

Скоростное дорнования отверстий авиационных конструкций

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

Ключевые слова: дорн, скоростное дорнование, численное моделирование, эксперимент, корсетность, отклонение образующей

Ключові слова: дорн, швидкісне дорнування, чисельне моделювання, експеримент, корсетність, відхилення твірної

Key words: dorn, high-speed burnishing, numeral design, experiment, lobing, a deviation forming.

Введение

Для современного уровня развития воздушного транспорта характерна тенденция значительного увеличения его надежности и заданного ресурса (до 60 тыс. летных часов). Подобный рост эффективности пассажирских самолетов в решающей степени обеспечивается повышением долговечности их планера, которую в первую очередь определяет выносливость соединений, в том числе болтовых. Количество болтовых соединений (БС) в конструкциях современных пассажирских самолетов достигает 55 тыс. штук на легких машинах и 400 тыс. штук – на тяжелых. При этом от 66% до 92% болтов устанавливаются с зазором. До 75...80% всех усталостных разрушений происходит в местах соединения элементов конструкции планера. Создание пластическим деформированием технологических остаточных напряжений сжатия в местах предполагаемого разрушения приводит не только к уменьшению концентрации напряжений, но и замедляет рост усталостной трещины.

1. Анализ состояния вопроса

Использование методов поверхностного пластического деформирования (ППД) является эффективным способом увеличения циклической долговечности свободных незаполненных отверстий (например, отверстий для перетекания топлива в баке-кессоне) и отверстий под болты. Однако методы ППД не используют в производстве в полной мере, что объясняется, прежде всего, высокой стоимостью, низкой производительностью и ограниченными технологическими возможностями, как процесса, так и устройств для упрочнения.

В настоящее время на предприятиях авиационной промышленности процесс дорнования осуществляют преимущественно квазистатическими протяжными устройствами или машинами для затягивания болтов с пневмогидравлическим приводом. Основным недостатком применения подобных устройств является высокая трудоемкость процесса дорнования, объясняемая необходимостью двухстороннего доступа к отверстию и требованиями по согласованности в работе двух исполнителей. Кроме того, к недостаткам следует отнести и наличие пневмогидравлических приводов к устройствам (мультипликаторов), значительно затрудняющих маневренность рабочих. При этом дорнование с постоянной скоростью движения рабочего органа имеет, в свою очередь, также ряд существенных недостатков, проявляющихся в возникновении наплывов на торцах отверстий, искажении геометрии образующей отверстия (появление корсетности). Это требует проведения дополнительной операции – калибровки отверстия после дорнования разверткой по Н7 [1], при которой срезают наиболее упрочненный поверхностный слой детали. Тем самым снижается уровень остаточных напряжений, что существ-

венно уменьшает эффект от дорнования.

В ряде работ [2-3] показана возможность применения для выполнения операций дорнования устройств, использующих магнитно-импульсный привод, который обеспечивает возвратно-поступательное движение обрабатываемого инструмента (дорна) с высокой скоростью. При этом появляется возможность упрочнения отверстий с большими натягами при одностороннем доступе к ним, без искажения образующей отверстия, торцевых поверхностей, обеспечивая в районе упрочняемого отверстия напряженно-деформированное состояние (НДС), близкое к схеме всестороннего сжатия. Примером такого устройства является магнитно-импульсная установка МИУ-П1, осуществляющая дорнование со скоростью 15 м/сек [3]. Вместе с тем, магнитно-импульсные устройства не лишены целого ряда недостатков: значительная масса, использование дорогостоящих и громоздких накопителей энергии и, самое главное, использование тока высокого напряжения, что значительно ухудшает условия труда.

Применение пневматических импульсных устройств дорнования, использующих принцип действия пневмоимпульсных клепальных молотков, положительно зарекомендовавших себя в сфере производства, позволяет использовать общие преимущества импульсного метода упрочнения при одновременном устранении недостатков как МИУ, так и устройств с пневмогидравлическим приводом [5, 6]. Поэтому разработка таких пневмоимпульсных устройств, где в качестве энергоносителя используется сжатый воздух заводской пневмосети давлением $0,5 \pm 0,1$ МПа, отличающийся относительной дешевизной, удобством эксплуатации, приемлемостью с экологической точки зрения и техники безопасности – является актуальной задачей.

Целью данной статьи является разработка технологии и инструмента скоростного дорнования отверстий с регламентируемыми показателями качества, а также уменьшение трудоемкости технологического процесса за счет создания новых конструкций ручных пневмоимпульсных устройств дорнования с односторонним подходом в условиях стапельной сборки.

Для достижения поставленной цели и решения проблемных вопросов скоростного дорнования отверстий необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать адекватную конечно-элементную (КЭ) модель технологического процесса скоростного дорнования отверстий;
- 2) определить рациональные параметры технологического процесса скоростного дорнования, сформулированы требования к ручному инструменту для обеспечения этих параметров;
- 3) провести верификацию полученных результатов с помощью полнофакторного натурного эксперимента;
- 4) разработать схему и конструкцию ручного пневмоимпульсного устройства дорнования отверстий, удовлетворяющего требованиям производства и обеспечивающего рациональные параметры технологического процесса скоростного дорнования;
- 5) определить сравнительную экономическую эффективность внедрения скоростного дорнования отверстий с использованием ручных пневмоимпульсных устройств.

2. Численное моделирование технологического процесса скоростного дорнования отверстий авиационных конструкций

Экспериментальные методы выбора рациональных технологических параметров процесса скоростного дорнования требует значительных материальных и временных затрат. Современный уровень развития программного обеспечения и

вычислительной техники обеспечивает возможность численного моделирования этого процесса методом конечных элементов (МКЭ).

Для определения рациональных параметров технологического процесса (ТП) скоростного пневмоимпульсного дорнования предложен экспериментально-расчетный метод, в который входят следующие этапы:

а) проведение поискового эксперимента (для определения коэффициентов степенного закона упрочнения $\sigma = B\varepsilon^m$);

б) разработка конечно-элементной (КЭ) модели;

в) определение рациональных параметров технологического процесса (ТП).

