

## **Верификация численной модели процесса импульсного дорнования отверстий авиационных конструкций из титановых сплавов**

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

Приведены результаты поискового эксперимента по дорнованию отверстий в образцах из титанового сплава ВТ6С с использованием пневмоимпульсного молотка модели МПИ-90М. Создана конечно-элементная модель технологического процесса импульсного дорнования отверстий авиационных конструкций из титановых сплавов в программных пакетах Ls-Dyna и Abaqus. Показаны макрошлифы в зонах отверстий до и после импульсного дорнования. Проведено сравнение результатов численного моделирования, натурального эксперимента и результатов микроскопического анализа.

**Ключевые слова:** импульсное дорнование, пневмоимпульсное устройство, макрошлиф, численное моделирование, Ls-Dyna, Abaqus.

### **Введение**

Для увеличения долговечности планера самолета необходимо повышать надежность и заданный ресурс его составных частей. Для самолетов нового поколения названные показатели в значительной степени определяются объемом применения современных высокоэффективных сплавов, в том числе титановых, для высоконагруженных элементов. Такими элементами являются свободные незаполненные отверстия (отверстия для перетекания топлива) и болтовые соединения. Именно в этих конструкциях необходимо использовать титановые сплавы, т.к. они имеют неоспоримое преимущество перед алюминиевыми сплавами и высокопрочными сталями: прежде всего здесь речь идет об их высокой удельной прочности и жесткости.

### **1. Анализ состояния вопроса**

В настоящее время в отрасли процесс дорнования осуществляют протяжными устройствами или машинами для затягивания болтов с пневмогидравлическим приводом. Данные устройства имеют ряд недостатков: высокую трудоемкость процесса дорнования, наличие пневмогидравлических приводов к устройствам и др. [1].

Существуют также магнитно-импульсные установки (например, МИУ-П1), которые тоже не лишены недостатков: большая масса, громоздкие дорогостоящие накопители энергии, использование тока высокого напряжения [1].

Применение пневматических импульсных устройств дорнования, использующих принцип действия пневмоимпульсных клепальных молотков, положительно зарекомендовавших себя в производстве, позволяет реализовать общие преимущества импульсного метода упрочнения при одновременном устранении недостатков МИУ [1, 2].

Экспериментальные методы выбора рациональных технологических параметров процесса импульсного дорнования требуют значительных материальных, финансовых и временных затрат. Вместе с тем современный уровень развития программного обеспечения и вычислительной техники обеспечивает возможность численного моделирования этого процесса методом конечных элементов (МКЭ).

Целью данной работы является создание адекватной численной модели импульсного дорнования отверстий авиационных конструкций из титановых сплавов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- а) проведение поискового эксперимента;
- б) разработка численной модели;
- в) сравнение результатов эксперимента с решениями, полученными МКЭ.

## 2. Поисковый эксперимент

Для проведения эксперимента использовали образцы из титанового сплава BT6С толщиной 6 мм (рис. 1) и дорны из стали ХВГ ГОСТ 5950-73 (рис. 2).

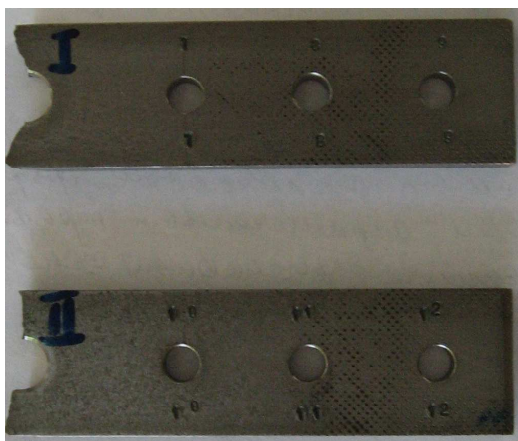


Рис. 1. Экспериментальные образцы



Рис. 2. Дорны

Дорнование отверстий выполняли пневмоимпульсным молотком мод. МПИ-90М (рис. 3).

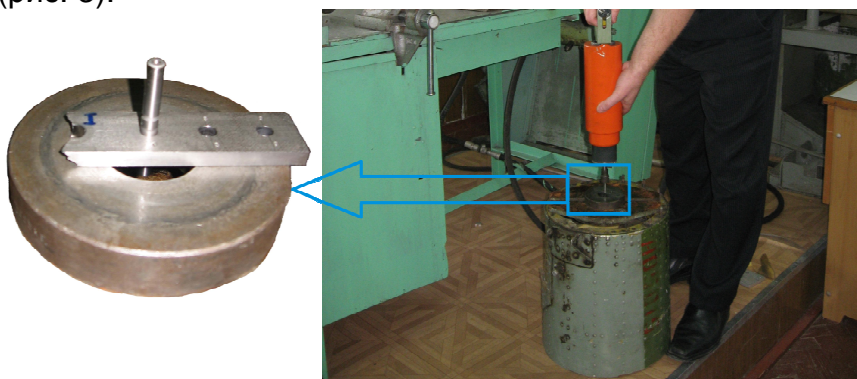


Рис. 3. Дорнование экспериментальных образцов пневмоимпульсным молотком мод. МПИ-90М

Для проведения замеров диаметра отверстий использовали:

- 1) нутромер (класс точности 0,01 мм); измеряли диаметр отверстия на трех уровнях в трех плоскостях (рис. 4), полученные в результате замеров значения усредняли по каждому из трех уровней;
- 2) микрометр МК 0-25 мм ГОСТ 6507-60 (класс точности 0,01 мм).

