

УДК 629.735

Ю.А. Воробьев, В.В. Воронько, В.Н. Степаненко

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ДОРНОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ

В статье проанализированы квазистатический низкоскоростной (прессовый), квазистатический высокоскоростной и импульсный высокоскоростной способы дорнования, показаны преимущества импульсного высокоскоростного способа дорнования.

дорнование, дорн, болтовое соединение, магнитноимпульсное устройство, пневмоимпульсное устройство

Введение

Повышение надежности и экономической эффективности эксплуатации самолетов возможно при условии увеличения ресурса их планера, который в настоящее время для пассажирских самолетов установлен на уровне 80 тыс. летных часов. Ресурс конструкции в основном определяется выносливостью болтовых соединений, количество которых в конструкции самолета достигает 200 тыс. штук. От 66 до 92% болтов устанавливаются по посадке с зазором, что приводит к уменьшению ресурса планера в целом.

Использование поверхностного пластического деформирования (ППД) отверстий является эффективным способом увеличения циклической долговечности свободных незаполненных отверстий (например, отверстий для перетекания топлива в кессонбаках) и отверстий под болтовые соединения [1]. Однако этот способ не используется в производстве в полной мере прежде всего из-за низкой производительности и ограниченных технологических возможностей как процесса, так и устройств для осуществления упрочняющей обработки.

Из известных способов ППД отверстий наиболее эффективным признано высокоскоростное дорнование [1 – 3]. Результаты сравнительных испытаний на усталость, проведенных для образцов со сво-

бодным отверстием на различных скоростных режимах, показывают, что с увеличением скорости дорнования увеличивается циклическая долговечность образцов (рис. 1) [3].

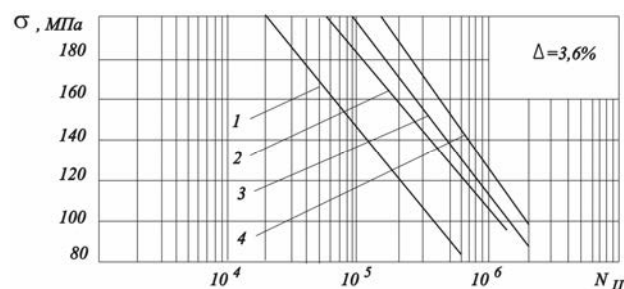


Рис. 1. Кривые усталости для образцов с концентратором напряжения в виде отверстия: 1 – с развернутым отверстием; 2, 3, 4 – с дорнованным отверстием (2 – со скоростью $V = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м/с; 3 – со скоростью $V = 10$ м/с; 4 – со скоростью $V = 20$ м/с)

Вместе с тем широкое применение квазистатического высокоскоростного (далее по тексту, высокоскоростного) дорнования в условиях агрегатной сборки ограничено отсутствием высокоэффективного оборудования. Используемые в промышленности магнитноимпульсные устройства [2] имеют следующие недостатки:

– необходимость массивных (до 500 кг), громоздких и дорогостоящих приводов;

– наличие токов высокого напряжения, что является небезопасным в условиях проведения сборочных работ, требует надежного экранирования ручного инструмента для исключения воздействия магнитного поля на исполнителей;

- сложность управления;
- низкие к.п.д. (до 5%) и надежность;
- ограниченная цикличность.

На кафедре технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета «ХАИ» разработана технология импульсной клепки и устройства для ее реализации (пневмоимпульсные клепальные молотки) [4]. Применение подобных устройств для дорнования отверстий предполагает использование общих преимуществ импульсного высокоскоростного (далее по тексту, импульсного) способа дорнования при одновременном устранении большинства недостатков, характерных как для магнитноимпульсных устройств, так и прессов (машин для постановки болтов типа МБЗ).

Формулирование проблемы. К отверстиям для постановки болтов одним из основных требований являются требования к отклонениям от прямолинейности образующей отверстия (корсетность), а также опорной и свободной поверхностях образца (наплывы).

В данной статье проведен сравнительный анализ квазистатического низкоскоростного (далее по тексту, прессового), высокоскоростного и импульсного способов дорнования отверстий.

1. Сравнительный анализ прессового и импульсного способов дорнования отверстий

Для сравнения прессового и импульсного способов дорнования отверстий был спланирован и проведен многофакторный натурный эксперимент.

