



УДК 629.735:33

Кривов Г.А.¹, Матвиенко В.А.¹, Гириш Р.И.², Резников В.А.¹, Стрижиус В.Е.², Гребенников А.Г.³¹ ОАО "Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии". Украина, Киев.² ЗАО "Гражданские самолеты Сухого". Российская Федерация, Москва.³ Национальный авиационный университет "ХАИ им. Н.Е. Жуковского", Украина, Харьков**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ****Анотація**

Приведені результати оцінки ефективності технологічних методів забезпечення ресурсу високонавантажених елементів конструкції планера літака з функціональними отворами. Запропонована технологія і спеціальні засоби технологічного оснащення для зміцнення отворів для перетікання палива в стрингерах кесонбаков літака SSJ.

Abstract

Results are presented for an effectiveness estimation of technological methods for provision of lifetime of the aircraft airframe structure high-loaded components containing functional holes.

Одной из важнейших задач, связанных с обеспечением заданного ресурса планера, явля-

ется достижение требуемого уровня усталостной долговечности его элементов, в том числе, содержащих функциональные отверстия. К ним, в частности, относятся отверстия для перетекания топлива (ОПТ), дренажные отверстия, другие.

Существует ряд конструктивных и технологических приемов, снижающих отрицательное влияние этих отверстий на долговечность конструкции. К конструктивным приемам относятся:

- выбор рациональной формы отверстий;
- введение местного утолщения конструктивного элемента в зоне отверстий;
- рациональное расположение отверстий и другие.

Оптимизация этих конструктивных параметров позволяет снизить коэффициент концентрации напряжений в 1,2–1,5 раза [1–2].

Практика эксплуатации и ресурсных испытаний натурных конструкций [1–2], а также предва-

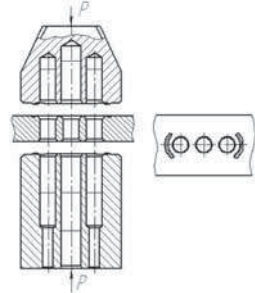
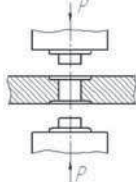
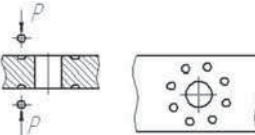
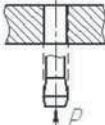
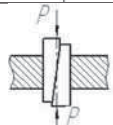

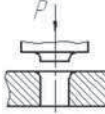
рительные испытания конструктивно подобного образца нижней панели крыла самолёта SSJ, в стрингерах которой были выполнены ОПТ, показали, что оптимизация конструкции стрингеров являлась не достаточной для обеспечения заданной долговечности панели крыла. Поэтому стала актуальной проблема обеспечения долговечности стрингеров упрочнением зоны ОПТ технологическими методами.

Известные технологические приемы [3–10] в ряде случаев являются более эффективным средством повышения усталостной долговечности

конструкций с функциональными отверстиями. Большинство из них заключается в создании в зонах отверстий благоприятного напряженно-деформированного состояния (НДС) в результате местного пластического деформирования с помощью упрочняющего инструмента. При использовании этих методов, в зоне отверстия возникают остаточные напряжения сжатия, уменьшающие амплитуду локальных напряжений и деформаций при циклическом нагружении конструктивного элемента, что обеспечивает повышение долговечности конструкции (табл. 1).

Таблица 1

Технологические методы упрочнения функциональных отверстий

Метод упрочнения	Технологическая схема	Коэффициент увеличения долговечности
Барьерное обжатие выштамповкой сегментных лунок		3–10
Кольцевое обжатие выштамповкой кольцевой площадки вокруг отверстия		3–15
Точечное обжатие		2,5–8
Дорнование отверстий		2–6
Упрочнение стенок отверстий клиновыми обжимками		3,5–10
Раскатка отверстий многороликовым раскатником		1,2–2,7
Чеканка кромок отверстий		1,5–2

Степень эффективности применения методов упрочнения зависит от конструктивных параметров деталей в зоне упрочняемого отверстия, величины эксплуатационных нагрузок, технологических параметров упрочняющей обработки и технико-экономических показателей применения метода упрочнения в серийном производстве. Этим, в частности, объясняется большой разброс значений коэффициентов увеличения долговечности при применении методов упрочнения. В связи с этим, решение по выбору метода упрочнения и основных технологических параметров его выполнения должно приниматься с учетом всех перечисленных выше обстоятельств.