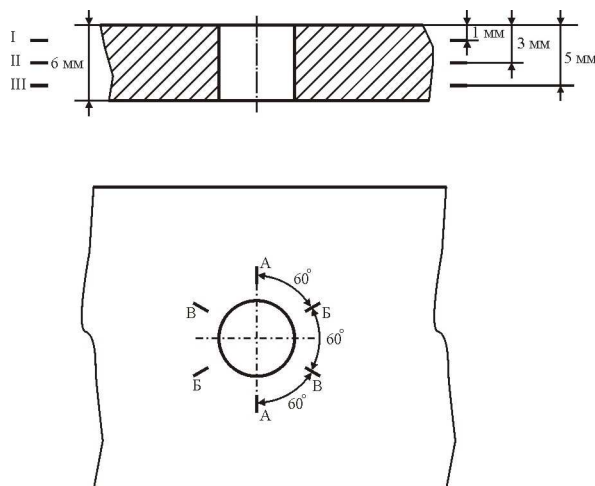


Рис. 4. Схема замеров диаметра отверстия

Для определения шероховатости отверстий до и после дорнования использовали профилограф-профилометр. Результаты замеров шероховатости представлены в табл. 1.

Таблица 1. Шероховатость поверхности отверстий

Шероховатость отверстий после сверла-развертки, Ra	Шероховатость отверстий после импульсного дорнования, Ra (начальный диаметр отверстия 5,9 мм)	Шероховатость отверстий после импульсного дорнования, Ra (начальный диаметр отверстия 5,95 мм)
1,53	1,56	1,10

### 3. Моделирование процесса импульсного дорнования отверстий в программном комплексе для динамического анализа «Ls-Dyna»

При моделировании процесса импульсного дорнования отверстий выполнены следующие виды работ:

- геометрическое моделирование технологической системы (ТС) импульсного дорнования отверстий, состоящей из дорна, пакета, подкрепляющего элемента и обжимки (рис. 5);
- моделирование физических свойств материалов элементов ТС;
- задание контактных условий взаимодействия элементов ТС;
- задание начальных условий работы элементов ТС.

При моделировании приняты следующие допущения:

- упрочнение материала пакета BT6C («MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY»:  $B = 850 \times 10^6$ ;  $m = 0,04$ ;  $\mu = 0,32$ ;  $E = 1,071 \times 10^{11}$  Па) осуществляется по степенному закону  $\sigma = B \varepsilon^m$  (рис. 6) [3];
- подкрепляющий элемент и обжимка – недеформируемые элементы («MAT\_RIGID»:  $\mu = 0,23$ ,  $E = 2,1 \times 10^{11}$  Па);
- материал дорна моделировали двумя способами:
  - 1) дорн считали недеформируемым элементом («MAT\_RIGID»:  $\mu = 0,23$ ;  $E = 2,1 \times 10^{11}$  Па);

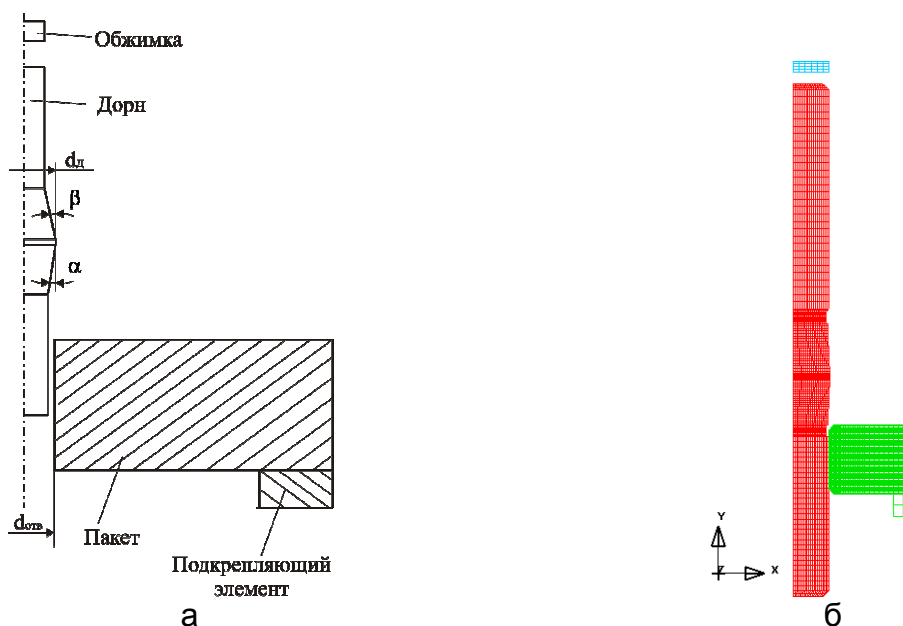


Рис. 5. Схема технологической системы (а) и КЭ модель (б) импульсного дорнования отверстий