На основании анализа результатов поисковых опытов при планировании полнофакторного эксперимента определяющими факторами были выбраны (табл. 1):

1) способ дорнования: импульсный (начальная скорость дорнования $V_0 = 20$ м/с) и прессовый (скорость дорнования $V = 4,5 \cdot 10^{-3} = \text{const}$ м/с);

2) величина натяга: $\Delta = 1,2, 1,7$ и $2,4$ %;

3) коэффициент трения: $\mu = 0,15$ (без смазки); $\mu = 0,07$ (со смазкой – керосин [5]).

Для определения числа опытов воспользуемся формулой

$$N = m_1^k \cdot n,$$

где m_i – число уровней варьирования i -го фактора; k – число факторов; n – число параллельных опытов (принимается 3 [6]).

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			верхний +1	основной 0	нижний -1
Способ дорнования	x_1	19,9955	20	–	0,0045
Величина натяга Δ , мм	x_2	0,25	0,415	0,290	0,165
Коэффициент трения μ	x_3	0,08	0,15	–	0,07

Необходимое количество опытов:

$$N = (2^2 \cdot 3^1) \cdot 3 = 36.$$

Дорнование выполняли:

1) на прессе клепальном ПНП-5,5 – прессовое дорнование;

2) пневмоимпульсным клепальным молотком мод. МПИ-90М – импульсное дорнование.

Дорнование осуществляли шариком $\varnothing 10,01$ мм; толщина образца 10 мм, материал образца Д16Т.

Для проведения замеров использовали:

1) нутромер с измерительной вставкой TGL 7483-1 (класс точности 2 мкм);

2) микрометр МК 0-25 мм ГОСТ 6507-60 (класс точности 0,01 мм).

Образование отверстий проводили в три перехода:

1) сверление сверлом $\varnothing 8$ мм;

2) рассверливание сверлом $\varnothing 9,4$ мм;

3) развертывание спиральными развертками $\varnothing 9,6H7$ мм; $\varnothing 9,7H7$ мм и $\varnothing 9,85H7$ мм.

Порядок проведения эксперимента:

1) в образцах выполняли отверстия в соответствии с отраслевой методикой;

2) с помощью нутромера измеряли диаметр отверстия на трех уровнях в трех плоскостях (рис. 2, 3) значения осредняли по каждому из трех уровней;

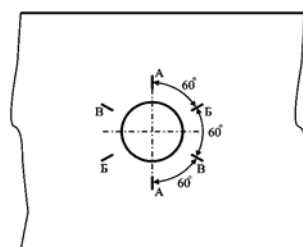
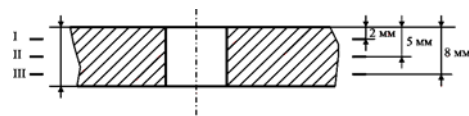


Рис. 2. Схема замеров отверстия

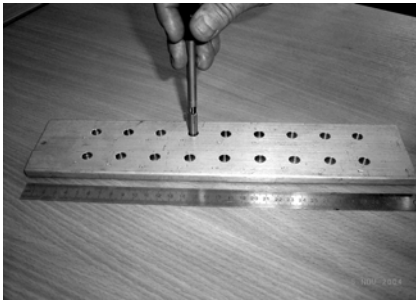


Рис. 3. Замер диаметра отверстия

3) выполняли дорнование отверстий на прессе (рис. 4) и пневмоимпульсным молотком (рис. 5);



Рис. 4. Дорнование на прессе ПНП-5,5

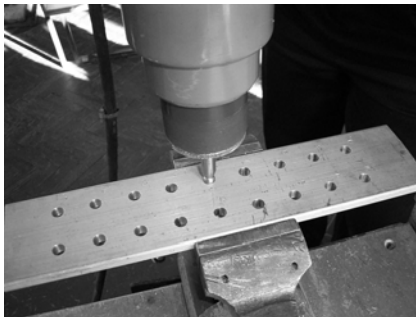


Рис. 5. Дорнование пневмоимпульсным молотком

4) после дорнования вновь измеряли диаметр отверстия на тех же уровнях в трех плоскостях. Дополнительно с помощью специального приспособления на базе индикатора часового типа определяли значения величины наплыва по кромке отверстий на удалении 0...3 мм от края отверстия с шагом 0,2 мм (рис. 6).