Выполнение этих этапов позволяет определить рациональные параметры ТП и дать рекомендации для проектирования новых схем и конструкций пневмоимпульсных устройств дорнования.

Разработка КЭ модели

Для получения адекватной КЭ модели необходимо определить коэффициенты степенного закона, т.к. использование коэффициентов, применяемых для квазистатических процессов, дает погрешность в определении геометрических параметров дорнованных отверстий до 20%.

На основе результатов анализа литературы, а также поискового эксперимента [7] для материала Д16Т, как наиболее используемого материала в самолетостроении, эмпирическим способом были подобраны коэффициенты степенного закона $B = 380 \cdot 10^6$ и $m = 0,27$, при которых погрешность расчетов составила не более 3%. Данные коэффициенты хорошо согласуются со справочными данными (рис. 1) [4].

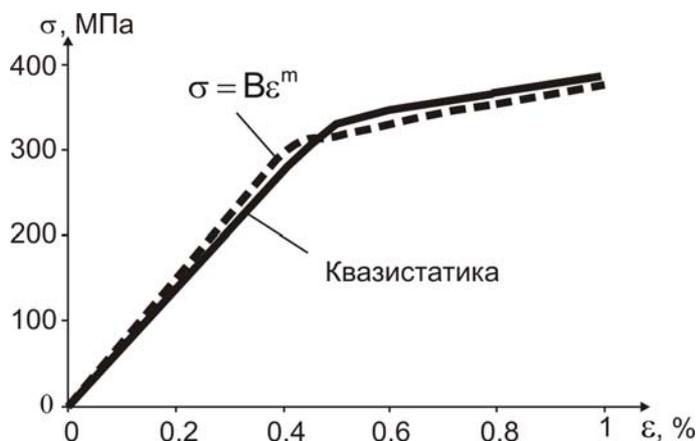


Рис. 1. Диаграмма растяжения до предела текучести сплава Д16Т

Описание КЭ модели ТП скоростного пневмоимпульсного дорнования отверстий

При моделировании процесса скоростного пневмоимпульсного дорнования отверстий выполнены следующие виды работ:

- геометрическое моделирование технологической системы (ТС), состоящей из дорна, пакета, подкрепляющего элемента и упорной втулки (рис. 2);
- моделирование физических свойств материалов элементов ТС;
- задание контактных условий взаимодействия элементов ТС;
- задание начальных условий работы элементов ТС.

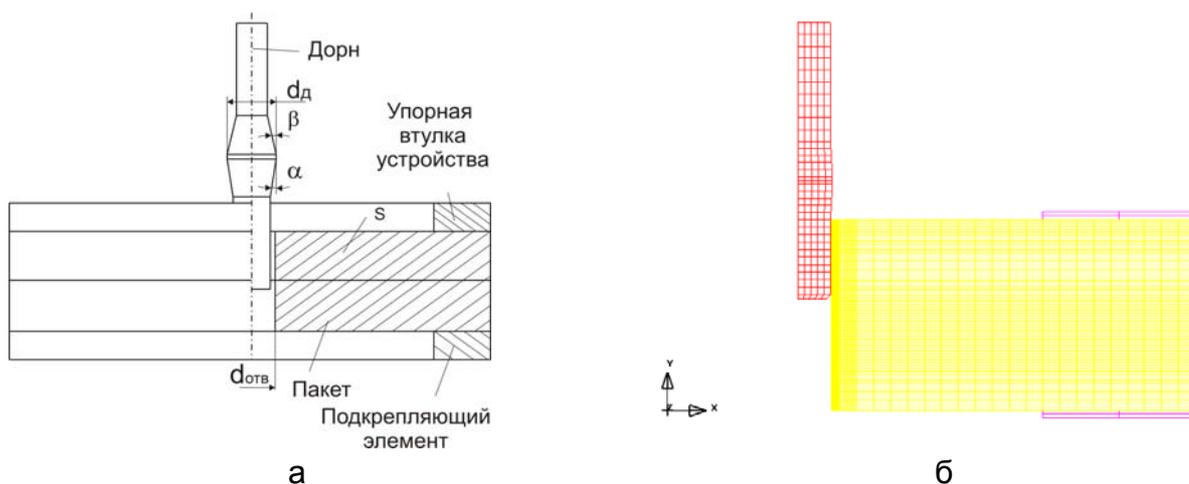


Рис. 2. Схема процесса (а) и КЭ модель (б) скоростного дорнования отверстий

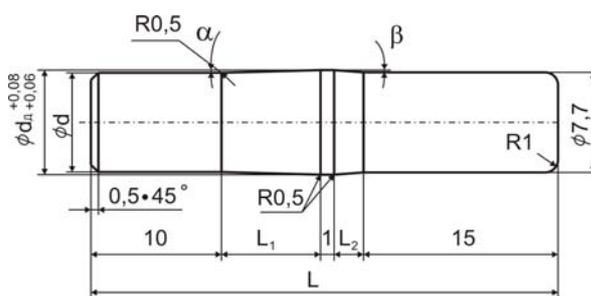
При моделировании приняты следующие допущения:

- дорн является абсолютно жестким телом;
- упрочнение материала осуществляется по степенному закону;
- задача решена в осесимметричной постановке;
- трение на контактной поверхности описывается законом Амонта-Кулона;
- тепловые эффекты, вызванные пластическим деформированием, не учитываются.

При решении скоростных процессов пластического деформирования используют явный метод интегрирования дифференциальных уравнений.

Исследование влияния геометрии дорна на геометрические параметры отверстий

Наиболее важными факторами, влияющими на геометрические параметры отверстий, являются передний α и задний β углы дорна. Согласно анализу литературы, а также рекомендациям НИИАТа и с учетом реверсного (обратного) дорнования, для исследования выбраны следующие параметры дорна (рис. 3).