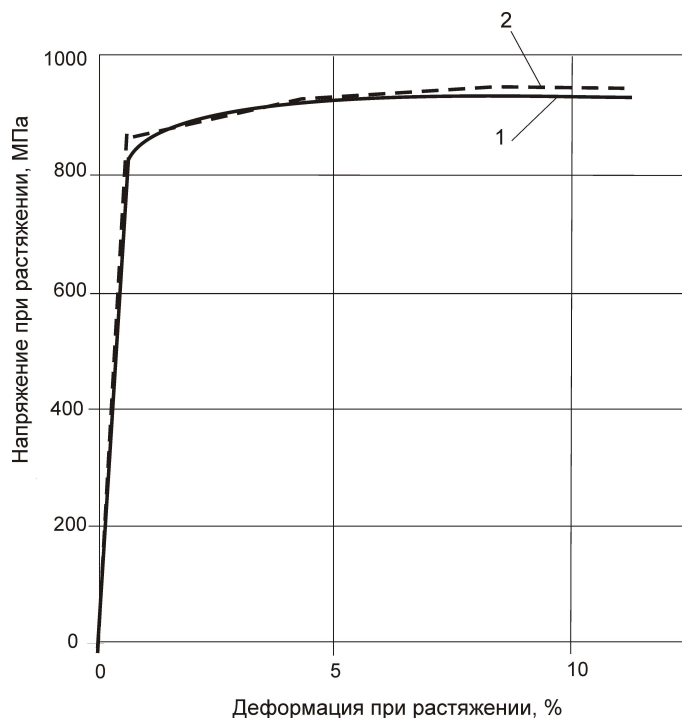


Рис. 6. Диаграмма деформирования образца из сплава BT6C при  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ :  
 1 – результаты испытаний на статическую прочность пластины из титанового сплава BT6C ГОСТ 19807-91 без отверстия, проведенные при нормальных условиях; 2 – диаграмма деформирования сплава BT6C, описанная степенным законом  $\sigma = B\varepsilon^m$

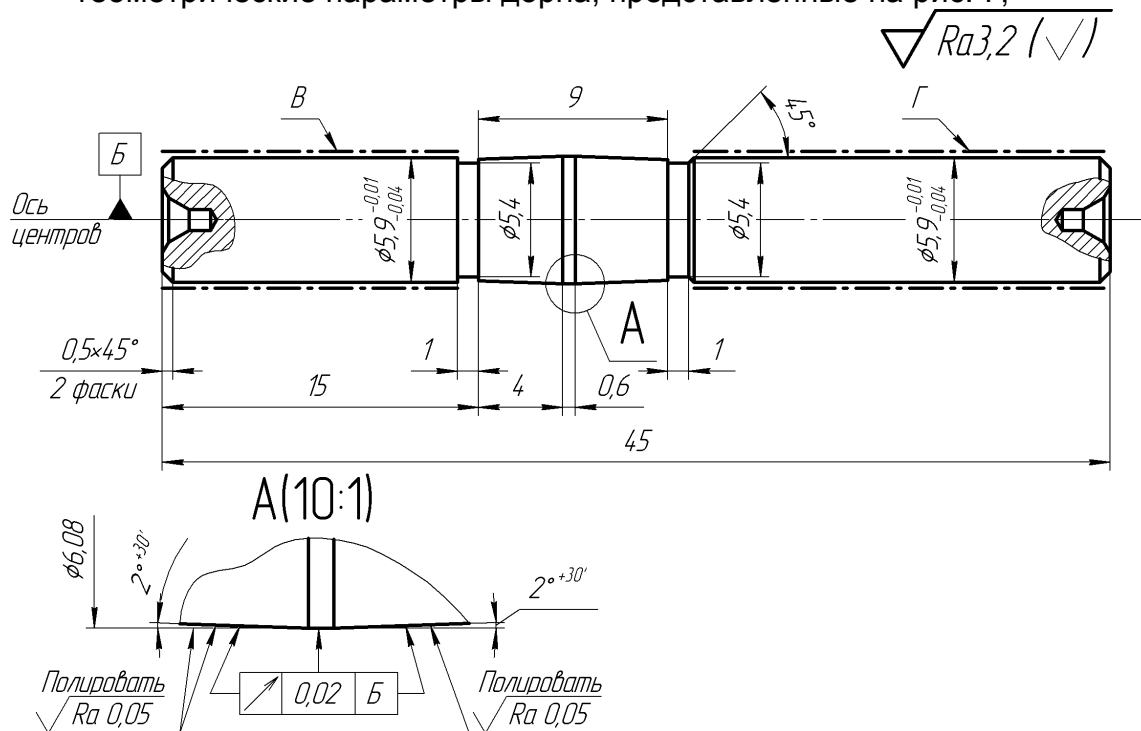
2) упрочнение материала дорна (стали ХВГ) осуществляется по степенному закону («MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY»:  $B = 1300 \times 10^6$ ;  $m = 0,04$ ;  $\mu = 0,23$ ;  $E = 2,1 \times 10^{11}$  Па):

- задача решена в осесимметричной постановке;
- трение на контактной поверхности описывается законом Амонта - Кулона;
- тепловые эффекты, вызванные пластическим деформированием, не учитывали.

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

При моделировании использовали следующие параметры технологического процесса:

- геометрические параметры дорна, представленные на рис. 7;



1. 62...65 HRC<sub>3</sub>.
2. Твердость поверхностей В и Г - 48...52 HRC<sub>3</sub>.
3. Шероховатость поверхностей В и Г -  $\sqrt{Ra 0,8}$ .
4. Неуказанные предельные отклонения по ОСТ 1 00022-80.
5. Центровые отверстия по ГОСТ 14034-74, форма В1.