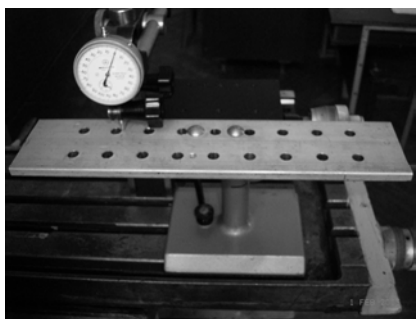


Рис. 6. Замер профиля наплыва

Для проверки сомнительных (резковывделяющихся) результатов, использовали критерий согласия при уровне значимости 5% [6]. Все результаты эксперимента оказались достоверными.

Результаты эксперимента, представленные в виде графиков (рис. 7 и 8), показали что:

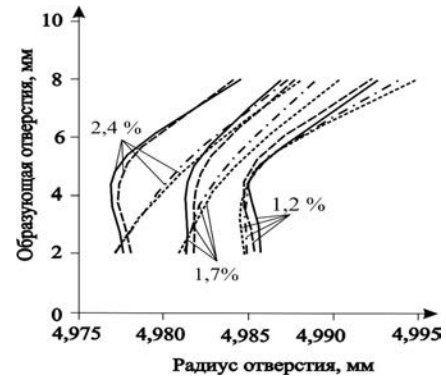


Рис. 7. Корсетность при прессовом и импульсном дорновании: прессовое дорнование: — — без смазки; - - - - со смазкой; импульсное дорнование: - . . - без смазки; со смазкой

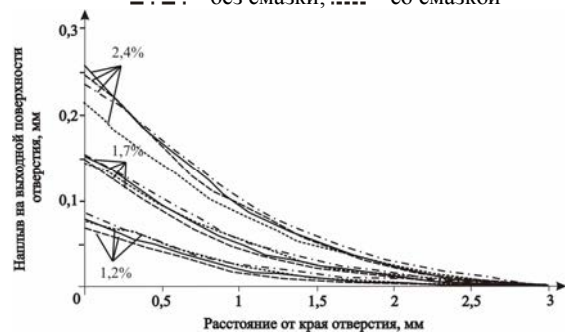


Рис. 8. Наплыв на опорной поверхности образца при прессовом и импульсном дорновании: прессовое дорнование: — — без смазки; - - - - со смазкой; импульсное дорнование: - . . - без смазки; со смазкой

- 1) корсетность отверстия при прессовом способе больше на 4...5% чем при импульсном;
- 2) наплывы на опорной поверхности при натягах до 1,7% идентичны;
- 3) наплывы на опорной поверхности при натяге 2,4% со смазкой меньше на 11% при импульсном способе.

2. Моделирование высокоскоростного и импульсного способов дорнования отверстий

Моделирование импульсного дорнования осуществлялось с помощью программы, основанной на методе конечных элементов (МКЭ). Для этого приняты следующие исходные данные:

- 1) шарик (ШХ15) — "MAT_RIGID" (недеформируемый элемент в модели $E = 71 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,33$);
- 2) образец (Д16Т) — "MAT_POWER_LAW_PLASTICITY" (свойства материала в модели задается по экспоненциальному закону $\sigma = B \cdot \epsilon^m$, где $B = 380 \cdot 10^6$ и $m = 0,27$);
- 3) начальная скорость инструмента-дорна равна $v_0 = 20 \text{ м/с}$ (энергия единичного удара $E = 60 \text{ Дж}$);
- 4) все геометрические параметры модели соответствуют геометрическим параметрам натурального

эксперимента, приведенного во втором разделе данной статьи;

5) коэффициент трения $\mu = 0,07$ (со смазкой);

6) задача осесимметричная.

Сравнение результатов численной модели с натурным экспериментом (рис. 9 и 10) показали, что погрешность составляет до 3 %. Это говорит об адекватности модели МКЭ.