Выбор метода упрочнения ОПТ в стрингерах нижних панелей кессонбаков самолета SSJ проведен на основе результатов комплексных исследований, включающих:

- численный анализ влияния конструктивных и технологических параметров на характеристики локального НДС в зоне ОПТ методом конечных элементов, реализуемого в системе инженерного анализ ANSYS [11];
- экспериментальную проверку влияния методов упрочнения на долговечность стрингеров;
- экспериментальную отработку технологических процессов упрочнения, оценку точности и стабильности этих процессов;
- разработку средств технологического оснащения упрочнения ОПТ в стрингерах;
- разработку производственной инструкции, регламентирующей технологический процесс упрочнения ОПТ в стрингерах нижних панелей кессонбаков самолета SSJ.

Конструкция и основные размеры типового стрингера в зоне ОПТ приведены на рис. 1. Материал стрингера – алюминиевый сплав 1163Т.

В качестве параметров, характеризующих НДС в зоне ОПТ, рассматривались главные растягивающие напряжения и деформации, а также эквивалентные напряжения Мизеса. Характер

распределения указанных характеристик определялся для диапазона напряжений $\sigma_{бр} = 100, 130$ и 150 МПа, возникающим в результате приложения нагрузок.

В качестве критериев оценки эффективности методов упрочнения приняты:

- коэффициент концентрации напряжений;
- коэффициент концентрации удельной энергии деформирования.

На основании результатов численных исследований методов упрочнения, приведенных на рис. 2, определен ранжированный (по предложенным критериям) ряд методов упрочнения ОПТ:

- барьерное обжатие;
- кольцевое обжатие;
- дорнование;
- раскатка.

Технологическим параметром, характеризующим степень упрочнения зоны ОПТ барьерным обжатием, является глубина лунок. Результаты численных исследований влияния глубины лунок при барьерном обжатии на характеристики НДС в зоне ОПТ (рис. 3) дают основания считать, что оптимальной является глубина лунок в пределах от $0,30$ мм до $0,40$ мм.

Технологическим параметром, характеризующим степень упрочнения зоны при дорновании ОПТ, является натяг. Результаты численных исследований влияния натяга при дорновании на характеристики НДС в зоне ОПТ (рис. 4) дают основания считать, что натяг при дорновании должен быть не менее $2,0\%$.

Для подтверждения результатов численных исследований проведены сравнительные усталостные испытания пластин с ОПТ, упрочненных методами раскатки, дорнования и барьерного обжатия, соответственно. Образцы испытывались на уровне нагружения: $\sigma_{бр, \min} = 0$ МПа; $\sigma_{бр, \max} = 130$ МПа.

Результаты испытаний показывают (рис. 5), что усталостная долговечность образцов, упроч-