Рис. 7. Геометрические параметры дорна

- диаметр отверстий  $d_{отв} = 5,9$  и  $5,95$  мм;
- углы дорна:  $\alpha = 2,5^0$ ,  $\beta = 2,5^0$ ;
- толщина пластины  $S = 6$  мм;
- начальная скорость дорнования  $V_n = 20$  м/с (энергия удара  $E = 60$  Дж);
- коэффициент трения  $\mu = 0,07$  (используется смазка – индустриальное масло И-20); на Airbus и Boeing для смазки используют цитиловый спирт, который исключает загрязнение поверхности отверстия и деталей, необходимость разборки конструкции.

Результаты моделирования суммарных напряжений представлены на рис. 8 и 9.

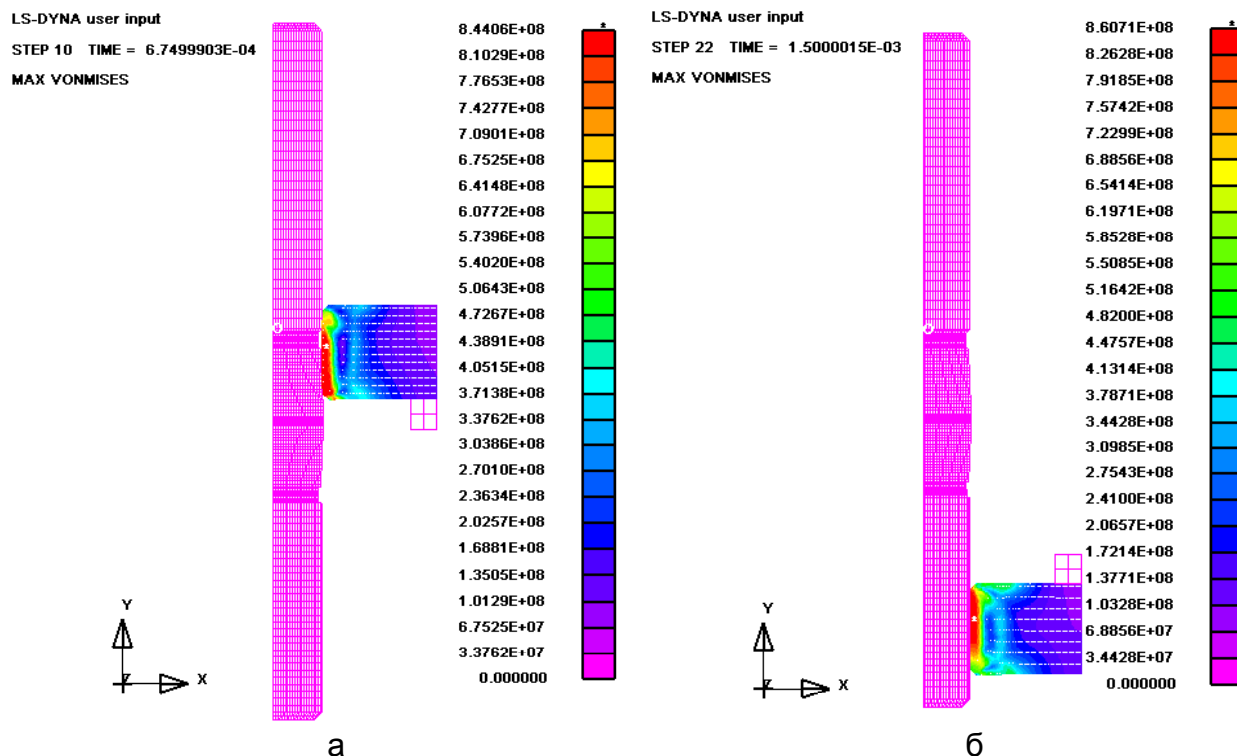


Рис. 8. Конечно-элементная модель суммарных напряжений в зоне отверстия при импульсном дорновании недеформируемым дорном: а – прямое дорнование; б – реверсное дорнование

