

Влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения при растяжении на характеристики локального напряженно деформированного состояния полосы с отверстием

Государственное предприятие «Антонов»

Показано, что для пластины с отверстием в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение дорнования стенок отверстия с радиальным натягом от 1 до 3% способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,1 – 2,2 раза по сравнению с напряжением в полосе с отверстием. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,2 – 2 раза и 1,2 – 4,5 раза соответственно.

Ключевые слова: дорнование, метод конечных элементов, локальное напряженно-деформированное состояние, радиальный натяг, главные растягивающие напряжения эквивалентного отнулевого цикла, удельная энергия деформирования.

В работе [1] проанализированы конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности силовых элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий. Эффективными с точки зрения повышения усталостной долговечности элементов конструкции с концентраторами напряжений в виде отверстий являются технологические методы, основанные на глубоком пластическом деформировании материала в зоне отверстия. Анализ литературных источников [2 – 4] показал, что обработка полосы из В95Т в зоне отверстия методом дорнования с относительным натягом 3,0...3,5% повышает её долговечность в 3 – 5 раз. Обработка полосы из Д16Т в зоне отверстия ($\varnothing 6...12$ мм) дорнованием через технологическую втулку (натяг – 1,2; 2,4 и 3,6%) повышает её долговечность в 3,5 – 4 раза.

Изменение усталостной долговечности полосы с отверстием происходит вследствие изменения характеристик локального НДС в зоне отверстия, стенки которого обработаны дорнованием с радиальным натягом.

Целью работы является исследование влияния величины радиального натяга при дорновании на характеристики локального НДС растянутой полосы с отверстием.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ характеристик локального напряженно-деформированного состояния полосы с отверстием после его дорнования;
- определить влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения на характеристики локального НДС полосы с отверстием.

Геометрические размеры полосы с отверстием, принятые для анализа, показаны на рис. 1, геометрические размеры дорна – на рис. 2.

Толщина полосы – 5 мм. Материал полосы – алюминиевый сплав 1163.

В процессе анализа исследовали следующие значения радиального натяга при дорновании: 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0%. Величина растягивающих напряжений в сечении брутто дискретно принимали равной 0, 50, 100, 130, 150 и 200 МПа.

С учетом геометрической симметрии модели и характер нагрузки при моделировании рассмотрена 1/4 конструкции с заданием соответствующих условий симметрии. Дорн моделировали как абсолютно жесткое тело.

Расчетная схема полосы с отверстием показана на рис. 3.