№ п/п	L	α , град	β , град	L_1	L_2
1	39,17	1,5	3	8,78	4,39
2	37,41	1,5	5	8,78	2,63
3	34,78	3	3	4,39	4,39
4	33,02	3	5	4,39	2,63

Рис. 3. Геометрические параметры дорна

При моделировании приняты следующие параметры технологического процесса:

– диаметры пояска дорна $d_D = 8$ и 10 мм, а диаметры направляющих частей дорна $d = 7,7$ и $9,7$ мм;

– углы дорна:

1) передний $\alpha = 1,5^\circ$ и $\alpha = 3^\circ$;

2) задний $\beta = 3^\circ$ и $\beta = 5^\circ$;

– толщина пакета пластины S принята равной d_D , $2d_D$, $3d_D$;

– начальная скорость дорнования $V_H = 20$ м/с (энергия $E = 100$ Дж);

– натяг – $2,4$ и $3,6$ %;

– коэффициент трения $\mu = 0,07$ (используется смазка – керосин);

Конечно-элементная модель деформации в зоне отверстия после прямого и реверсного скоростного дорнования дорном показана на рис. 4.



Рис. 4. Конечно-элементная модель деформации в зоне отверстия после прямого и реверсного скоростного дорнования

К отверстиям для постановки болтов показателями критерия качества являются требования к отклонению от прямолинейности образующей отверстия (корсетность), а также опорной и свободной поверхностей образца (наплывы). Одним из наиболее важных показателей качества дорнованного отверстия является отклонение образующей Δ .

Результаты моделирования показали, что отклонение образующей отверстия и допуск на диаметр $\Delta d_{\text{ОТВ}}$ имеют минимальные значения при $\alpha = 1,5^\circ$, чем при $\alpha = 3^\circ$, а также отклонение образующей отверстия и допуск на диаметр при обратном скоростном дорновании меньше при $\beta = 3^\circ$, чем при $\beta = 5^\circ$ (рис. 5 и 6).

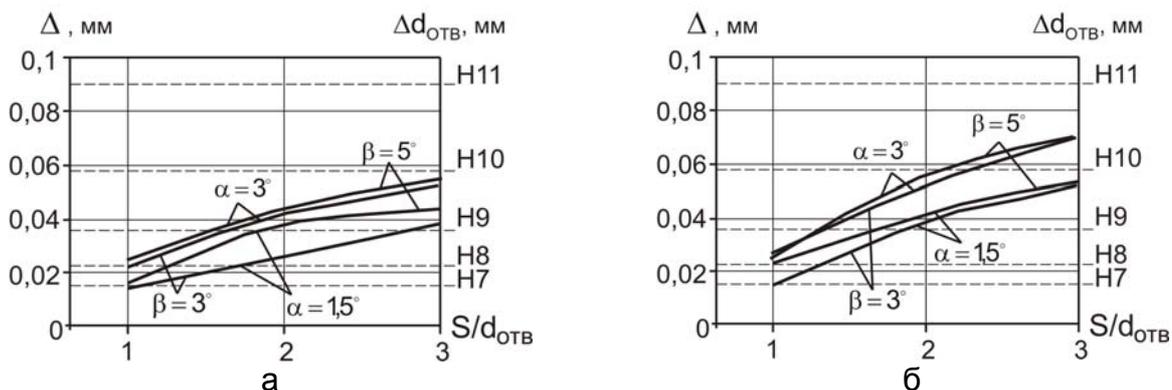


Рис. 5. Влияние геометрии дорна и толщины пакета на отклонения образующей и допуск на диаметр при различных передних и задних углах дорна ($d_D = 8$ мм (а) и $d_D = 10$ мм (б) при натяге 2,4%)

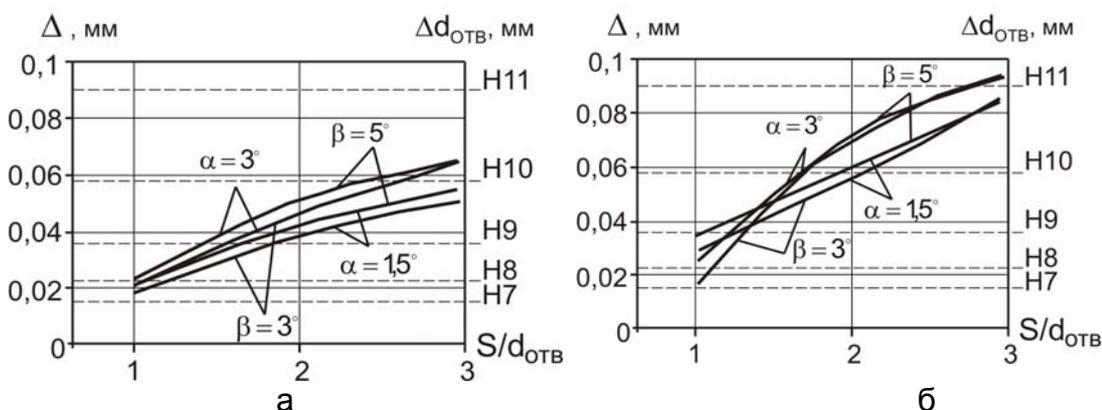


Рис. 6. Влияние геометрии дорна и толщины пакета на отклонения образующей и допуск на диаметр при различных передних и задних углах дорна ($d_D = 8$ мм (а) и $d_D = 10$ мм (б) при натяге 3,6%)

Также получены результаты, определяющие затраченную энергию на процесс прямого и обратного дорнования и значения скорости дорна на выходе из отверстия (рис. 7–10).