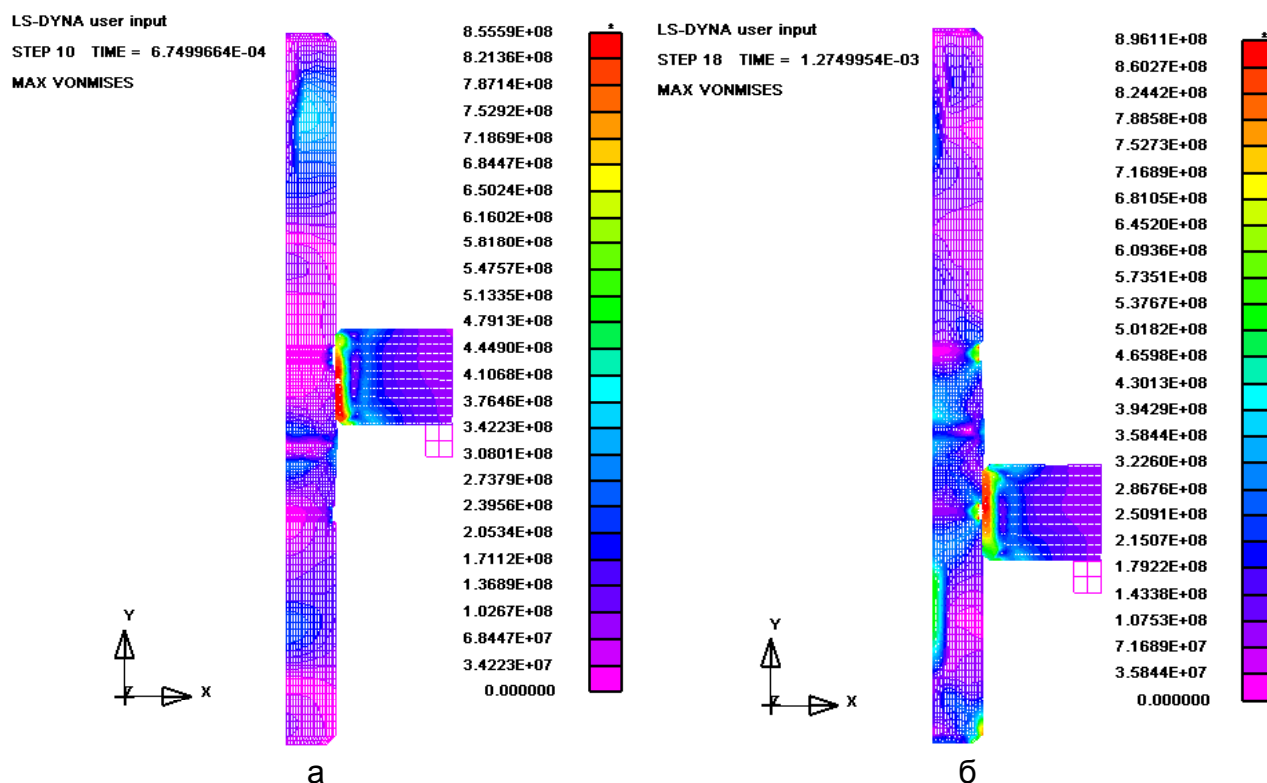


Рис. 9. Конечно-элементная модель суммарных напряжений в зоне отверстия при импульсном дорновании деформируемым дорном: а – прямое дорнование; б – реверсное дорнование

#### 4. Моделирование процесса импульсного дорнования отверстий в программном комплексе "Abaqus"

При моделировании использовали те же параметры технологического процесса, а также те же допущения, что и при моделировании в "Ls-Dyna". Единственным отличием является описание модели дорна: дорн принимали деформируемым телом, упрочнение материала дорна – (стали ХВГ  $E = 2,1 \times 10^{11}$  Па;  $\mu = 0,23$ ) согласно диаграмме упрочнения по классической модели (рис. 10).

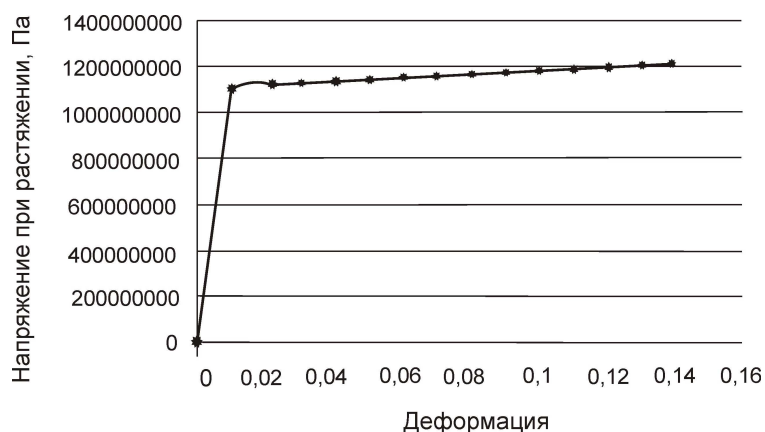


Рис. 10. Диаграмма деформирования образца из аналога стали ХВГ (сталь SKS3) при  $T = 20^\circ C$

Результаты моделирования суммарных напряжений представлены на рис. 11 и 12.