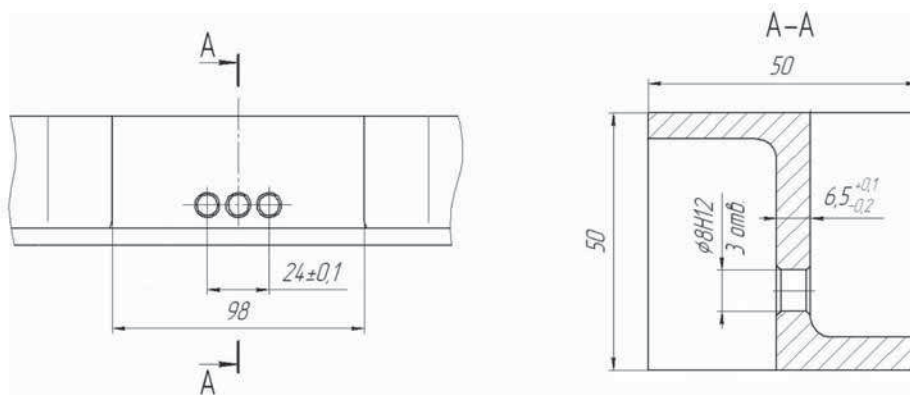


Рис. 1. Конструкция стрингера в зоне расположения ОПТ

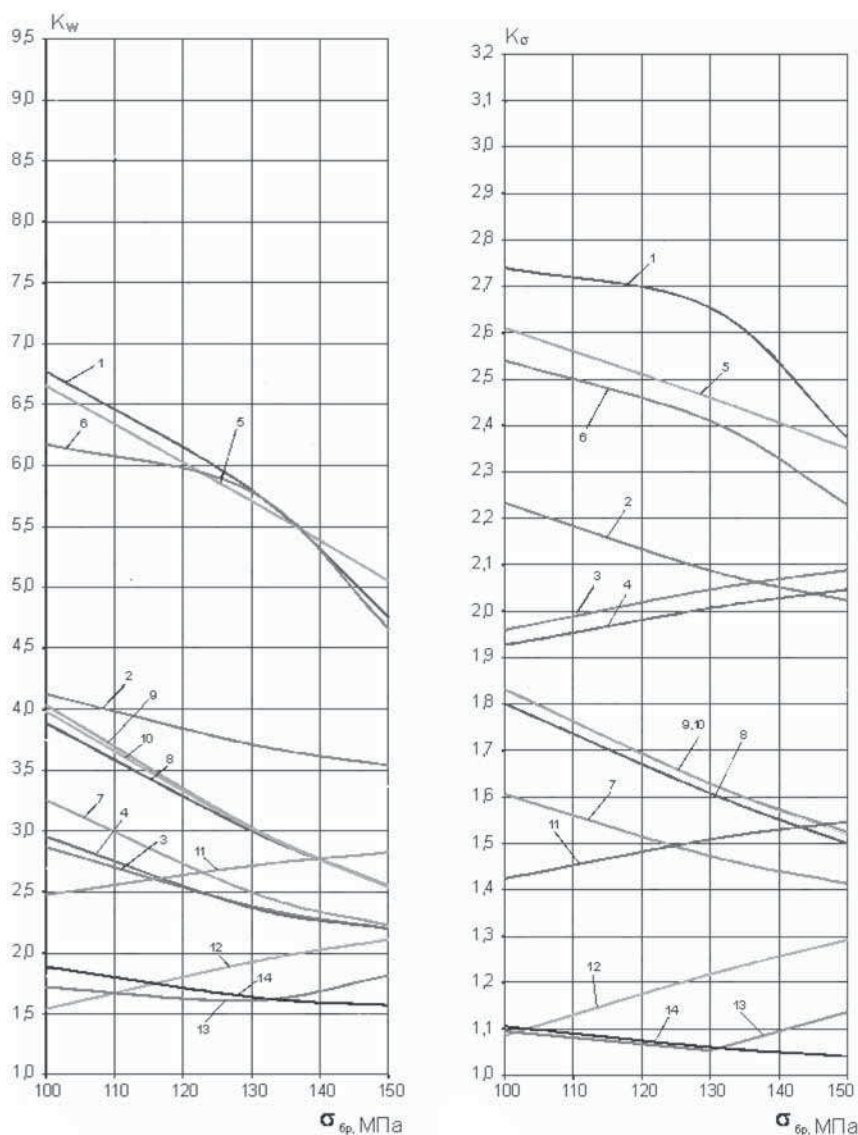


Рис. 2. Влияние уровня нагружения, методов и параметров упрочнения ОПТ на коэффициент концентрации удельной энергии деформирования (а) и коэффициент концентрации напряжений (б) в стрингере:

- 1 – без упрочнения; 2 – дорнование, натяг 1%;
 3 – дорнование, натяг 2%; 4 – дорнование, натяг 3%; 5 – раскатка, натяг 0,4%;
 6 – раскатка, натяг 0,6%; 7 – цилиндрическое обжатие, глубина 0,2%;
 8 – цилиндрическое обжатие, глубина 0,3%; 9 – цилиндрическое обжатие, глубина 0,4%;
 10 – цилиндрическое обжатие, глубина 0,5%; 11 – барьерное обжатие, глубина 0,2 мм;
 12 – барьерное обжатие, глубина 0,3 мм; 13 – барьерное обжатие, глубина 0,4 мм;
 14 – барьерное обжатие, глубина 0,5 мм

ненных дорнованием и барьерным обжатием, практически одинаковая и выше долговечности образцов с не упрочненными отверстиями, примерно, в пять раз.

Упрочнение отверстий раскаткой повышает усталостную долговечность образцов, примерно, в два раза по сравнению с долговечностью образцов с не упрочненными отверстиями.

