

УДК 621.98.042

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПАНЕЛЕЙ САМОЛЕТОВ

© 2013 А.Е. Пашков

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет

Поступила в редакцию 29.11.2013

Приведены результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по созданию комбинированной технологии, включающей операции упругопластического деформирования и дробеударной обработки, комплекса оборудования с ЧПУ, нормативно-методического и программного обеспечения для формообразования крупногабаритных панелей летательных аппаратов.

Ключевые слова: *панель, обшивка, дробеударное формообразование, гибка-прокатка, раскатка ребер, дробебетная установка*

Одной из приоритетных задач, сформулированных в Федеральной целевой программе «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года», является формирование новых компетенций российской авиационной промышленности в области производства крупногабаритных панелей. Формообразование крупногабаритных листовых и подкрепленных панелей самолетов с отклонениями контура не более 0,5 мм представляет серьезную технологическую проблему, связанную со следующими особенностями деталей. Во-первых, обводообразующие поверхности самолетов имеют малую кривизну, для получения которой нужна общая деформация, соизмеримая с упругой составляющей. Во-вторых, большие габаритные размеры панелей и наличие внутреннего набора затрудняют применение методов формообразования одновременно всей поверхности детали с использованием оснастки, сопряженной с ее формой. В связи с этим при изготовлении панелей и обшивок наибольшее распространение получили методы локального деформирования, к которым относятся свободная гибка и дробеударное формообразование (ДУФ). В основе процесса ДУФ лежит увеличение размеров поверхностных слоев ударами шариков, что дает возможность формообразования листовых деталей без использования деформирующего инструмента. При этом формообразование путем обработки дробью наружной (аэродинамической) поверхности детали применимо

только к монолитным ребристым панелям, для которых поверхность, близкая к цилиндрической, может быть получена, когда жесткость оребрения значительно больше жесткости полотна. Детали типа обшивок, не имеющие силового набора, при такой обработке приобретают бочкообразную форму. Для получения у деталей типа обшивок крыла поверхностей заданной формы применяют такие технологические приемы, как обработка с заневоливанием, которое позволяет увеличить кривизну в направлении предварительного упругого изгиба, а также двухстороннюю дробеобработку в свободном состоянии [1]. Последний прием лежит в основе технологии, запатентованной фирмой Боинг, как способ формообразования панелей крыла знакопеременной двойной кривизны [2]. Технологический комплекс для формообразования панелей крыла включает две дробебетные установки, разработанные фирмой Wheelabrator, первая из которых предназначена для получения продольной кривизны двухсторонней обработкой кромок дробью диаметром 3,2 мм и оснащена четырьмя подвижными дробебетными аппаратами (по два с каждой стороны). На второй установке выполняется обработка наружной поверхности панели дробью диаметром 1,12 мм. Для этой цели используются 12 стационарных дробебетных аппаратов (по шесть с каждой стороны для формообразования панелей левых и правых частей крыла).

Особенностью зарубежной технологии ДУФ является то, что она выполняется в закрытых камерах, а окончательная форма деталей достигается только по завершению процесса. Поэтому для подготовки управляющих

Пашков Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: pashkov_ae@irkut.ru; pashkov@istu.edu

программ необходимо проведение большого объёма опытных работ на натуральных деталях с привлечением зарубежных специалистов или с отправкой деталей фирме-разработчику. Такие затраты на подготовку производства не гарантируют достижения требуемой точности. Как отмечается в [2], достигаемая точность контура образуемых деталей составляет 1,3 мм с приложением допустимой нагрузки 45,36 кг на сечение. Это означает, что применение дорогостоящего и технически сложного оборудования решает проблему механизации операции лишь предварительного (чернового) формообразования, а для окончательной доводки формы необходимо ручное оборудование и набор контрольной оснастки. К тому же, как отмечается в [3], процесс формообразования зоны перегиба является длительным и многошаговым, что может сделать эту технологию узким местом в производстве.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию отечественной технологии формообразования крупногабаритных панелей ведутся в Иркутском государственном техническом университете с 80-х годов прошлого века по заказу ОКБ им. А.Н. Туполева. Впервые технология ДУФ была апробирована в опытном производстве панелей самолетов ТУ-204 и ТУ-334 в период с 1987 по 1991 гг. Работы были продолжены с 1997 г. по заказу Иркутского авиационного завода (ИАЗ), и в 2000 г. технология формообразования панелей крыла была внедрена в производство самолета БЕ-200.