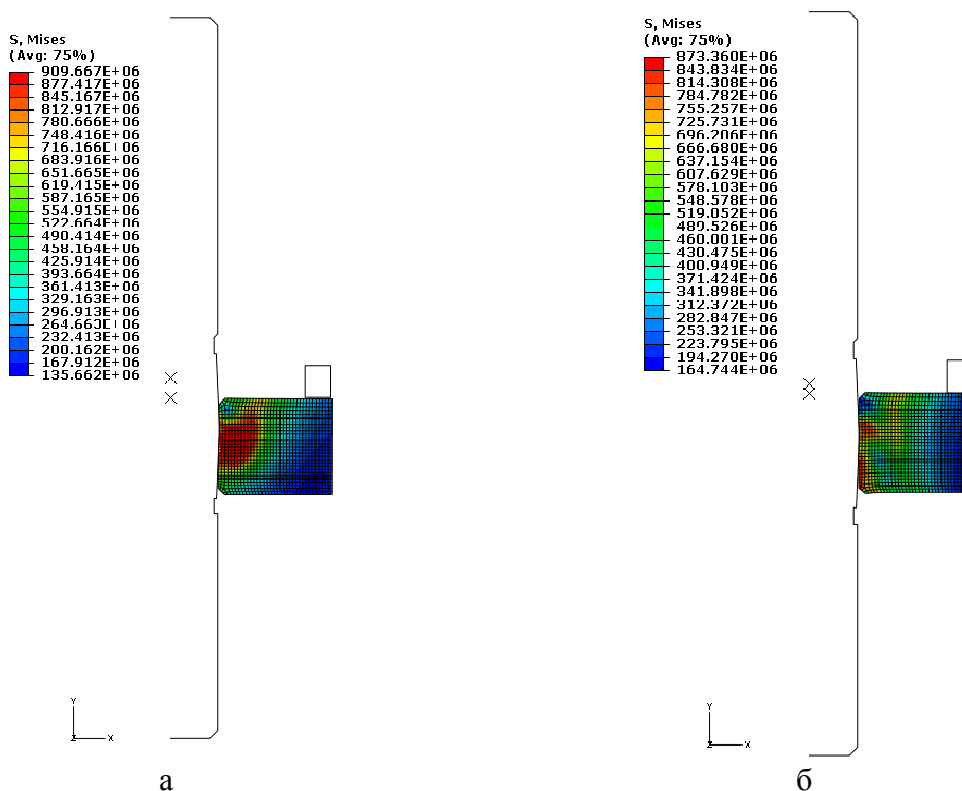


Рис. 11. Конечно-элементная модель суммарных напряжений в зоне отверстия при импульсном дорновании недеформируемым дорном: а – прямое дорнование; б – реверсное дорнование

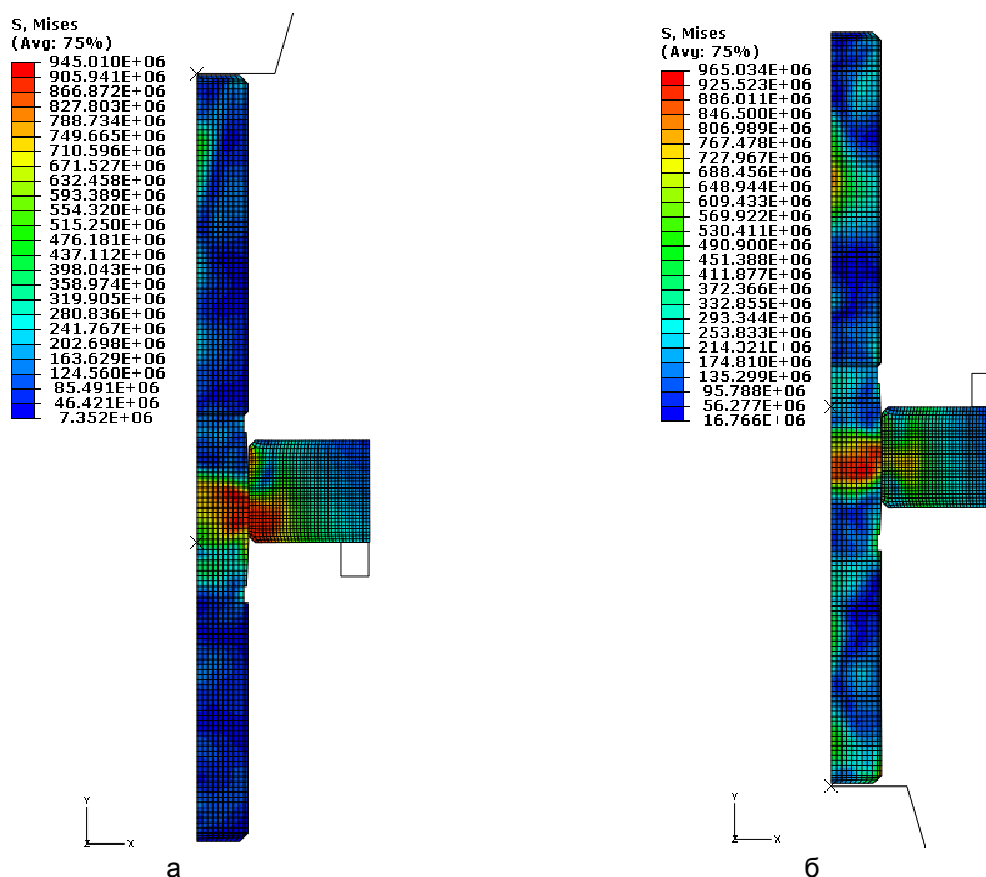


Рис. 12. Конечно-элементная модель суммарных напряжений в зоне отверстия при импульсном дорновании деформируемым дорном:  
 а – прямое дорнование; б – реверсное дорнование

Результаты сравнения эксперимента и численных моделей в системах "Abaqus" и "Ls-Dyna" по критерию корсетности отверстий представлены на рис. 13 и 14.