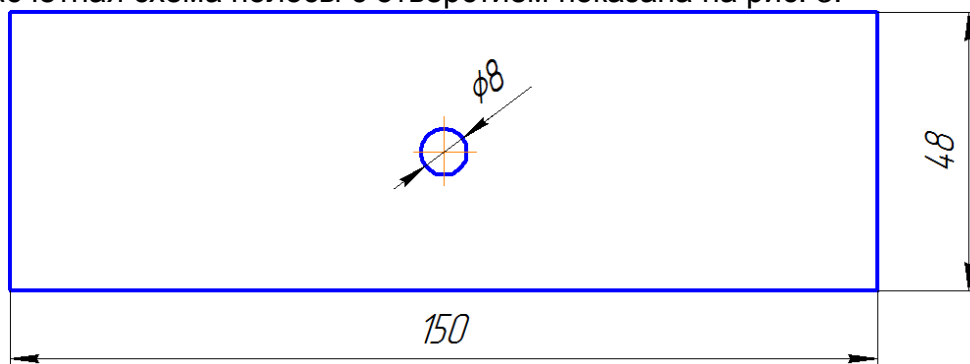


Рис. 1. Геометрические характеристики полосы с отверстием из материала 1163 л5

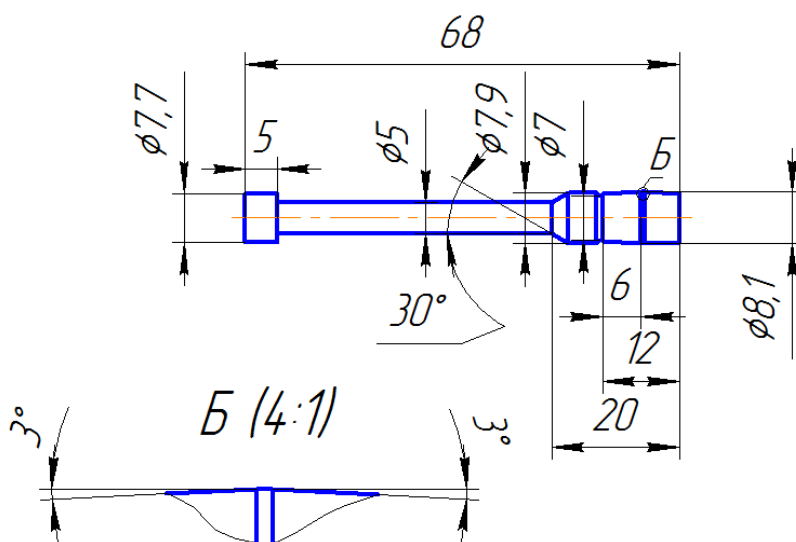


Рис. 2. Геометрические характеристики дорна

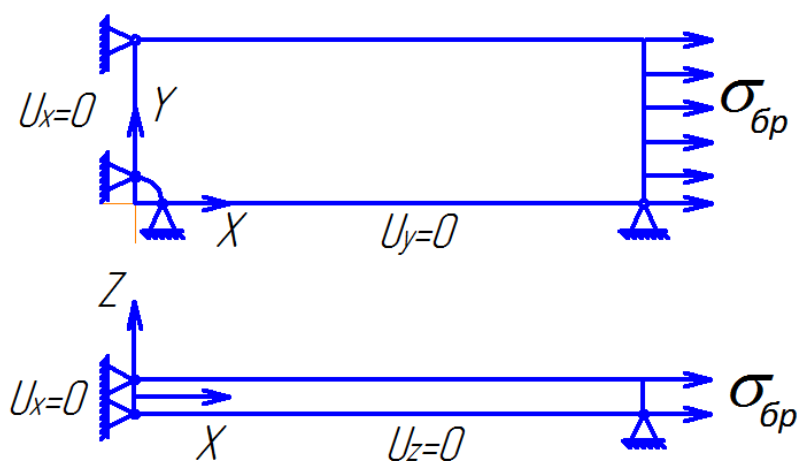


Рис. 3. Расчетная схема полосы с отверстием

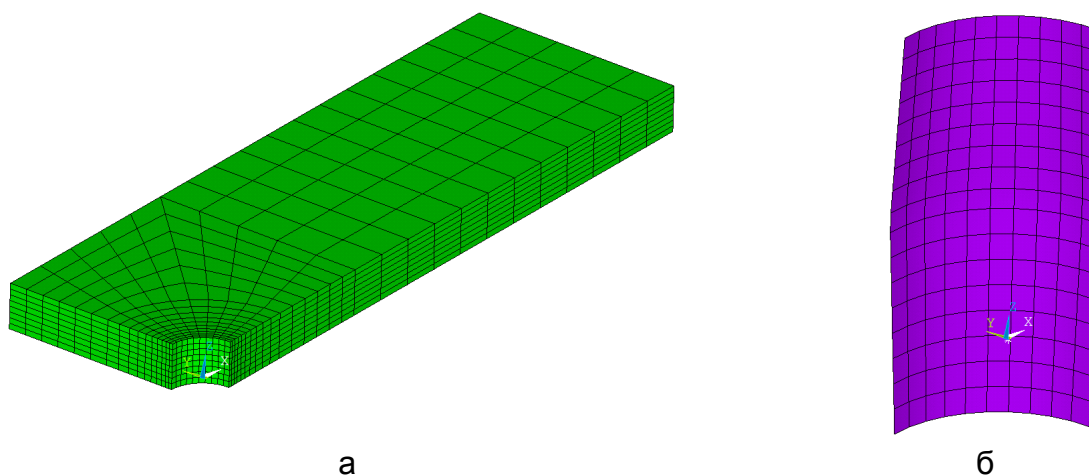
В качестве параметров, характеризующих локальное НДС полосы с отверстием, рассмотрены следующие: максимальные главные растягивающие напряжения эквивалентного отнулевого цикла (σ_{1max0}), упругая составляющая максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла (ϵ_{1max0}) и удельная энергия деформирования (w_{1max0}).