Главным преимуществом используемого способа комбинированного формообразования является разделение процесса получения конечной формы детали на достаточно простые, легко управляемые и контролируемые операции образования продольной и поперечной кривизны. Для формообразования продольной кривизны деталей типа обшивок используется гибка на универсальном прессовом или валковом оборудовании. Для монолитных ребристых

панелей данная задача решается раскаткой рёбер. Поперечная кривизна в обоих случаях достигается обработкой дробью наружной поверхности детали [4]. Основным отличием разработки от зарубежных аналогов является использование установок контактного типа для выполнения операций ДУФ и последующей зачистки. В 2012 г. на Иркутском авиазаводе была внедрена четвертая модель такой установки – УДФ-4 (рис. 1а).

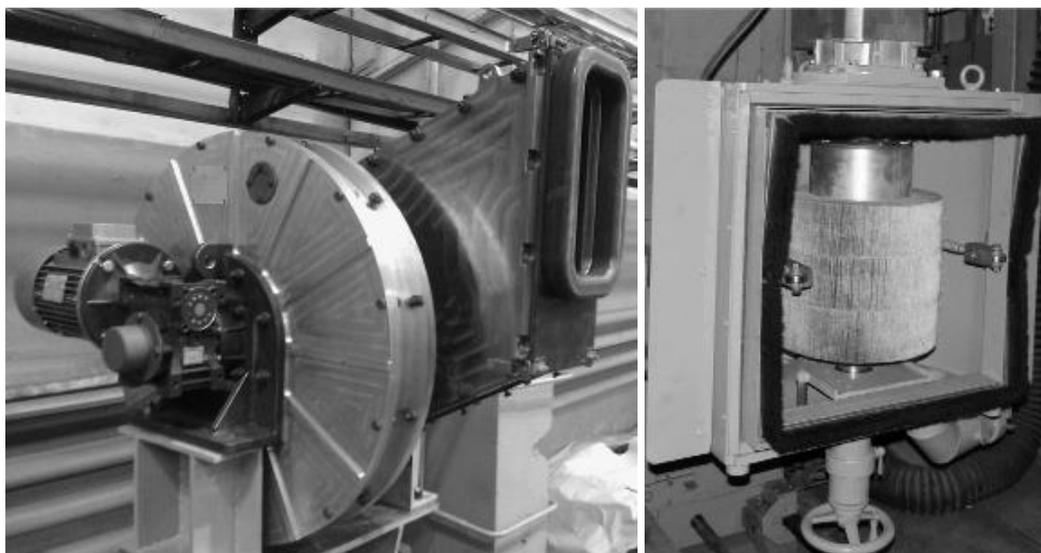
Основным рабочим органом установки УДФ-4 является запатентованный дробемётный аппарат контактного типа со сменными уплотнительными устройствами высотой 100, 200, 300 и 400 мм (рис. 2б) [5, 6]. Применяемая схема обработки делает ДУФ подобным фрезерованию со сменной инструмента, что облегчает задачу применения программного управления и обеспечивает возможность свободного доступа к детали для контроля её формы в процессе обработки. Для зачистки поверхности детали разработана специальная зачистная головка с инструментом в виде сменных оправок с лепестковыми кругами для обработки полосами, ширина которых аналогична полосам, оставляемым дробеметным аппаратом (рис. 2в).

Для реализации автоматизированной гибки-прокатки длинномерных обшивок крыла с перегибом по длине разработана и запатентована специализированная листогибочная машина путем модернизации существующей трехвалковой машины И2222Б [5] (рис. 2). Изменение углового положения валков относительно детали обеспечивается поворотным основанием. Точность позиционирования валков в пределах 0,1 мм достигается применением средств автоматизации фирмы Siemens.

Для получения продольной кривизны деталей типа ребристых панелей создана и запатентована установка местного пластического деформирования методом раскатки ребер УМПД-2 [6] (рис. 3).



а)



б)

в)

Рис. 1. Установка УДФ-4 (а) с рабочими органами: дробеметным аппаратом ЗД400М (б) и зачистная головка ЗГ-2 (в)