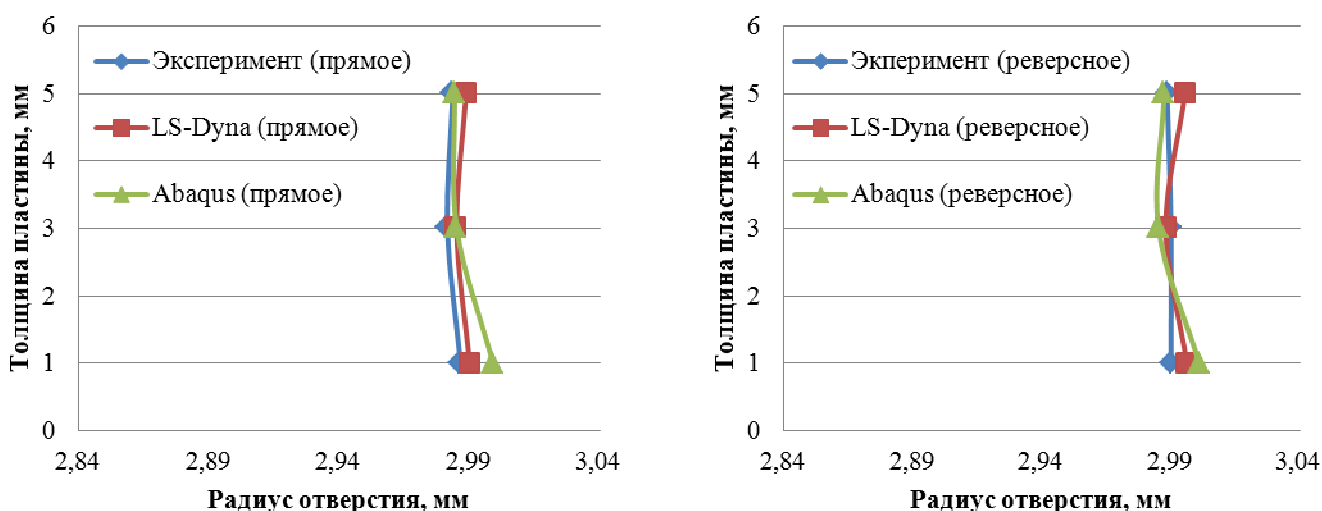


Рис. 13. Корсетность отверстий после импульсного дорнования (начальный диаметр отверстия 5,9 мм)



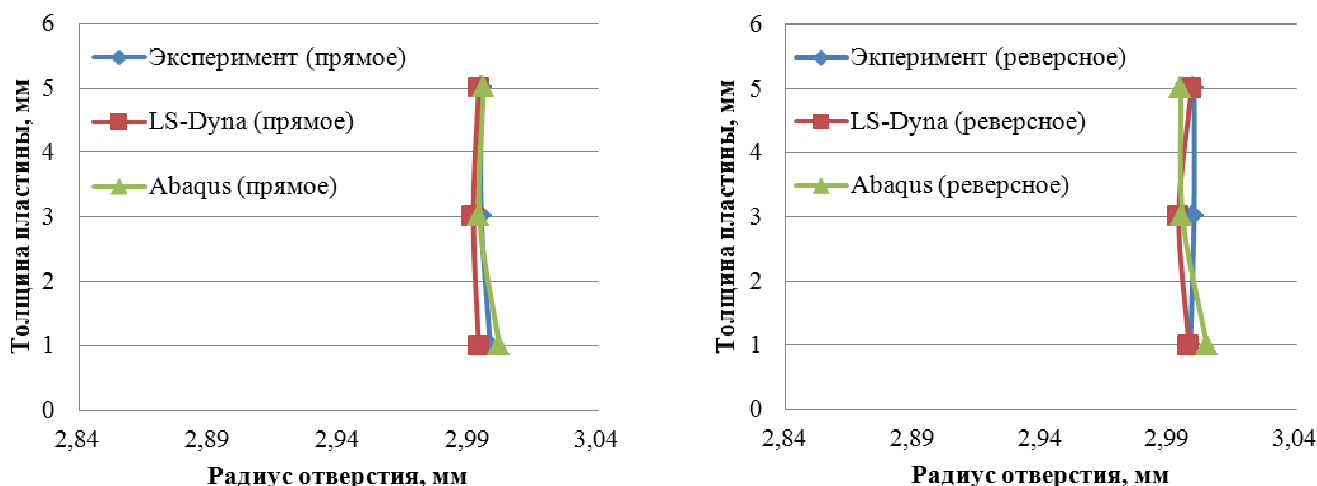


Рис. 14. Корсетность отверстий после импульсного дорнования (начальный диаметр отверстия 5,95 мм)

### 5. Макроанализ образцов

Для определения химического состава материала и просмотра макрошлифов использовали микроскоп электронный растровый с камерой низкого вакуума и системой энергодисперсионного микроанализа РЭМ-106.

Для выявления границ зерен и включений по данным Шредера использовали раствор следующего состава: 2 мл HNO<sub>3</sub>, 2 мл HF и 96 мл H<sub>2</sub>O.

Фото макрошлифов, а также результаты численного моделирования (приведена картина остаточных деформаций) представлены на рис. 5.