Перечисленные выше параметры определены численным методом с помощью метода конечных элементов, реализованного в системе ANSYS.

Для аппроксимации расчетной модели пластины выбраны восьмиузловые элементы твердого деформируемого тела, обладающие тремя степенями свободы в каждом из узлов (линейные перемещения вдоль осей X, Y, Z) [5]. Контактное взаимодействие дорна со стенкой отверстия описано общей моделью контакта типа «поверхность–поверхность» с применением кулоновской модели трения [6]. Значение коэффициента трения скольжения для пары «сталь-алюминий» принято равным 0,6 [7].

Особенностью решаемой задачи является возникновение локальных пластических деформаций стенок отверстия в результате применения поверхностного деформирования стенки отверстия. Эта особенность учтена при решении задачи путем применения полилинейной упругопластической модели поведения материала пластины с кинематическим законом упрочнения, описывающей эволюцию поверхности текучести в зависимости от накопленной пластической деформации в материале [7].

Конечно-элементные модели пластины и дорна показаны на рис. 4.



а
Рис. 4. Конечно-элементные модели:
а – пластины;
б – дорна

В ходе моделирования процесса дорнования выявлены следующие особенности:

- при дорновании наблюдается смещение материала в зоне контакта дорна со стенкой отверстия в осевом направлении, в результате чего на свободных поверхностях пластины образуются наплывы материала. Это особенно отчетливо выражено при больших значениях радиального натяга (см. рис. 5);
- характер распределения радиальных перемещений стенок отверстий по высоте является неравномерным (см. рис. 6).

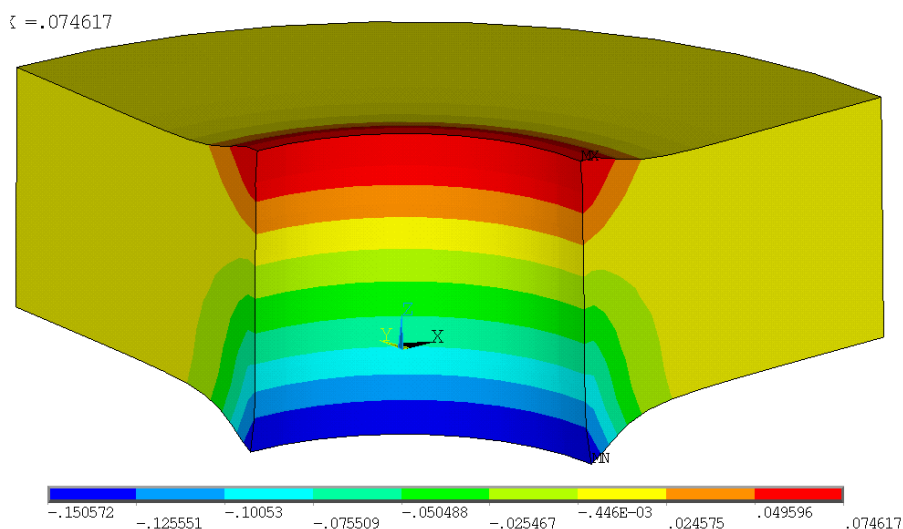


Рис. 5. Характер распределения осевых перемещений (U_z , мм) в пластине в зоне отверстия после дорнования (натяг – 3%)