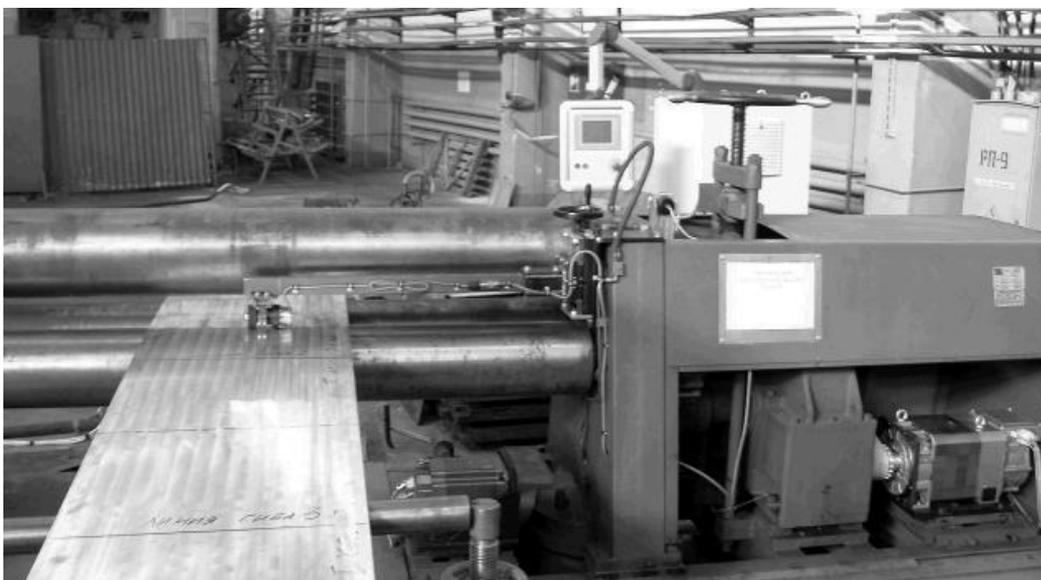


Рис. 2. Листогибочная машина И2222БМ



Рис. 3. Установка местного пластического деформирования УМПД-2

При определении параметров комбинированного технологического процесса, реализуемого в последовательности «гибка (раскатка ребер) – ДУФ – зачистка – упрочнение» учитывается наличие в процессе таких случайных факторов, как разброс механических свойств материала и технологическая наследственность. В связи с этим процесс ДУФ реализуется в две операции: предварительное формообразование детали с целью получения 70-90% от требуемой кривизны, выполняемое в программном режиме, и доводку формы в ручном режиме. Как показывает практический опыт, доводочная операция, которая подобна доводке детали после прессовой гибки ручными дробеструйными установками, достаточно легко реализуется оператором и не требует от него высокой квалификации. Таким образом, ещё одним преимуществом предлагаемой технологии является то, что за один установ детали выполняется программная предварительная обработка, доводка формы с ручным управлением и зачистка обработанной поверхности. Это позволяет добиться значительной экономии вспомогательного времени, затрачиваемого на транспортировку и установку крупногабаритных и маложестких деталей, что также представляет непростую техническую задачу, особенно когда речь идёт о серийном производстве.

Определение технологических параметров комбинированного процесса формообразования выполняется для расчетного участка детали с усредненными с заданной точностью геометрическими параметрами – кривизной и приведенной толщиной следующим образом. Взаимосвязь процессов образования продольной и поперечной кривизны детали определяется уравнением

$$\kappa_y^{mp} = \kappa_{ДУФy} - \kappa_{УПФy}, \quad (1)$$

где κ_y^{mp} – требуемое значение продольной кривизны образуемого участка детали ($K=1/R$, R – радиус кривизны); $\kappa_{ДУФy}$ – продольная кривизна, образуемая при ДУФ, выполняемом с целью получения требуемой поперечной кривизны κ_x^{mp} ; $\kappa_{УПФy}$ – продольная кривизна, образуемая при упругопластическом формообразовании (УПФ) гибкой или раскаткой ребер. Расчет компонент кривизны нейтрального слоя деталей производится при помощи следующей зависимости

$$\kappa_j = \frac{12M_j}{EK_{НДС}H_{np}^3}; \quad j, k = x, y \quad (2)$$

где M_j – изгибающий момент, действующий в процессе ДУФ на деталь в рассматриваемом направлении; $K_{НДС}$ – коэффициент вида напряженно-деформированного состояния (НДС), характеризующий отличие зависимости между компонентами напряжений и деформаций в рассматриваемом направлении при сложном НДС от зависимости, отвечающей одноосному НДС в области упругих деформаций, при котором $K_{НДС}=1$. При изгибе пластин $K_{НДС}=1,125$; H_{np} – приведенная толщина поперечного сечения детали типа пластины, эквивалентная по моменту инерции реальной детали.

Очевидно, что увеличение скорости дробы повышает производительность процесса ДУФ, однако при этом увеличивается глубина отпечатков, определяющая припуск, удаляемый зачисткой и, как следствие, возрастает трудоёмкость данной операции. Отсюда вытекает задача нахождения такого сочетания режимных параметров технологической последовательности «ДУФ – зачистка», при которой суммарное время обработки было бы минимальным. Не останавливаясь подробно на методике расчета режимов ДУФ и зачистки, которая приведена в [7], проиллюстрируем данную задачу расчетными зависимостями времени обработки в технологической последовательности «ДУФ-зачистка» от скорости дробы (рис. 4). Искомой в данном случае является скорость дробы, обеспечивающая минимальное время обработки в последовательности «ДУФ – зачистка».