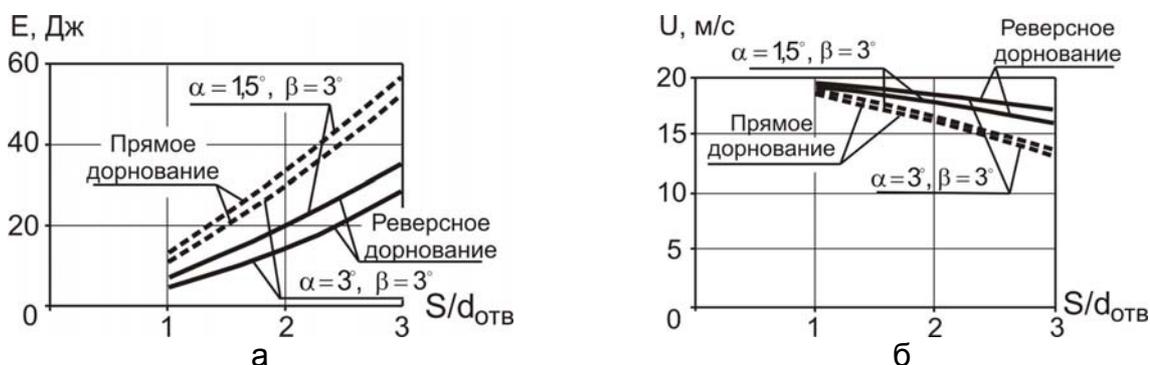


Рис. 7. Влияние геометрии дорна и толщины пакета на количество затраченной энергии на процесс дорнования (а) и на скорость дорна на выходе из отверстия (б) при прямом и реверсном дорновании ($d_D = 8$ мм, натяг 2,4%)

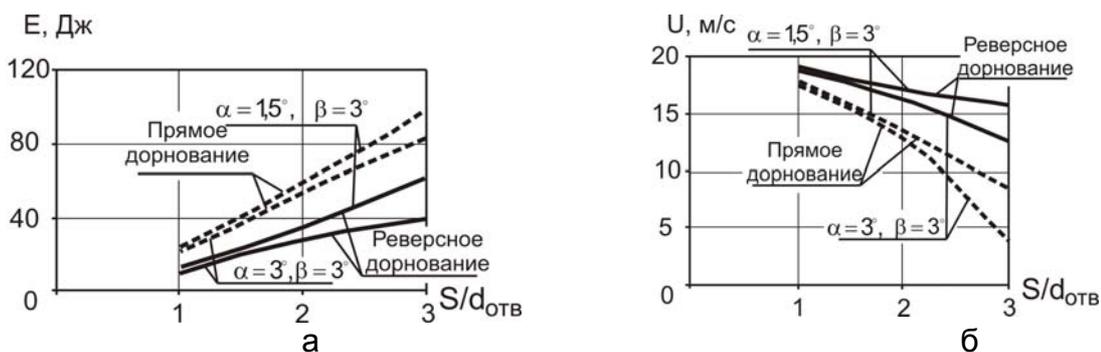


Рис. 8. Влияние геометрии дорна и толщины пакета на количество затраченной энергии на процесс дорнования (а) и на скорость дорна на выходе из отверстия (б) при прямом и реверсном дорновании ($d_D = 10$ мм, натяг 2,4%)

Анализ полученных результатов показал, что при реверсном дорновании затрачивается энергии меньше на 55%, чем при прямом дорновании. Это позволит проводить прямое дорнование за два удара, а реверсное – за один. Этот факт подтверждается при моделировании процесса дорнования пакета толщиной $3d_D$ дорном $d_D = 10$ мм и углами $\alpha = 1,5^\circ, \beta = 3^\circ$ (5°) (рис. 10, б).

Поэтому в разработку устройства заложено возможность проводить процесс прямого и реверсивного дорнования как за один, так и за несколько ударов.



Рис. 9. Влияние геометрии дорна и толщины пакета на количество затраченной энергии на процесс дорнования (а) и на скорость дорна на выходе из отверстия (б) при прямом и реверсном дорновании ($d_D = 8$ мм, натяг 3,6%)

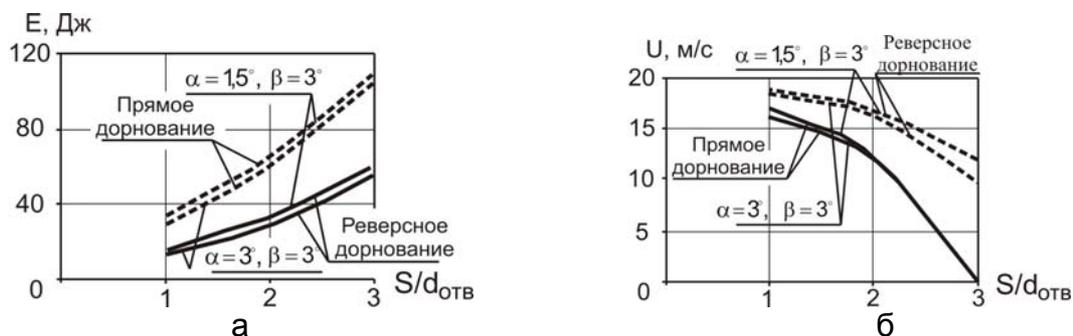


Рис. 10. Влияние геометрии дорна и толщины пакета на количество затраченной энергии на процесс дорнования (а) и на скорость дорна на выходе из отверстия (б) при прямом и реверсном дорновании ($d_D = 10$ мм, натяг 3,6%)

Исследование влияния коэффициента трения (смазки) на геометрические параметры отверстий

При исследовании коэффициента трения использовали те же параметры, что и при моделировании влияния геометрии дорна. При этом был исследован коэффициент трения в пределах $\mu = 0,02 \dots 0,1$.

Полученные результаты (рис. 11) показали, что с уменьшением коэффициента трения величина отклонения образующей увеличивается.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, о том, что не всегда эффективно использовать дорогостоящие смазки (МП 2000, дисульфид молибдена и др.), при которых коэффициент трения является наименьшим ($\mu = 0,02 \dots 0,04$).

