



логического 0. Это вызывает отключение реле Q0.1 и остановку ЭД механизма А.

Анализ результатов работы показывает, что уровень, качество и надежность системы управления промышленным роботом на основе микроконтроллера повысились. Наибольший эффект от применения

промышленного микроконтроллера получен в области подготовки программ управления ПР, что сделало этот процесс удобным и легко реализуемым. Любые разработанные программы управления можно сохранять в памяти программатора.

Статья поступила 05.03.2015 г.

Библиографический список

1. Сартаков В.Д., Заводовский А.Р., Чубенко Н.В. Анализ проблем при модернизации системы управления промышленным роботом // Повышение эффективности производ-

ства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2012. С. 69–73.

УДК 621.98.042

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБШИВОК И ПАНЕЛЕЙ САМОЛЕТОВ

© А.Е. Пашков¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

На основе результатов выполненных НИОКР и анализа открытых публикаций приведено описание некоторых особенностей разработанной комплексной технологии формообразования длинномерных обшивок и панелей самолетов в сравнении с зарубежными аналогами. Разработанная технология представляет сочетание операций гибки в продольном направлении, дробеударного формообразования путем обработки наружной поверхности детали, зачистки обработанной дробью поверхности и дробеударного поверхностного упрочнения. Применение данной технологии позволяет полностью исключить искажение формы детали после поверхностного упрочнения. Это достигается использованием оборудования с ЧПУ, обеспечивающего стабильное НДС детали на всех стадиях процесса. Режимы операций поверхностной обработки назначаются так, чтобы обеспечить заданную поперечную кривизну детали и компенсировать нежелательную деформацию детали при получении продольной кривизны на операции гибки.

Ключевые слова: панель; обшивка; комплексная технология; дробеударное формообразование; поверхностное упрочнение.

ON APPLICATION FEATURES OF DOMESTIC AND FOREIGN TECHNOLOGY OF AIRCRAFT SKIN AND PANEL FORMING

A.E. Pashkov

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Some features of the developed complex technology of aircraft long skins and panels forming are compared with foreign analogues on the basis of the results of performed R&D and the analysis of the open publications. The developed technology is a combination of longitudinal bending, shot peen forming by treating the outer surface of the part, conditioning of the shot peened surface and surface hardening by shot peening. Application of this technology allows to eliminate the distortion of parts after peening. This is achieved through the use of CNC equipment ensuring stable VAT of parts at all stages of the process. Modes of surface treatment operations are set in such a manner as to achieve a desired transverse curvature of a part and compensate undesired deformation of a part when it obtains longitudinal curvature under bending.

Keywords: panel; skin; complex technology; shot peen forming; surface hardening.

Задача формирования новых компетенций российской авиационной промышленности в области производства крупногабаритных панелей, отмеченная как приоритетная в ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002–2010 годы и на период до 2015 года», на сегодняшний день в масштабах отрасли не имеет полного решения. Несмотря на очевидные макроэкономические изменения по-

следних лет, в технологических кругах ряда организаций по-прежнему сохраняется тенденция к решению проблемных вопросов производства отечественных самолетов путем приобретения зарубежного оборудования [4]. В тоже время в отечественной практике имеются готовые решения, позволяющие реализовать технологию формообразования панелей и обшивок с показателями, не уступающими зарубежным. Данные

¹Пашков Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры оборудования и автоматизации машиностроения, тел.: +79148876386, e-mail: aepashkov@mail.ru
Pashkov Andrei, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Equipment and Automation of Mechanical Engineering, tel.: +79148876386, e-mail: aepashkov@mail.ru



решения получены при выполнении проектов в рамках Мероприятий по государственной поддержке развития кооперации российских вузов и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства. Описание разработки в сопоставлении с зарубежными аналогами приведено в работе [2].

В российской авиационной промышленности на заводах КАЗ (г. Казань), ЗАО «Авиастар-СП» (г. Ульяновск), ВАСО (г. Воронеж), КНААЗ (г. Комсомольск-на-Амуре) формообразование обшивки и панелей крыла в основном осуществляется методом прессовой гибки с последующей доводкой контура детали обдувкой дробью на ручных дробеструйных установках. После формообразования обшивки и панели подвергаются поверхностному упрочнению дробью мелких фракций. На КАЗ и ВАСО упрочняющая обработка производится в дробеструйных обитаемых камерах (ДОК); на ЗАО «Авиастар-СП» применяется механизированная дробеструйная установка типа УДМ, разработанная НИАТ в 80-х гг. прошлого века; КНААЗ располагает более современной программной дробеструйной установкой, изготовленной ОАО «Электромеханика». Недостатками применяемой технологии формообразования являются низкая точность контура деталей при наличии огранки, высокая трудоемкость и зависимость от квалификации исполнителей. Упрочняющая дробеобработка в большинстве случаев приводит к искажению ранее полученной формы детали. Проблема усугубляется недопустимостью правки упрочненных деталей изгибом в связи с высокой вероятностью образования трещин.