молета SSJ в УкрНИИАТ разработаны следующие специальные средства технологического оснащения:

- установка для барьерного обжатия ОПТ модели УБО-50;
- комплект обжимок.

Установка для барьерного обжатия мод. УБО-50 (рис. 7) состоит из поршневого

Аналогичные результаты получены и при испытаниях конструктивно подобных образцов стрингеров с ОПТ (рис. 6). Испытания проводились при уровне нагружения $\sigma_{бр.мин} = -30$ МПа, $\sigma_{бр.маx} = 100$ МПа. Долговечность образцов, упрочненных барьерным обжатием и дорнованием, составляла более одного миллиона циклов, а упрочненных раскаткой – около 200 тысяч циклов.

На основании результатов проведенных численных исследований, испытаний усталостной долговечности образцов с ОПТ и технологической обработки процессов упрочнения ОПТ, расположенных группами из трех отверстий, принято решение для упрочнения ОПТ в стрингерах нижних панелей кессона крыла самолета SSJ применять метод барьерного обжатия, как основной. Этот метод и по таким показателям как трудоемкость и надежность контроля качества упрочнения является более предпочтительным, чем остальные.

Барьерное обжатие ОПТ выполняется после операций формообразования стрингера, перед его поверхностным упрочнением и анодированием.

Для выполнения барьерного обжатия ОПТ в стрингерах нижних панелей кессонбаков са-

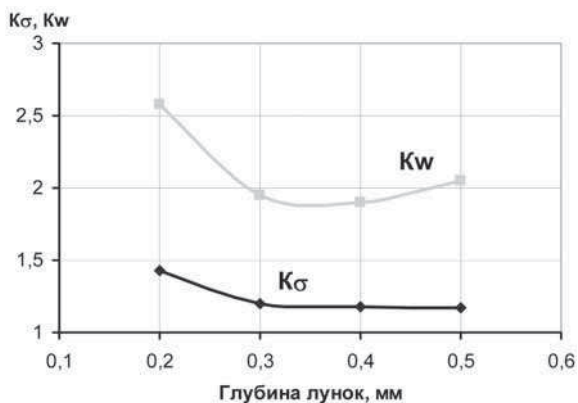
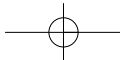


Рис. 3. Зависимость коэффициента концентрации напряжений (K_{σ}) и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования (K_w) от глубины лунок при барьерном обжатии

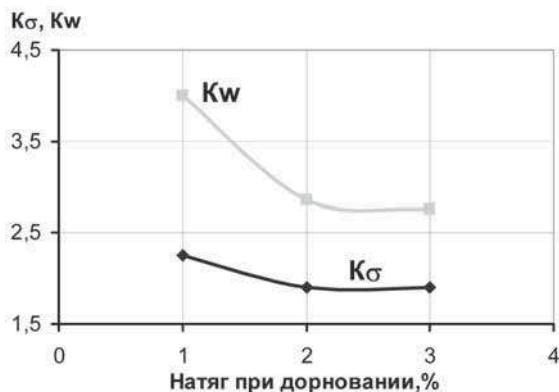


Рис. 4. Зависимость коэффициента концентрации напряжений (K_{σ}) и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования (K_w) от натяга при дорновании

пневмогидравлического привода 1 и силовой опоры 2, закрепленных на основании 3. Источником питания установки для барьерного обжатия рабочей жидкостью давлением 23,5 МПа служит насос пневмогидравлический мембранный модели НПМ-2ВМ разработки УкрНИИАТ.

Технические характеристики установки УБО-50:

Наибольшее рабочее усилие, кН	60
Рабочий ход поршня, мм	40

Давление в полостях цилиндра,

МПа:	
- рабочего хода (масло)	23,5 ± 10%
- обратного хода (воздух)	0,49 ± 10%

Габаритные размеры, мм:

- длина	354
- ширина	140
- высота	94

Выштамповка кольцевых сегментных лунок при барьерном обжатии осуществляется комплектом из двух обжимок (рис. 8) одновременно с обеих сторон стенки стрингера. Форма и размеры лунок обеспечиваются конструктивным исполнением рабочей части обжимок. Взаимное базирование обжимок и их базирование относительно упрочняемых ОПТ осуществляется с помощью пальцев, запрессованных в одну из обжимок.

