. 75–83. doi:10.1016/j.jmapro.2015.01.002

10. Vail, J. R. An ultrasonic method for measuring fluid penetration rate into threaded contacts [Text] / J. R. Vail, R. S. Mills, J. T. Stephen, M. B. Marshall, R. S. Dwyer-Joyce // Tribology International. – 2013. – Vol. 67. – P. 21–26. doi:10.1016/j.triboint.2013.06.011

11. Bratan, S. Application of Combined Taps for Increasing the Shaping Accuracy of the Internal Threads in Aluminium Alloys [Text] / S. Bratan, P. Novikov, S. Roshchupkin // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 802–808. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.115

12. Permyakov, A. Obespechenie kachestva izgotovleniia gluhih rez'bovyyh otverstii v korpusnykh detal'nykh iz aliuminievykh splavov s gazousadochnoi poristost'iu deformiruiushchim instrumentom [Text] / A. Permyakov, I. Abdulkerimov; ed. by Yu. Solomentsev // Sbornik nauchnykh trudov «Problemy proektirovaniia i avtomatizatsii v mashinostroenii». Seriya: «Proektirovanie i primenenie rezhushchego instrumenta v mashinostroenii». – Irbit: ZAO «ONIKS», 2015. – P. 84–91.

13. Permyakov, A. Tehnologicheskoe obespechenie germetichnosti rez'bovyyh soedinenii detalei na osnove poverhnostno-plasticheskogo deformirovaniia [Text] / A. Permyakov, I. Abdulkerimov // Naukovi notatky. – 2015. – Vol. 52. – P. 48–53.

14. Abdulkerimov, I. Tehnologiiia polucheniiia kachestvennykh rez'bovyyh soedinenii detalei iz siluminovykh splavov deformiruiushchim instrumentom [Text] / I. Abdulkerimov // Tavricheskii nauchnyi obozrevatel'. – 2016. – № 11 (16). – P. 207–211.