Для решения задачи создания технологии формообразования обшивки и панелей отечественных самолетов авторами [4] предлагается использовать зарубежные методы, реализуемые одно- и двусторонней полосовой дробеударной обработкой без применения прессовых методов. В указанной публикации приведено описание опытных работ, выполненных на КАЗ для исследования возможности применения данных технологий. С этой целью была изготовлена морально устаревшая дробеструйная установка контактного типа, спроектированная в 1987 г. на Самарском АПО на базе опытной установки УДФ-2, ранее разработанной для формообразования первых комплектов обшивки крыла самолета Ту-204 Иркутским политехническим институтом (в настоящее время и далее по тексту – Иркутский национальный исследовательский технический университет – ИРНИТУ). На этой установке была апробирована схема формообразования, запатентованная фирмой Boeing в 1982 г. и заключающаяся в интенсивной двусторонней дробеобработке кромок с последующей односторонней полосовой обработкой со стороны теоретического контура [5]. В качестве объекта исследования была использована первая верхняя обшивка крыла самолета Ту-214. Режимы формообразования определялись на основе обработки образцов аналогично способу фирмы Boeing; обработка детали выполнялась дробеструйным аппаратом контактного типа. Формообразование осуществлялось в два этапа с промежуточным контролем шаблонами

контура сечения (ШКС). Авторы утверждают, что полученная форма обшивки соответствовала теоретической с допустимыми отклонениями, однако не приводят результаты общего контроля формы детали на стенде, имитирующем форму крыла, что ставит под сомнение полученные результаты. Следует отметить, что аналогичные исследования проводились ИРНИТУ в 1984–1988 гг. по заказу ОКБ им. А.Н. Туполева (ММЗ «Опыт»).

Переходя к анализу комплексной технологии формообразования-упрочнения обшивки и панелей, разработанной ИРНИТУ и НИАТ для Иркутского авиационного завода – филиала ОАО «Корпорация «Иркут» как альтернативной зарубежным разработкам, авторы допускают ряд некорректных высказываний, которые, очевидно, свидетельствуют о полном непонимании ее сущности. По ходу данной статьи приведем ряд цитат из работы [4].

«Обшивки и панели, формообразованные по комплексной технологии, имеют значительно меньший ресурс по сравнению с обшивками и панелями, формообразованными только дробью».

Не приводя описания условий проведения испытаний, авторы в таблице 1 своей работы дают сравнение долговечности образцов, обработанных на установке MPR 25000 фирмы Wheelabrator, и комплектом оборудования ИРНИТУ. Образцы для проведения усталостных испытаний, обработанные с применением упомянутого комплекта оборудования, ни ИРНИТУ, ни ИАЗ сторонним организациям не передавались. В тоже время, из ранее проведенных совместно с ОКБ им. А.Н. Туполева исследований и многочисленных открытых публикаций следует, что на усталостную долговечность образцов, обработанных различными методами, превалирующее влияние оказывает финишная операция поверхностного упрочнения. Влияние предыдущих операций технологического процесса в большинстве случаев незначительно.

«Данная технология не позволяет уйти от операции доводки, т.к. упрочнение после прессовой гибки приводит к неопределенным повороткам».

Прежде всего, отметим, что целью разработки комплексной технологии формообразования-упрочнения обшивки и панелей являлось полное исключение искажения формы детали после поверхностного упрочнения. Это достигается использованием оборудования с ЧПУ, обеспечивающим стабильное НДС детали на всех стадиях процесса.

Для пояснения физической сущности способа компенсации коробления детали при упрочнении приведем некоторые теоретические выкладки, использованные при разработке технологических инструкций.

При выборе режимов упрочняющей обработки для наружной и внутренней сторон детали обеспечивается сохранение поперечной кривизны за счет выполнения условия

$$M_x^{\text{in}} = M_x^{\text{out}}.$$

Продольная кривизна детали κ_y^e ($\kappa = 1/R$, где R – радиус кривизны), образующаяся в ходе упрочнения, вычисляется при помощи зависимости



$$\kappa_y^e = (M_j^{in} - M_j^{out}) / EI_x.$$

Здесь M_j^{in}, M_j^{out} ($j = x, y$) – компоненты изгибающего момента, действующие с наружной и внутренней сторон детали соответственно, E – модуль упругости первого рода; I_x – момент инерции поперечного сечения расчетного участка детали.