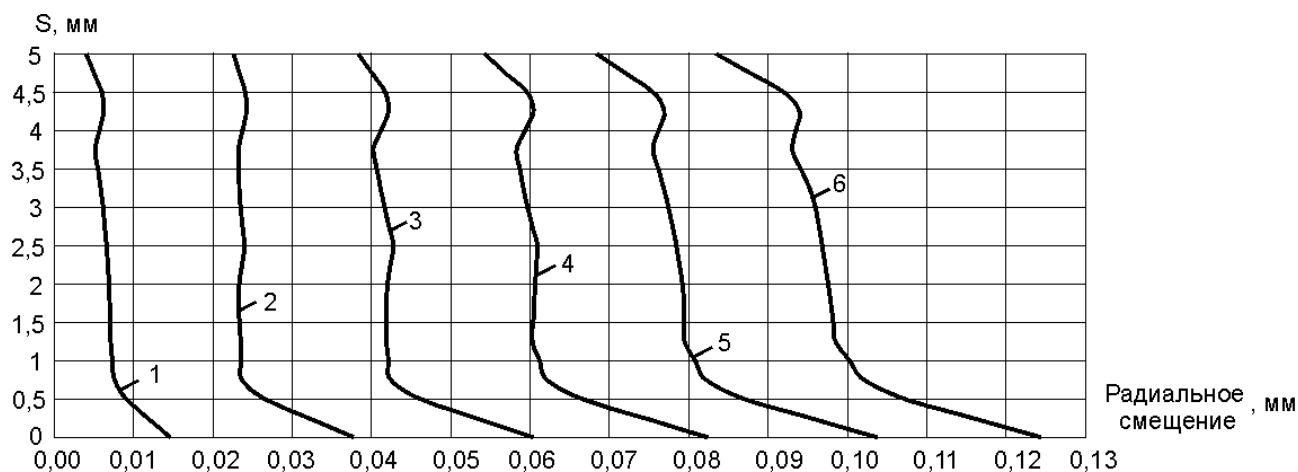


Рис. 6. Распределение радиальных перемещений (U_r , мм) в пластине в зоне отверстия после дорнования:

1 – натяг 0,5%, 2 – натяг 1,0%, 3 – натяг 1,5%, 4 – натяг 2,0%, 5 – натяг 2,5%, 6 – натяг 3,0%

При дорновании отверстия в материале пластины в зоне отверстия возникают остаточные сжимающие напряжения, величина которых превышает предел текучести материала. Глубина залегания данных напряжений зависит от величины радиального натяга при дорновании. Наличие остаточных сжимающих напряжений приводит к изменению цикла локальных напряжений в зоне отверстия, который является асимметричным, с определенным значением коэффициента асимметрии цикла. При анализе полученный асимметричный цикл приведен к эквивалентному отнулевому, с параметрами напряжений, определенными по формуле Одингга [4].

В результате решения поставленной задачи получены кривые распределения параметров НДС в сечении по оси отверстия, позволяющие оценить влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения на характери-

стики локального НДС, а также спрогнозировать изменение долговечности, выбрать величину радиального натяга, обеспечивающего повышение долговечности.

Схема обозначения путей, вдоль которых анализировались данные параметры, изображена на рис. 7.

Результаты исследования влияния уровня напряжений в сечении брутто на изменение характеристик локального НДС полосы с отверстием показана на рис. 8 – 13.

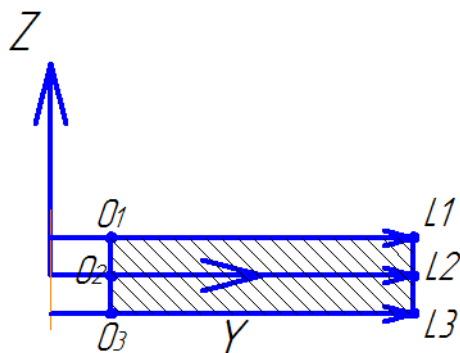


Рис. 7. Схема обозначения путей L1, L2 и L3.

На рис. 8–13 приняты следующие обозначения: 1 – $\sigma_{бр} = 50$ МПа, 2 – $\sigma_{бр} = 100$ МПа, 3 – $\sigma_{бр} = 130$ МПа, 4 – $\sigma_{бр} = 150$ МПа, 5 – $\sigma_{бр} = 200$ МПа.