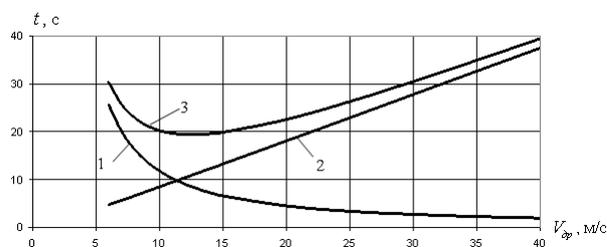


Рис. 4. Зависимость времени обработки от скорости дробы при ДУФ (1), зачистке (2) и в последовательности «ДУФ-зачистка» (3) при обработке участка детали толщиной $H=4$ мм из алюминиевого сплава В95пчТ2

Расчет параметров операций УПФ выполняется по известным методикам [5], [8] на основе уравнения (1) и найденного значения продольной кривизны $\kappa_{ДУФy}$, образуемой в районе рассматриваемого сечения при получении требуемой поперечной кривизны κ_x^{mp} посредством ДУФ. Для этого в формулу (2) подставляем среднее значение изгибающего момента M_y в рассматриваемом поперечном сечении окончательно обработанной детали.

$$\bar{M}_y = \frac{1}{Bk_n} \sum_{i=1}^N P_{ДУФ_i} b_i (z_{0xi} - z_c^{ДУФ_i})$$

где B – ширина детали; k_n – коэффициент предварительной обработки при ДУФ; N – количество расчетных участков в сечении; $P_{ДУФ_i}$ и $z_c^{ДУФ_i}$ – внутренние силовые факторы процесса ДУФ, растягивающая сила и расстояние от обработанной поверхности до точки её приложения, рассчитанные для i -го участка шириной b_i (b_i равно высоте уплотнения ДА, применяемого для обработки i -го участка); z_{0xi} – координата центра тяжести поперечного сечения участка.

Использование в качестве исходных данных для расчета компьютерных 3D моделей обрабатываемых деталей позволило разработать программный модуль, предназначенный для автоматизированного расчета технологических параметров процесса ДУФ и генерации управляющих программ. Разработанная технология и комплект оборудования внедрены в производство обновленных панелей крыла самолета БЕ-200 в ручном режиме управления. При этом получены следующие результаты: время формообразования панели длиной 12 м – 9-10 часов; точность формообразования (отклонение от заданного контура) 0,5-0,8 мм. Завершение программы опытных работ и перевод технологии ДУФ на программный режим управления позволит снизить машинное время еще на 30-40% и обеспечить стабильность технологического процесса.

Выводы: достигнутые показатели точности деталей и производительности разработанного технологического процесса формообразования панелей позволяют рекомендовать его к тиражированию в масштабах отрасли в производстве таких самолетов, как МС-21, Sukhoi Superjet 100, АН-148, ИЛ-476 и др.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Ramati, S.* Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology / *S. Ramati, G. Levasseur, S. Kennerknecht* // 7-th Int. Conf. on Shot Peening., Warsaw, Poland, 28-30 Sept. 2000. (ICSP-7). P. 1-17.
2. *Vaccari, J.A.* Peen forming enters computer age // *American Machinist*. 1985. June. P. 91-94.
3. *Baughman, D.L.* An overview of peen forming technology // 2-th Int. Conf. on Shot Peening., Chicago, IL, USA, 14-17 May, 1984. (ICSP-2). P. 28-33.
4. *Вепрев, А.А.* О создании отраслевой технологии дробеударного формообразования панелей / *А.А. Вепрев и др.* // *Авиационная промышленность*. 2009. № 2. С. 24-29.
5. *Пашков, А.Е.* Об автоматизации процесса гибки-прокатки деталей типа обшивок крыла в комбинированном процессе формообразования / *А.Е. Пашков, А.Ю. Малащенко* // *Вестник ИрГТУ*. 2011. №11. С. 37-42.
6. *Вепрев, А.А.* Автоматизация производства длинномерных панелей и обшивок на Иркутском авиационном заводе / *А.А. Вепрев и др.* // *Наука и технологии в промышленности*. 2013. №1-2. С. 49-52.
7. *Пашков, А.Е.* Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. – Иркутск: Издательство ИрГТУ, 2005. 140 с.
8. *Макарук, А.А.* Методика расчета технологических параметров процесса правки фрезерованных деталей каркаса раскаткой роликами // *Вестник ИрГТУ*. 2012. №9(68). С. 46-50.

THE AUTOMATED TECHNOLOGY OF COMBINED FORMING THE AIRCRAFT PANELS

© 2013 А.Е. Pashkov

National Research Irkutsk State Technical University

The results of research, developmental and technological works on creation the combined technology including operations of elastic-plastic deformation and peen forming processing, equipment complex with numerical program control, standard and methodical and software for formation the large-size panels of aircraft are given.

Key words: *panel, covering, peen forming, roll-bending, ribs rolling, peening machine*