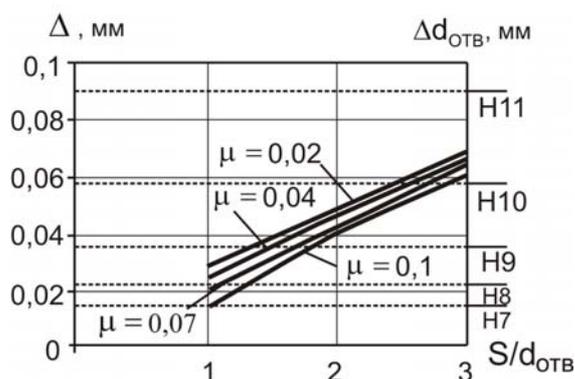


Рис. 11. Влияние геометрии дорна и толщины пакета на отклонение образующей и допуск на диаметр при различных смазках (коэффициентах трения)

На рис. 12 показаны результаты расчета скорости дорна на выходе из отверстия при прямом и реверсном дорновании, а также значения энергии затраченной на данные процессы. Результаты этих исследований позволяют рационально выбирать смазки для процессов скоростного дорнования, а также рационально использовать энергетические возможности пневмоимпульсных устройств дорнования отверстий.

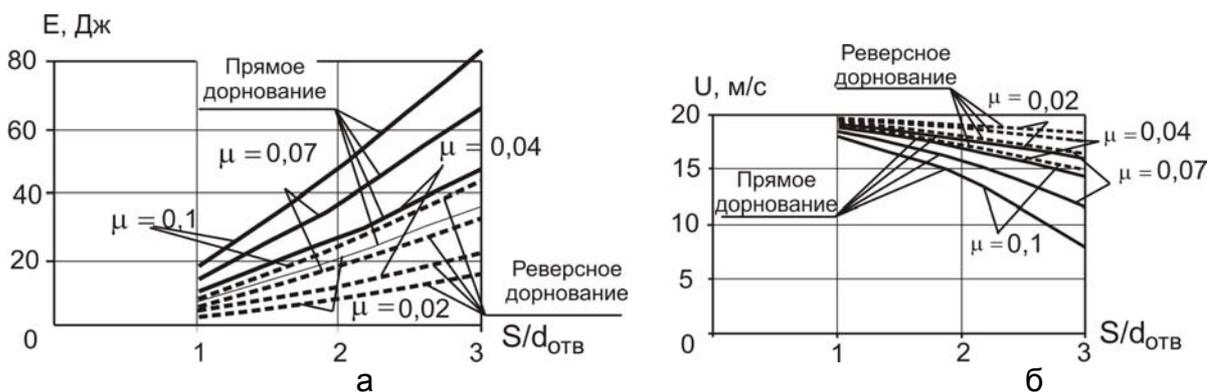


Рис. 12. Влияние геометрии дорна и толщины пакета на количество затраченной энергии на процесс дорнования (а) и на скорость дорна на выходе из отверстия (б) при различных коэффициентах трения

3. Экспериментальные исследования технологического процесса дорнования отверстий

Основной технологической задачей, возникающей при внедрении новых технологий, является поиск рациональных параметров технологического процесса и средств технологического оснащения, исходя из требований обеспечения заданного качества, минимальной трудоемкости и стоимости. Наряду с теоретическими расчетами, численным моделированием экспериментальные исследования остаются определяющим фактором при выборе этих параметров. Для получения более полной и достоверной картины проводят, как правило, полнофакторный эксперимент.

План и порядок проведения полнофакторного эксперимента по дорнованию отверстий

Исходя из результатов поисковых опытов и анализа литературы, при планировании полнофакторного эксперимента переменными факторами были выбраны [5]:

- скорость дорнования: 20 м/с – для скоростного (импульсного) и 0,0045 м/с – для квазистатического (прессового) способов;
- величина натяга: 2,4% и 3,6%;
- передний угол α : 1,5° и 3°;
- задний угол: β : 3° и 5°.

Анализ конструкции современных пассажирских самолетов показывает, что большинство высоконагруженных болтовых соединений образовано болтами диаметром более 8 мм. Для исследований были выбраны образцы с минимальным диаметром отверстия, равным 8 мм, для минимизации энергетических затрат на упрочнение. С той же целью толщина дорнуемого образца была принята равной диаметру болта.

Упрочнение выполняли дорнами, которые были разработаны согласно ПИ-6843 (рис. 3). Для исследования влияния конструкции дорна на геометрические параметры упрочненного отверстия (натяг, корсетность, овальность, качество поверхности и др.) варьировались углы α , β и как следствие – линейные размеры l_1 и l_2 .

Отверстия получали в три перехода в соответствии с рекомендациями отраслевых нормативных документов [6, 7]:

- сверление сверлом $\varnothing 6_{-0,1}$ мм;
- рассверливание сверлом $\varnothing 7,84_{-0,02}$ мм.
- развертывание спиральными развертками $\varnothing 7,85H7$ мм или $\varnothing 7,95H7$ мм (для получения двух заданных значений натягов).

Дорнование отверстий выполняли на прессе КП-204 и пневмоимпульсным молотком мод. МПИ-90М (рис. 13).

Планирование эксперимента и обработка его результатов проводили с использованием статистических методов [8]. Для проверки достоверности результатов был принят критерий согласия при уровне значимости 5%. Все они оказались доверительными.