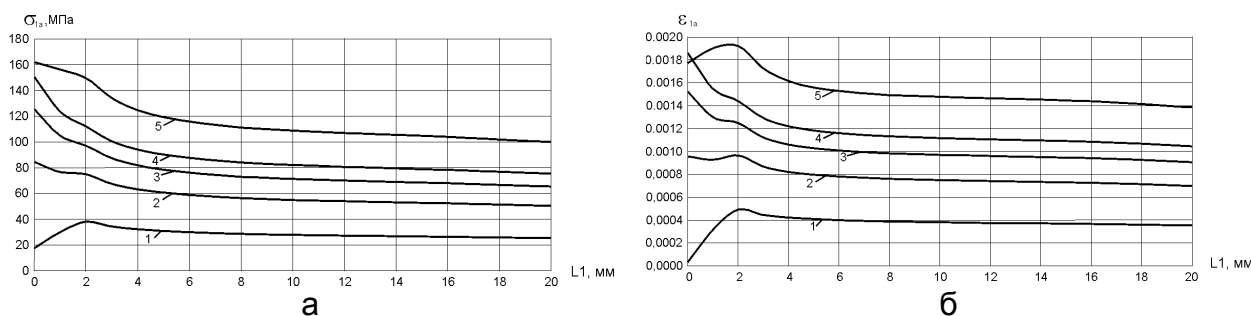


Рис. 8. Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути L1 в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 0,5% при разных значениях $\sigma_{бр}$

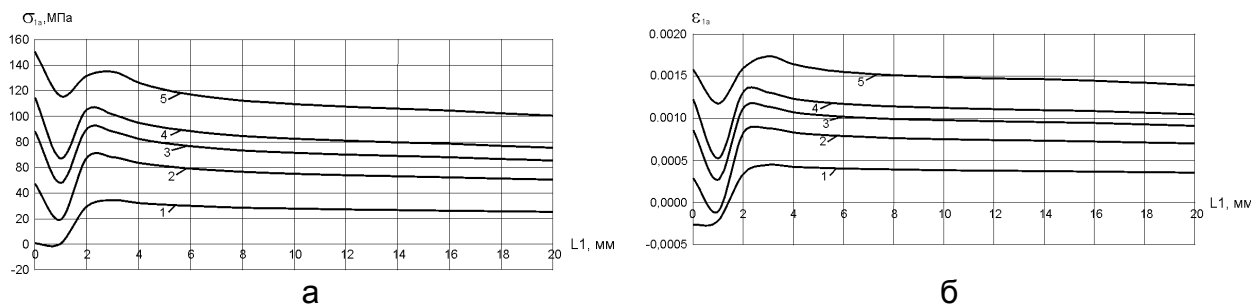


Рис. 9. Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути L1 в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 1,0% при разных значениях $\sigma_{бр}$

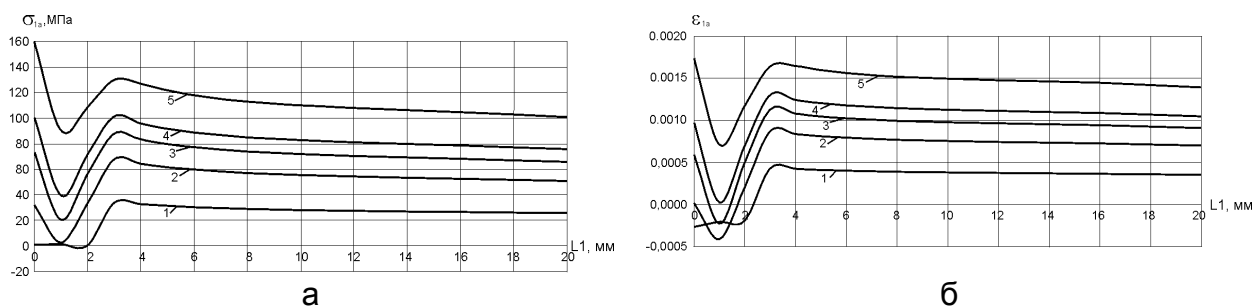


Рис. 10. Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути L1 в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 1,5% при разных значениях $\sigma_{бр}$