Продольная кривизна κ_y^{f-s-e} , возникающая в результате выполнения последовательности операций «дробеударное формообразование – зачистка – упрочнение», определяемая суммой

$$\kappa_y^{f-s-e} = \kappa_y^{f-s} + \kappa_y^e,$$

где κ_y^{f-s} – продольная кривизна детали, образующаяся в ходе обработки в последовательности «формообразование – зачистка», компенсируется при выполнении операции гибки в продольном направлении (раскатки ребер). Кривизна κ^{ls} , формируемая данной операцией, определяется как

$$\kappa^{ls} = \kappa_y + \kappa_y^{f-s-e},$$

где κ_y – требуемая продольная кривизна детали.

Таким образом, методика, используемая при расчете режимов обработки в комплексном технологическом процессе «гибка в продольном направлении – дробеударное формообразование путем обработки наружной поверхности детали – зачистка обработанной дробью поверхности – дробеударное поверхностное упрочнение» позволяет назначить режимы всех операций поверхностной обработки так, чтобы обеспечить заданную поперечную кривизну детали κ_x и компенсировать нежелательную деформацию детали при получении требуемой продольной кривизны κ_y на операции гибки (раскатки ребер).

«В силу конструктивных особенностей дробемета контактного типа энергия воздействия факела дроби по высоте непостоянна, поэтому четко назначать режим невозможно».

Рабочим органом установки, использованной авторами цитаты, является дробеметный аппарат контактного типа с пневматической системой циркуляции дроби. Именно этому устройству присущи отмеченные недостатки, из-за которых в ИРНТУ отказались от таких конструкций в 90-х гг. прошлого века. В работе [3] приведено описание запатентованного дробеметного аппарата ЗД400М, используемого в качестве рабочего органа установки УДФ-4 и обеспечивающего стабильные параметры факела дроби за счет полностью механической системы дробеобращения.

«Скорость вылета дроби из дробемета составляет 60–80 м/с. Энергии дроби при такой скорости недостаточно для формообразования толстостенных обшивок и панелей».

Рабочий диапазон скорости дроби определяется частотой вращения дробеметного колеса и для используемого на ИАЗ дробеметного аппарата ЗД400М составляет 5–167 м/с. Однако, как показывает практика формообразования обшивок и панелей дробью диаметром 3 мм, для формообразования большин-

ства деталей достаточно скорости дроби до 50 м/с. Для местных конструктивных усиления, толщина которых может достигать 20–60 мм, целесообразно применять подгибку на прессе. Увеличение диаметра и скорости дроби в данном случае нерационально, т.к. рост глубины отпечатков значительно увеличивает время обработки на операции зачистки.

«Дробеметом контактного типа невозможно формообразовать панели вафельной конструкции, лючковые панели».

Формообразование дробью вафельных панелей представляет проблему как при односторонней, так и при двусторонней обработке в связи со стеснением деформации полотна карманов, приводящим к местной потере устойчивости полотна (хлопунам). В данном случае возможно применение комбинированных методов, сочетающих дробеобработку наружной поверхности полотна с раскаткой/посадкой ребер. Технология формообразования лючковых панелей самолетов Ту-204 комбинированным методом, включающим операции раскатки ребер, подгибки окантовок и дробеобработки аппаратом контактного типа, была освоена ИРНТУ в 1988 г. на Самарском АПО. В 1991 г. по данной технологии были изготовлены аналогичные детали самолета Ту-334 на КиАПО.

Значительная часть публикации [4] посвящена описанию достоинств установки MPR 25000 фирмы Wheelabrator. Продолжим цитирование.

«Данная установка и технология фирмы Wheelabrator обеспечивают в автоматическом режиме получение 95% требуемой кривизны. При последующей отработке на 3–5 комплектах обшивок и корректировке управляющих программ возможно получить в автоматическом режиме до 100% требуемой кривизны».

Прежде всего, необходимо отметить, что фирма Wheelabrator – транснациональная корпорация США – широко известна как производитель оборудования для дробеударной обработки, но она не является разработчиком технологии формообразования панелей. Очевидно, что заявление о возможности получения 100% контура детали в автоматическом режиме исходит от поставщиков, средства которых для достижения своих целей хорошо известны. Об этом же свидетельствует опыт НИАТ, проработавшего в 2007 г. вопрос поставки аналогичной установки на КНААЗ, не состоявшейся по причине неспособности представителей фирмы ответить на ряд технологических вопросов.