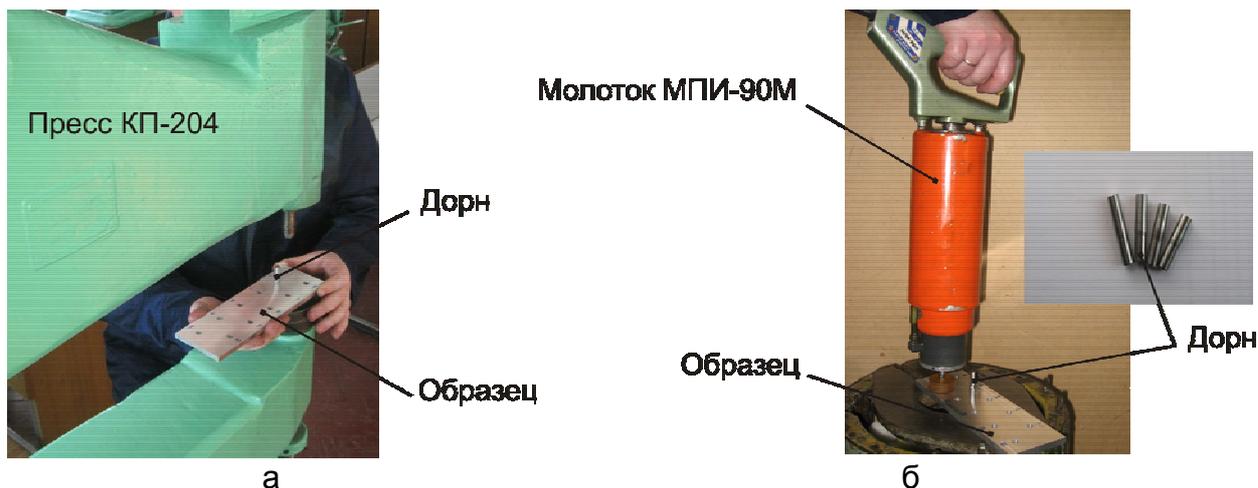


Рис. 13. Дорнование экспериментальных образцов: а – на прессе КП-204; б – пневмоимпульсным молотком мод. МПИ-90М

Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты эксперимента представлены в виде графиков (рис. 14-16).

Замеряли и анализировали следующие параметры отверстий до и после дорнования.

1. Корсетность отверстия. Выполняли замеры с помощью индикаторного нутромера диаметров отверстий до и после дорнования в трех плоскостях на трех уровнях (значения по каждому уровню усредняли по замерам в различных плоскостях). Установлено, что при квазистатическом способе дорнования корсетность отверстий при различных значениях натяга и параметрах дорна больше на 10...20% корсетности отверстий при скоростном дорновании (рис. 14).

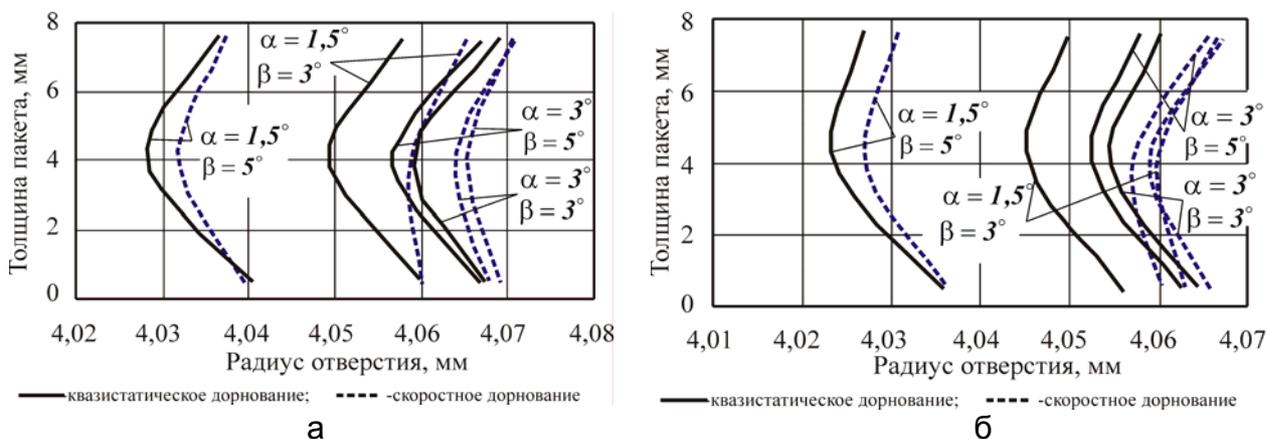


Рис. 14. Корсетность отверстий при квазистатическом и скоростном дорновании: а – при натяге 2,4%; б – при натяге 3,6%

2. Отклонение образующей отверстия. Установлено, что отклонение образующей после квазистатического дорнования больше на 1-2 качества точности, чем при скоростном дорновании (рис. 15).

3. Шероховатость поверхности отверстия. Для определения шероховатости отверстий до и после дорнования использовали профилограф-профилометр. Установлено (рис. 16), что шероховатость после квазистатического и скоростного

дорнования при угле $\beta = 5^\circ$ находится в пределах Ra 1,1...0,3, а при $\beta = 3^\circ$ разброс значений шероховатости меньше – Ra 0,6...0,3 (по отраслевым нормативам шероховатость не должна превышать Ra 0,63).