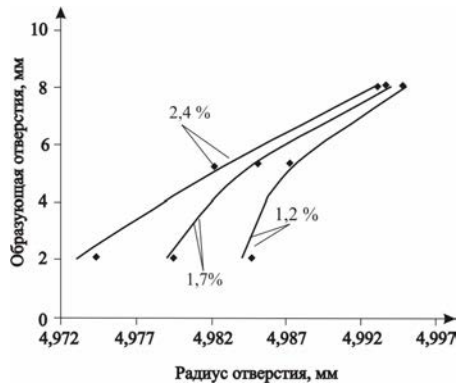


Рис. 9. Сравнение корсетности при натурном и численном экспериментах: \blacklozenge – натурный эксперимент; — — — численный эксперимент

Для сравнения высокоскоростного и импульсного способов дорнования заданы следующие параметры:

1) материалы дорна и образца соответствует приведенным выше;

2) толщина пластины принимаем 17 мм, как наиболее часто встречаемая в авиационных конструкциях;

3) геометрические параметры дорна согласно производственной инструкции;

4) начальная скорость для импульсного способа дорнования $V_0 = 20$ м/с (энергия единичного удара $E = 100$ Дж);

5) скорость для высокоскоростного дорнования $V = 20 = \text{const}$ м/с и $V = 10 = \text{const}$ м/с;

6) натяг 3,6%;

7) коэффициент трения $\mu = 0,07$ (смазка);

8) задача осесимметричная.

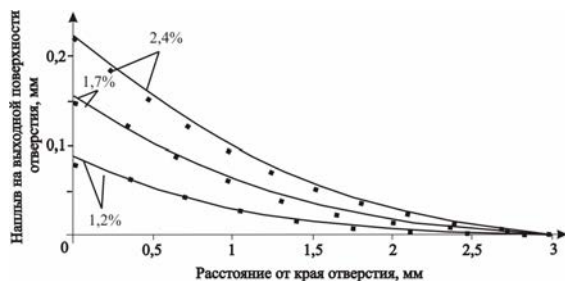


Рис. 10. Сравнение наплыва на опорной поверхности при натурном и численном экспериментах: \blacklozenge – натурный эксперимент; — — — численный эксперимент

Полученные результаты по корсетности при высокоскоростном и импульсном дорновании приведены на рис. 11, результаты по наплыву на опор-

ной поверхности получились одинаковыми (расхождение не превышает 0,5 %).

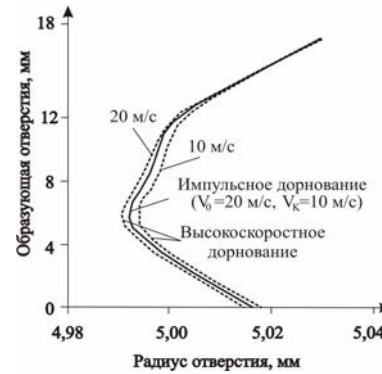


Рис. 11. Корсетность на разных скоростных режимах

Заключение

Сравнительный анализ различных методов дорнования показал следующее:

1) импульсное по сравнению с прессовым дорнованием:

- уменьшает корсетность отверстия на 4...5%;
- наплывы на опорной поверхности при натягах до 1,7% равны;
- наплывы на опорной поверхности при натяге 2,4% со смазкой меньше на 11%;

2) импульсное по качеству получаемых отверстий не уступает высокоскоростному дорнованию, поэтому в дальнейших работах необходимо исследовать влияние на ресурс импульсного дорнования.

Список литературы

1. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.
2. Воробьев Ю.А., Воронько В.В. Перспективные устройства для реализации процесса дорнования отверстий. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 3 (11). – С. 28-32.
3. Лысенко Ю.Л., Щербатых В.В., Несолёный В.С. Высокоскоростное дорнование отверстий с применением магнитно-импульсного привода при сборке агрегатов летательных аппаратов // *Вопросы технологии сборки конструкций летательных аппаратов*. – Куйбышев: КуАИ, 1982. – С. 115-121.
4. Воробьев Ю.А., Чистяк В.Г., Воронько В.В. Особенности технологического процесса и инструмента импульсного дорнования отверстий. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – №5/13. – С. 37-41.
5. Проскураков Ю.Г. Дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1961. – 192 с.
6. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
7. Анурьева В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т.1. – М.: Машиностроение, 1982. – 736 с.

Поступила в редколлегию 29.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ф.В. Новиков, Харьковский национальный экономический университет, Харьков.