Управляющая программа, рассчитанная на достижение 100% контура детали, действительно может быть сформирована на основе опытной отработки процесса, однако, технологическая наследственность и разброс механических свойств заготовок могут привести к различным результатам программной обработки, в том числе к «перегибанию» и необходимости последующего «разгибания» образованной детали. В связи с этим операция дробеударного формообразования, разработанная ИРНТУ, включает предварительную обработку, обеспечивающую 70–90% от требуемого контура в автоматическом режиме, промежу-



точный контроль формы и окончательную обработку с учетом результатов контроля. Обеспечение условий для операционного контроля формы деталей является одним из главных преимуществ технологии формообразования обшивок и панелей на установках контактного типа и достигается применением оригинальной системы фиксации, позволяющей закрепить заготовку в продольном теоретическом контуре.

Отсутствие в оборудовании фирмы Wheelabrator управляемой системы фиксации детали многократно усложняет процесс формообразования деталей двойной кривизны. Отметим, что оснащение установки проходного типа такой системой достаточно проблематично, т.к. стрела продольного прогиба длинномерных деталей двойной кривизны может быть весьма значительной, например, для Ту-204 она составляет порядка 800 мм на длине 17 м. Как свидетельствует практический опыт, закрепление детали в контуре, отличающимся от теоретического, приводит к неуправляемому возникновению упругих напряжений (заневоливание). Контроль формы такой детали в процессе формообразования с применением шаблонов также невозможен, поскольку форма поперечных сечений, полученная в положении не соответствующем теоретическому, при установке детали в это положение (на комплектующем стенде или стапеле) будет утрачена. Для решения данной проблемы необходимо вводить в процесс формообразования многократные и очень трудоемкие контрольные операции с транспортировкой детали на стенд (комплектующий стапель).

Утверждение о возможности *«проводить формообразование в основном мелкой дробью диаметром 0,7 мм, что практически исключает зачистку»*, очевидно также сделанное со слов поставщиков, является еще одной иллюзией авторов. Как показано в работе [2], применение операции зачистки после дробеударного формообразования является неизбежным, и это признается авторами зарубежных публикаций.

Следует отметить и отношение авторов [4] к такому важнейшему показателю, как достижимая точность образуемых деталей. В данной публикации применительно к зарубежному оборудованию сведения о точности деталей полностью отсутствуют. Однако в данном вопросе можно сослаться на ряд известных работ, из которых следует, что применение установок проходного типа решает проблему механизации операции лишь предварительного формообразования, а для окончательного формирования контура необходима ручная доводка [2]. Очевидно также, что заявленное время формообразования в 1,5–2 часа для обшивки длиной 12 м можно отнести к предварительной обработке детали, а не ко всему циклу ее формообразования, включающему доводочные работы.

Таким образом, использование отечественными предприятиями установки типа MPR или другого подобного оборудования иностранного производства, обозначенное в [4] как *«импульс в развитии технологии формообразования и упрочнения дробью»* в реальности приведет к ряду трудноразрешимых проблем и, в конечном итоге, закончится полной технологиче-

ской зависимостью от иностранных разработчиков. На сегодняшний день практическим монополистом в области дробеударного формообразования является компания MIC (Metal Improvement Company, США), известная своей закрытостью.

Создание альтернативной отечественной технологии формообразования обшивок и панелей было начато в 80-х гг. прошлого века в рамках комплексной программы «Авиационная технология» Минвуза РСФСР и Министерства авиационной промышленности (МАП) СССР по направлению 01.01 «Пластическое формообразование и упрочнение тонкостенных деталей авиационной техники».

Начиная с 2010 г. благодаря инвестициям со стороны государства и ОАО «Корпорация «Иркут» разработка получила существенное развитие. В 2010–2012 гг. был создан комплекс оборудования с ЧПУ, включающий установки: УДФ-4 для дробеударного формообразования и зачистки; И2222БМ для упругопластической гибки обшивок в продольном направлении; УМПД-2 для местного пластического деформирования (раскатки ребер) панелей; УДП-2-2,5 (модернизированная) для дробеударного упрочнения длинномерных деталей.

Согласно информации, полученной по официальному запросу НИАТ, в 2012–2013 гг. на ИАЗ в рамках кооперации с ТАНТК им. Г.М. Бериева с применением разработанной технологии было изготовлено 80 панелей крыла самолета БЕ-200 со следующими характеристиками:

– длина, мм	4960–11220
– ширина (max), мм	540–1060
– толщина, мм	2,5–49
– время обработки на установке УДФ-4, час.	5–9
– отклонение контура (не более), мм	0,8.