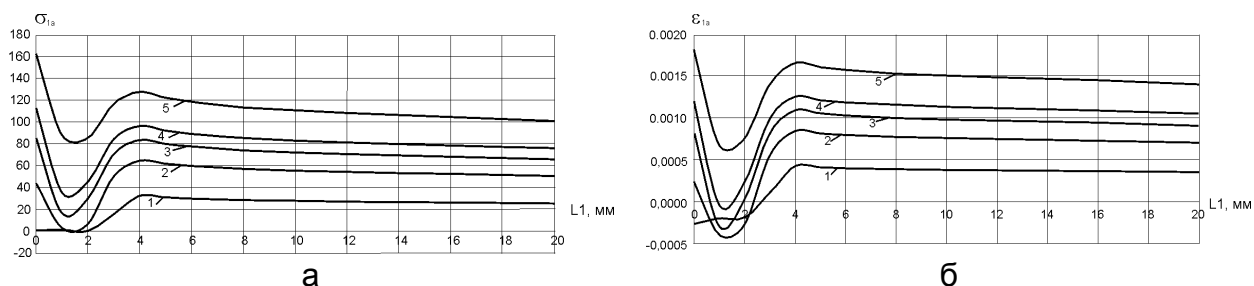


Рис. 11. Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути L1 в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 2,0% при разных значениях $\sigma_{бр}$

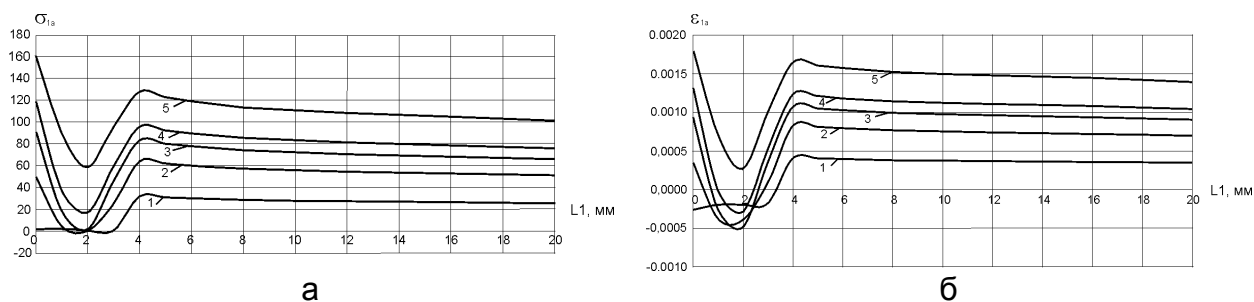


Рис. 12. Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути L1 в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 2,5% при разных значениях $\sigma_{бр}$

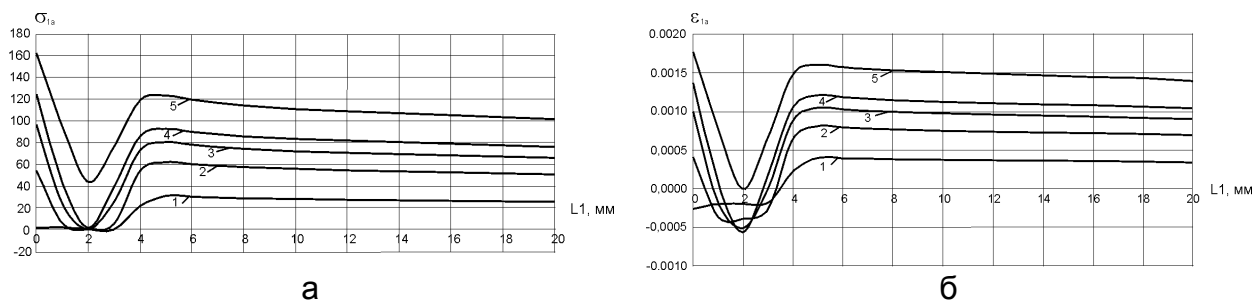


Рис. 13. Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути L1 в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 3,0% при разных значениях $\sigma_{бр}$

Результаты исследования влияния величины радиального натяга при дорновании на изменение характеристик локального НДС полосы с отверстием показаны на рис. 14 – 22, где приняты следующие обозначения: 1 – натяг 0,0%, 2 – натяг 0,5%, 3 – натяг 1,0%, 4 – натяг 1,5%, 5 – натяг 2,0%, 6 – натяг 2,5%, 7 – натяг 3,0%.