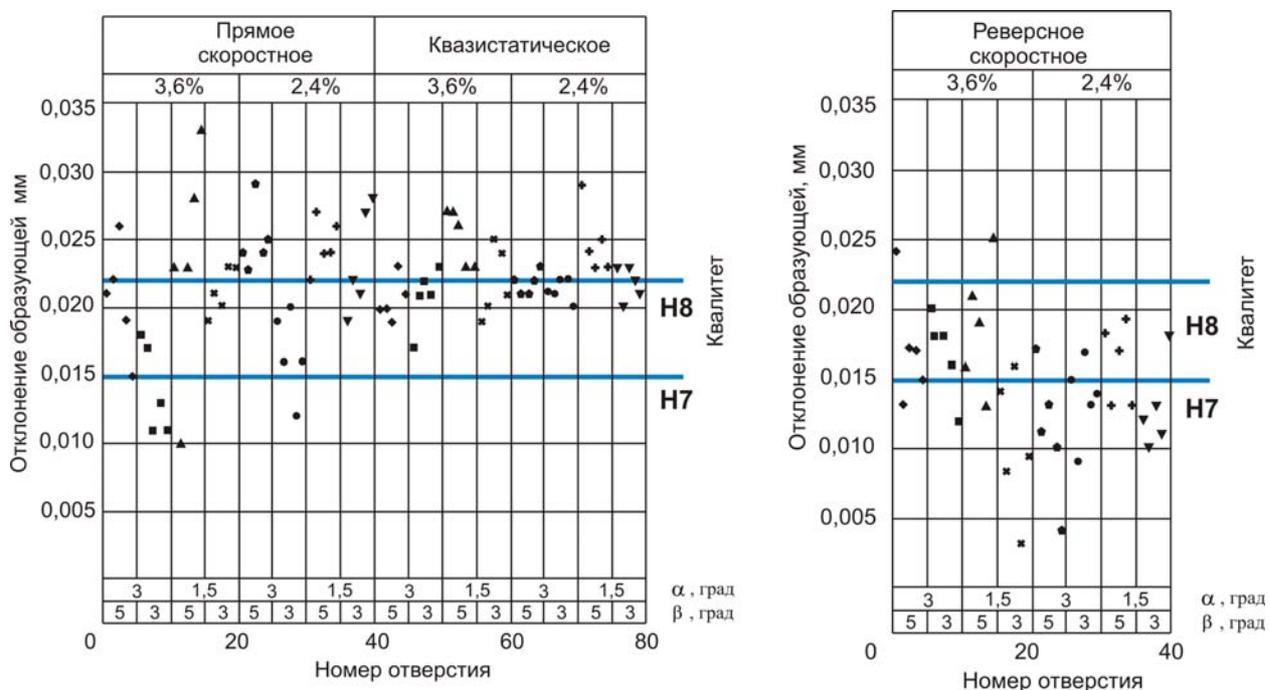


Рис. 15. Отклонение образующей отверстия при квазистатическом и скоростном дорновании



Рис.16. Шероховатость отверстий до и после квазистатического и скоростного дорнования

Твердость, макро- и микроанализ структуры металла в зоне упрочнения

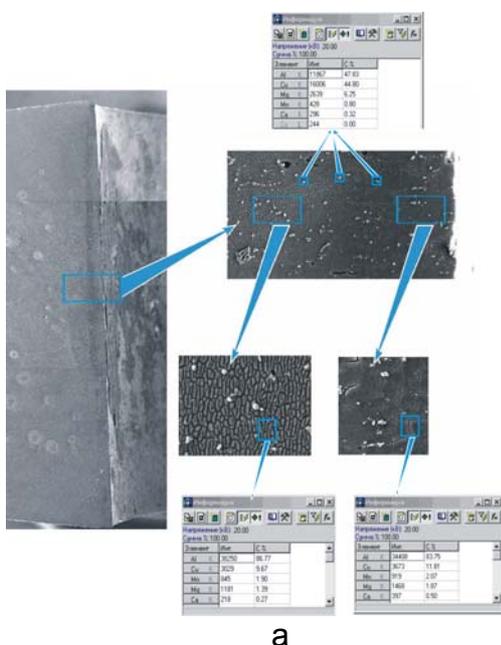
Для выявления линий деформации использовался реактив Келлера (35% HCl и 65% HNO₃) [9], который служит для выявления линий скольжения и деформации в закаленных и состаренных сплавах типа «алюминий – медь – магний».

Для выявления поверхности зерен алюминиевых сплавов, содержащих медь (в частности, дуралюмина) использован по данным 1%-ный раствор едкого натрия (1 г NaOH; 100 мл H₂O) [там же].

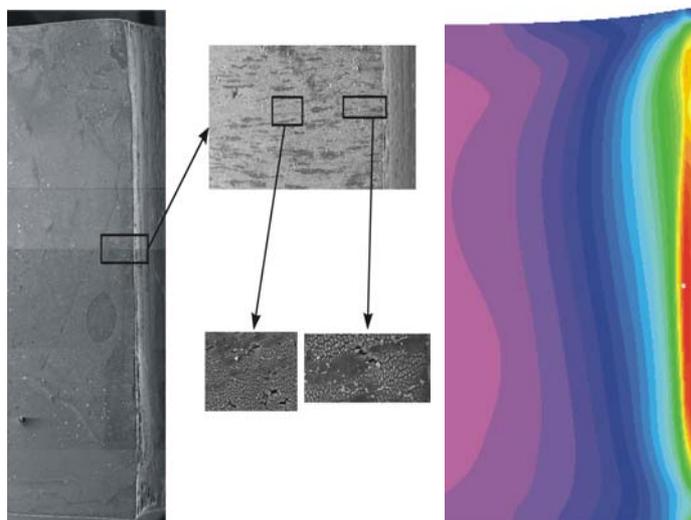
Просмотр и фиксацию картины макро- и микрошлифов выполняли с использованием:

1. фотомикроскопа отраженного света НЕОРНОТ 30;
2. электронного растрового микроскопа с камерой низкого вакуума и системой энергодисперсионного микроанализа РЭМ-106.

Фото макро- и микрошлифов представлены на рис. 17. Для сравнения на рис. 18 приведены результаты численного моделирования НДС в зоне упрочнения отверстия при скоростном дорновании.



а



б

Рис. 17. Макро- и микрошлифы образца в зоне отверстия, упрочненного с натягом 3,6%:
а – скоростным дорнованием; б – квазистатическим дорнованием

Рис. 18 – Результаты моделирования МКЭ

Для измерения твердости использовали устройство ТК-2 (рис. 19), результаты представлены на рис. 20.

Результаты анализа полученных макрошлифов позволяют сделать следующие выводы:

- при скоростном дорновании линии деформации находятся ближе к стенкам отверстия, а при квазистатическом дорновании проникают более глубоко; интенсивность деформаций выше при квазистатическом упрочнении;
- численное моделирование НДС в зоне упрочнения отверстия и резуль-

таты эксперимента демонстрируют высокую степень сходства.