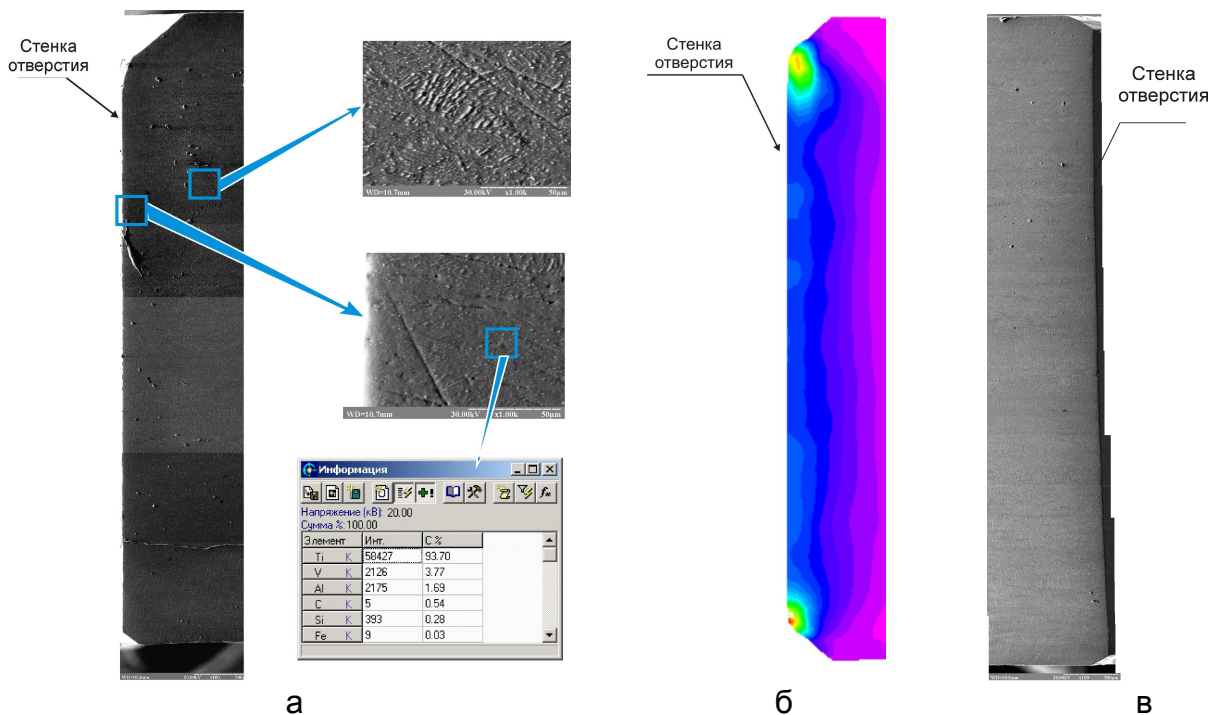


Рис. 5. Макрошлиф (а) и конечно-элементная модель деформации (б) в зоне отверстия после импульсного дорнования; макрошлиф в зоне просверленного отверстия (в)

Результаты макроанализа выявили следующее:

– в образцах после импульсного дорнования возле стенки отверстия границы между зерен плохо протравлены по сравнению с зернами, находящимися на некотором удалении от стенки отверстия, что свидетельствует о более высоких деформациях возле стенки отверстия;

– в образце после сверления зерна не имеют больших отличий по всей глубине от стенки отверстия.

В табл. 2 представлен химический состав материала ВТ6С, из которого можно сделать вывод, что в представленных образцах превышен процентный состав титана и имеет место недостаток алюминия.

Таблица 2. Химический состав материала ВТ6С (в %)

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примеси
до 0,25	до 0,1	до 0,15	3,5 – 4,5	до 0,05	87,7 – 91,2	5,3 – 6,5	до 0,3	до 0,15	до 0,015	прочих 0,3

### Выводы

1. Шероховатость отверстий после импульсного дорнования образцов из титанового сплава ВТ6С при натяге больше 3% равна шероховатости после сверления, а при небольшом натяге уменьшается на 28%.

2. Макроанализ дорнованных образцов показывает, что при импульсном дорновании линии деформации находятся вблизи стенок отверстия и эти результаты сходны с результатами численного моделирования.

3. Численное моделирование процесса импульсного дорнования в программном комплексе "Ls-Dyna" дает меньшую погрешность (до 15%) с результатами эксперимента по сравнению с системой "Abaqus" (до 45%).

4. Конечно-элементная модель при импульсном дорновании деформируемым дорном, созданная в "Ls-Dyna", является адекватной.

### Список литературы

1. Воронько В.В. Скоростное дорнование отверстий авиационных конструкций / В.В. Воронько // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 41. – Х., 2009. – С. 213 – 226.

2. Воробьев Ю.А. Особенности технологического процесса и инструмента импульсного дорнования отверстий / Ю.А. Воробьев, В.Г. Чистяк, В.В. Воронько // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 5. – С. 37 – 41.

3. Оценка влияния упрочнения отверстий в пластинах из титанового сплава на их усталостную долговечность / Г.А. Кривов, В.Н. Шулепов, Е.Г. Шитоха и др. // Технологические системы. – 2009. – № 5. – С. 112 – 117.

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

Поступила в редакцию 14.05. 2010

## **Верифікація числової моделі процесу імпульсного дорнування отворів авіаційних конструкцій із титанових сплавів**

Наведено результати пошукового експерименту з дорнування отворів у зразках із титанового сплаву BT6C з використанням пневмоімпульсного молотка моделі МПІ-90М. Створено скінченно-елементну модель технологічного процесу імпульсного дорнування отворів авіаційних конструкцій із титанових сплавів у програмних пакетах Ls-Dyna і Abaqus. Показано макрошліфи в зонах отворів до і після імпульсного дорнування. Проведено порівняння результатів числового моделювання, натурного експерименту і результатів мікроскопічного аналізу.

**Ключові слова:** імпульсне дорнування, пневмоімпульсний пристрій, макрошліф, числове моделювання, Ls-Dyna, Abaqus.

## **Verification of numeral model of process of the impulsive burnishing of openings of aviation constructions from titanic alloys**

This article presents the results of searching experiment with burnishing of openings in standards from a titanic alloy BT6C using MP-90M pneumoimpulse hammer; the finite-element model of the technological process of the impulsive burnishing of openings of aviation constructions of titanic alloys in the programming tool sets Ls-Dyna and Abaqus; macrosections in the areas of openings are shown before and after the impulsive burnishing; comparison of results of numeral design, model experiment and results of microscopic analysis are conducted.

**Keywords:** Impulsive burnishing, пневмоимпульсное устройство, макроосечение, numeral design, Ls-Dyna, Abaqus.