Упрочнение отдельно расположенных функциональных отверстий, например дренажных, целесообразно выполнять методом дорнования. При практически одинаковой в этом случае трудоемкости дорнования и барьерного обжатия, расходы

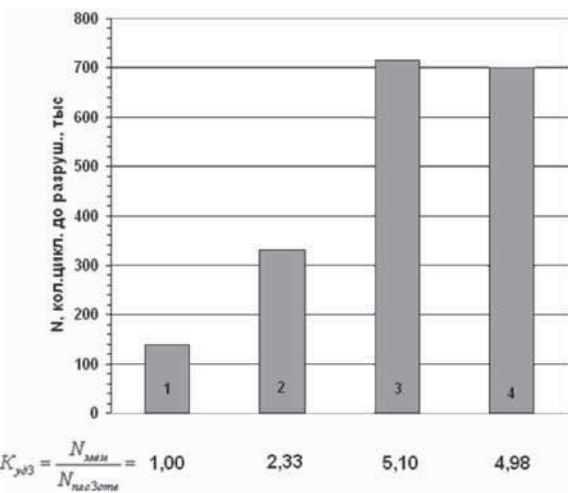


Рис. 5. Влияние метода упрочнения и количества отверстий на долговечность пластин с ОПТ при $\sigma_{бр\max} = 130$ МПа:

1 – с тремя отверстиями без упрочнения; 2 – с тремя отверстиями, упрочнение раскаткой; 3 – с тремя отверстиями, упрочнение дорнованием; 4 – с тремя отверстиями, упрочнение барьерным обжатием

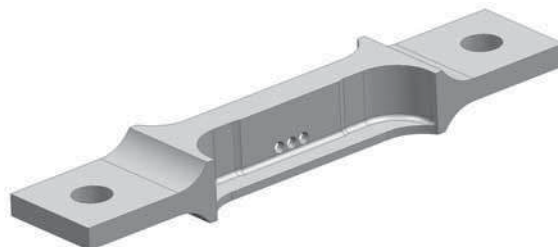
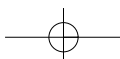


Рис. 6. Конструктивно подобный образец стрингера с ОПТ



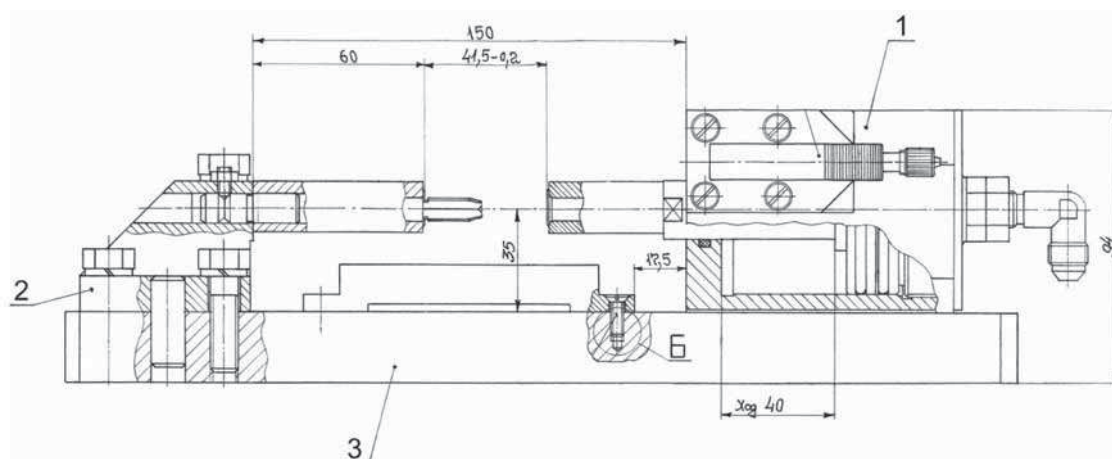


Рис. 7. Общий вид установки для барьерного обжата модели УБО-50

на упрочняющий инструмент при дорновании существенно ниже.

Для упрочнения отверстий методом дорнования УкрНИИАТ разработаны (рис. 9):

- дорны;
- механизированный инструмент для протягивания дорна через отверстие;
- машина пневмогидравлическая модели МД-8.

Машина модели МД-8 предназначена для дорнования отверстий диаметром до 10 мм. В качестве источника питания этой машины рабочей жидкостью давлением до 23,5 МПа могут служить насос пневмогидравлический мембранный модели НПМ-2ВМ или мультипликатора ПГА 70/240.