В настоящее время выполняются работы по разработке и внедрению программных технологических операций процесса. Для расчета технологических параметров и подготовки управляющих программ разработано и проходит апробацию специальное программное обеспечение [1].

Проводятся работы по автоматизации операций контроля формы поперечных сечений детали и разработке на этой основе управляющих программ доводочной обработки. В 2015 г. установка УДФ-4 будет оснащена системой фиксации, автоматически настраиваемой на требуемый контур детали, устройством автоматической смены уплотнений выходного окна дробеударного аппарата и новой зачистной головкой револьверного типа. Решение данных вопросов позволит осуществить переход к полной автоматизации процесса.

В 2014 г. в рамках научно-практического семинара «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники», проводившегося на базе ИРНТУ и ИАЗ с участием представителей ОАК и ряда авиастроительных предприятий, была проведена демонстрация обработки в программном режиме конструктивно-подобных образцов (КПО) обшивки длиной 3000 мм, представляющих фрагменты обшивки



нижней панели крыла самолета БЕ-200 знакопеременной двойной кривизны в районе перегиба. Контроль контура образцов в процессе обработки выполнялся шаблонами контура сечения, по окончании – на комплектующем стапеле в свободном состоянии (см. табл.).

Характеристика процесса обработки КПО

Наименование операции	Оборудование	Машинное время, мин.	Отклонение контура, мм
Гибка-прокатка	И2222БМ	5,2	–
Дробеударное формообразование	УДФ-4	5,7	0,1–0,4
Зачистка	УДФ-3	10,7	0,3–0,7
Дробебетное упрочнение	УДП-2-2,5	14,8	–
ИТОГО:		36,4	–

При контроле на комплектующем стапеле отклонения контура КПО составили 0,3–0,7 мм.

По полученным данным можно оценить суммарное машинное время формообразования обшивки длиной 12 м в 2,4 часа. С учетом разделения процесса на операции пропускная способность технологической линии может обеспечить изготовление подобной детали примерно за 1–1,5 часа.

Разработанную технологию формообразования упрочнения обшивок и панелей самолетов отличают следующие преимущества:

- разделение технологии на достаточно простые, легко управляемые и контролируемые операции обеспечивает стабильность и точность процесса и дает возможность изготавливать детали различной конструкции;
- определение параметров обработки на основе единой модели формирования напряженно-деформированного состояния позволяет минимизировать нежелательные деформации деталей;
- использование дробебетных аппаратов контактного типа со сменными уплотнительными устройствами делает дробеударное формообразование подобным фрезерованию со сменой инструмента, что облегчает задачу применения программного управления;
- применение зачистных головок со сменным инструментом, высота которого аналогична высоте по-

лос обработки дробебетного аппарата, существенно упрощает задачу программирования операции зачистки;

– возможность свободного доступа к детали для контроля ее формы в процессе обработки позволяет добиться высоких показателей точности контура дета-

ли и облегчает задачу отработки управляющих программ формообразования и зачистки;

– применение системы фиксации, настраиваемой в соответствии с продольным теоретическим контуром детали, обеспечивает возможность выполнения технологических переходов предварительного формообразования, зачистки и окончательной доводки контура за один установ детали, что значительно снижает вспомогательное время обработки.

Таким образом, на сегодняшний день созданы все условия для импортозамещения по одной из критических технологий авиационного – формообразование крупногабаритных обшивок и панелей самолетов.

**Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе «Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.*

Статья поступила 06.05.2015 г.

Библиографический список

1. Андрияшина Ю.С. Автоматизированный расчет технологических параметров дробеударного формообразования крупногабаритных панелей // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 6 (2). С. 305–308. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2013/2013_6_305_308.pdf (03 апр. 2015).

2. Пашков А.Е. Технологический комплекс для формообразования длинномерных панелей и обшивок на базе отечественного оборудования // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1 (5). С. 1528–1535. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2014/2014_1_1528_1535.pdf (03 апр. 2015).

3. Пашков А.Е., Герасимов В.В., Пашков А.А. О повышении эффективности дробебетной установки контактного типа // Вестник ИрГТУ. 2013. № 10 (81). С. 46–51. [Электронный

ресурс]. URL: http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/?ru/journals/2013/10 (06 апр. 2015).

4. Сысков В.Н., Зиннатулин А.В. Технология и оборудование для формообразования обшивок и панелей крыла самолета // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности. АКТО-2014: материалы междунар. научн.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. С. 342–347. [Электронный ресурс]. URL: http://www.kai.ru/science/konf/akto/akto14_v1.pdf (06 апр. 2015).

5. Shot Peen Forming of Compound Contours // US Patent № 4329862 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.google.com/patents/US4329862> (07 апр. 2015).