Результаты анализа микрошлифов говорят о следующем:

- после скоростного дорнования границы между зернами возле стенки отверстия плохо различимы по сравнению с зернами, находящимися на некотором удалении от стенки отверстия, что свидетельствует о более высокой степени деформации возле стенки отверстия;
- после квазистатического дорнования зерна не имеют больших отличий в размерах и форме по всей глубине от стенки отверстия, за исключением некоторых зон локализации деформаций, связанных с неоднородностью материала; это свидетельствует о том, что деформации при квазистатическом дорновании проникают более глубоко и при этом не концентрируются возле стенки отверстия.

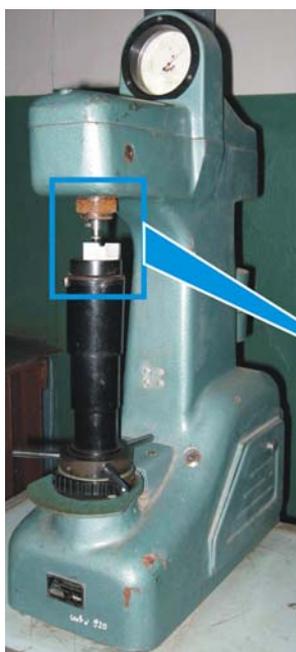


Рис. 19. Устройство для измерения твердости ТК-2

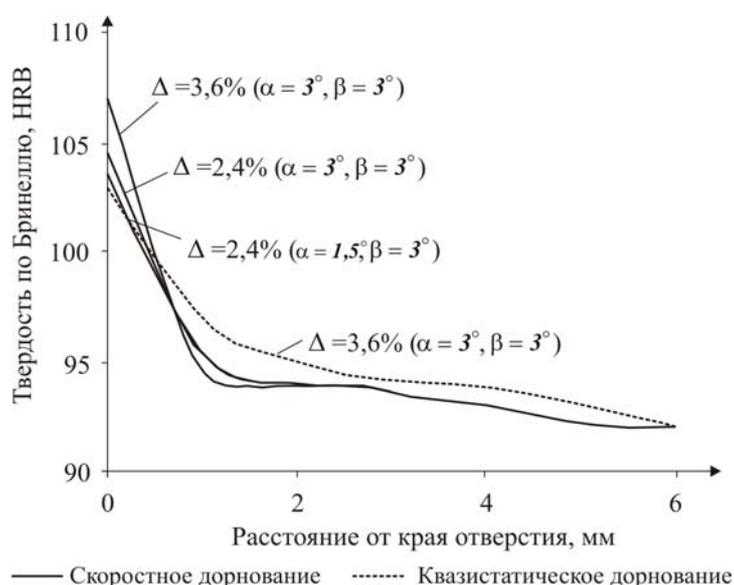


Рис. 20. Твердость образцов, упрочненных скоростным и квазистатическим дорнованием

Результаты замеров твердости образцов в зоне упрочнения показали, что твердость вблизи стенки отверстия при скоростном дорновании выше на 45%, чем при квазистатическом. Данный факт подтверждает результаты макро- и микроанализа, что в данной зоне деформации при скоростном дорновании больше, чем при квазистатическом.

Выводы

1. Создана на основе предложенного экспериментально-расчетного метода КЭ модель позволяет определить с заданной точностью рациональные параметры технологического процесса скоростного дорнования.
2. Определены рациональные параметры технологического процесса скоростного дорнования, которые обеспечивают требуемое качество поверхности отверстий.
3. Результаты эксперимента позволяют сделать следующие выводы:
 - корсетность отверстия при квазистатическом дорновании больше на 10-

- 20%, чем при скоростном упрочнении;
- отклонение образующей после скоростного и квазистатического дорнования находится в пределах H9–H8 квалитетов;
 - шероховатость поверхности отверстия после развертывания находится в пределах Ra 2...0,3; скоростное дорнование позволяет улучшить качество поверхности до Ra 1,1...0,3 при $\beta = 5^\circ$ и до Ra 0,6...0,3 при $\beta = 3^\circ$;
 - твердость материала образца вблизи стенки отверстия при скоростном дорновании выше на 45%, чем при квазистатическом;
 - сравнительный анализ результатов численного моделирования с экспериментальными данными позволяет говорить о высокой степени достоверности полученных результатов, т.к. расхождение не превышает 3%.

Список использованных источников

1. Воробьев Ю.А. Перспективные устройства для реализации процесса дорнования отверстий/ Воробьев Ю.А., Воронько В.В. // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2004. – №3 (11). – С. 28-32.
2. Лысенко Ю.Л. Высокоскоростное дорнование отверстий с применением магнитно-импульсного привода при сборке агрегатов летательных аппаратов. / Лысенко Ю.Л., Щербатых В.В., Несолений В.С. // *Вопросы технологии сборки конструкций летательных аппаратов*. – Куйбышев: КуАИ, 1982. – С. 115-121.
3. Воробьев Ю.А. Сравнительный анализ способов дорнования отверстий / Воробьев Ю.А., Воронько В.В., Степаненко В.Н. // *Системи обробки інформації*. – Харківський університет Повітряних Сил, 2007. – Вып. 5 (63). – С. 35-38.
4. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. – М.: *Металлургия*, 1976. – 488 с.
5. Разработка технологического процесса и инструмента скоростного дорнования отверстий авиационных конструкций из алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Воронько Виталий Владимирович. – Х., 2007. – 133 с.
6. Упрочнение отверстий болтовых соединений в конструкциях из алюминиевых сплавов. Производственная инструкция ПИ-6843. Издание 4. – 1987. – 16 с.
7. РТМ 1.4.1941-89. Сборка болтовых соединений. – М.: *НИАТ*, 1990. – 51 с.
8. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – А.А. Спиридонов – М.: *Машиностроение*, 1981. – 184 с.
9. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. Лейпциг, 1976. Пер. с нем. М.: *Металлургия*, 1979. – 336 с.

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

Поступила в редакцию 16.03.09.