Техническая характеристика машины МД-8:

Диаметр дорнуемых отверстий, мм, не более	10
Наибольшее рабочее усилие, кН	15
Рабочий ход поршня, мм	20
Объем рабочей полости цилиндра, см ³	16,6
Давление в полостях цилиндра, МПа:	
- рабочего хода (масло)	23,5 ± 10%
- обратного хода (воздух)	0,49 ± 10%
Габаритные размеры, мм:	
- длина	150
- ширина	40
- высота	140
Масса, кг	1,3

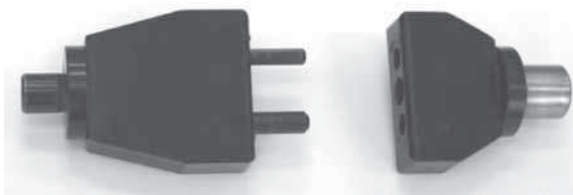


Рис. 8. Комплект обжимок для барьерного обжата

Для дорнования отверстий с ограниченными подходами в зону их расположения машина МД-8 оснащается угловой насадкой.

Достоинствами методов упрочнения отверстий барьерным обжатием и дорнованием является высокая степень стабильности технологических процессов упрочнения и практически полное отсутствие влияния субъективного фактора на качество упрочнения.

В результате проведенного комплекса исследовательских опытно-технологических и опытно-конструкторских работ созданы эффективные методы и средства упрочнения функциональных отверстий в высоконагруженных элементах конструкции планера самолета, изготовленных из алюминиевых сплавов.

Использование разработанных технологий позволяет обеспечить долговечность элементов конструкции в зоне функциональных отверстий на уровне, соответствующем общей концепции долговечности планера в целом.



Рис. 9. Комплект инструмента для дорнования отверстий

Результаты проведенных исследований могут быть эффективно использованы при решении аналогичных задач применительно к конструкциям из титановых сплавов.

Литература

1. *Экспериментальные* исследования влияния конструктивных и технологических факторов на выносливость типовых элементов авиационных конструкций. Б.И. Олькин, Н.И. Гильванова, Т.С. Родченко, А.М. Масюк, Д.Е. Чуик, Н.И. Щеглова, Г.Ф. Бартеньева, Труды центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского, сборник работ выпуск 2033, 1980.
2. *Панели* крыла с отверстиями для перелива топлива. А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев и др. Сопротивление усталости элементов конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. — С. 199–201.
3. *Увеличение* выносливости самолётных конструкций путём обжигания вокруг отверстий цилиндрических поясков. Шахатуни Е.А., Любарец Ф.М. — Авиационная промышленность, 1977. — № 9. — С. 12–13.
4. *Технологические* способы упрочнения отверстий местным глубоким пластическим деформированием. Сердюк А.А., Крапивин С.П., Рейдман А.О., Беспалько В.Н. — Авиационная промышленность, 1983. — № 8. — С. 8–11.
5. *Современные* технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / Пекарш А.И., Тарасов Ю.М., Кривов Г.А. и др. — М.: Аграф-пресс, 2006. — С. 229.
6. *Деформирующее* протягивание отверстий в пакетах из алюминиевых сплавов. Леонтьев А.А. — Авиационная промышленность, 1987. — № 9. — С. 7–9.
7. *Раскатка* и упрочнение отверстий в пакетах из разнородных материалов при сборке. Золотов В.В., Куликов В.И. — Авиационная промышленность, 1981. — № 10. — С. 14.
8. *Раскатка* точных отверстий. А.И. Ярковец, О.С. Сироткин, Ю.А. Кравченко. — Вестник машиностроения, 1976. — № 7. — С. 70–73.
9. *Патент* США 3 434 327 03.1966 г. STRESS COINING Eugene R. Speakman, Fullerton, Calif., assignor, by mesne assignments, to McDonnell Douglas Corporation.
10. *Патент* США 3 110 086 11.1963 г. COINING STRUCTURAL PARTIS Austin Phillips, Los Angeles, Calif., assignor to Douglas Corporation.
11. *Анализ* характеристик локального НДС с помощью системы ANSYS в пластине с отверстием, подверженной упрочнению дорнированием или глубоким пластическим деформированием и растяжению. Гребеников А.Г., Мовчан А.Ю., Гребеников В.А. — Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". — Вып. 32(1). Харьков: НАКУ, 2003.