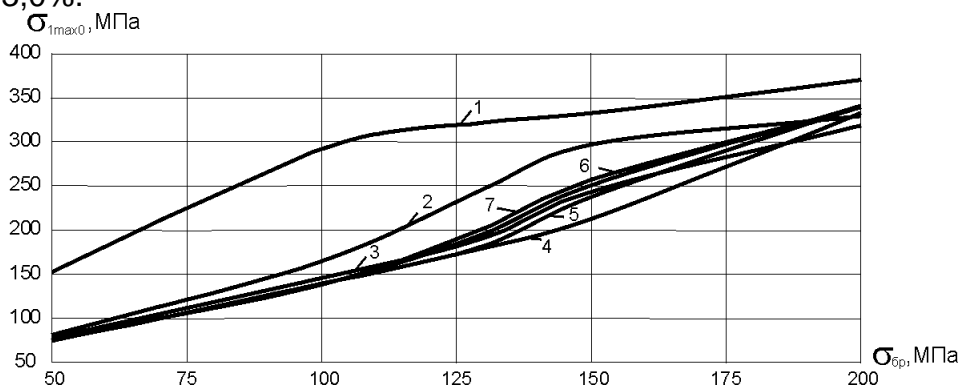


Рис. 14. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L1)

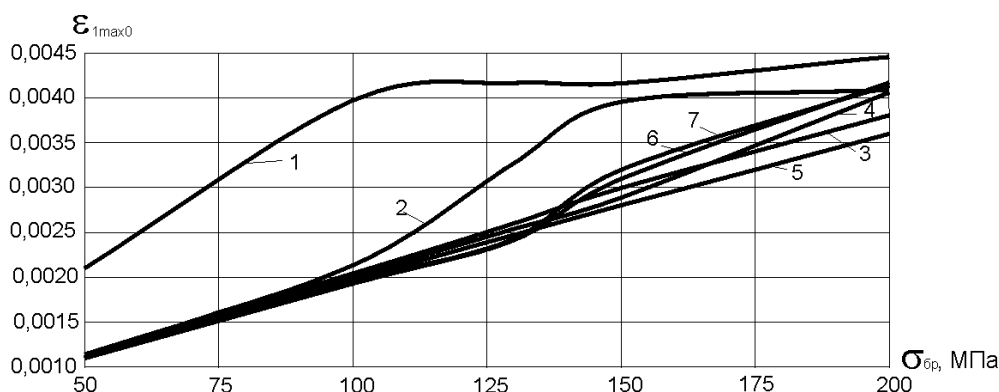


Рис. 15. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L1)

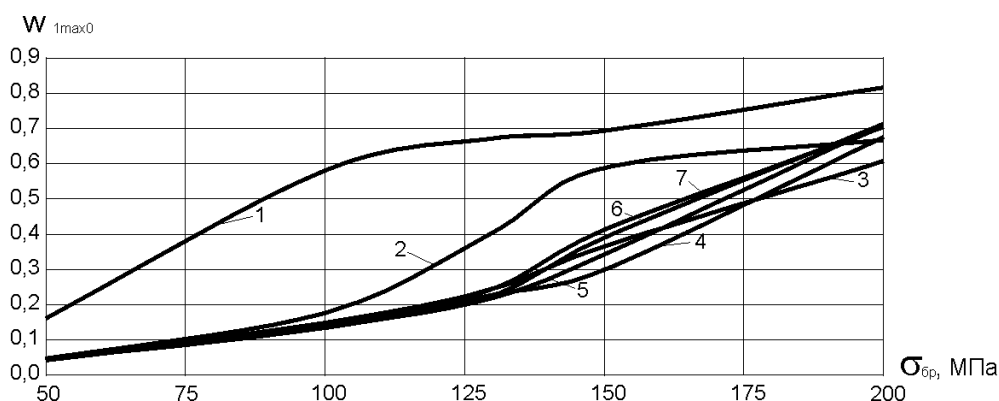


Рис. 16. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L1)

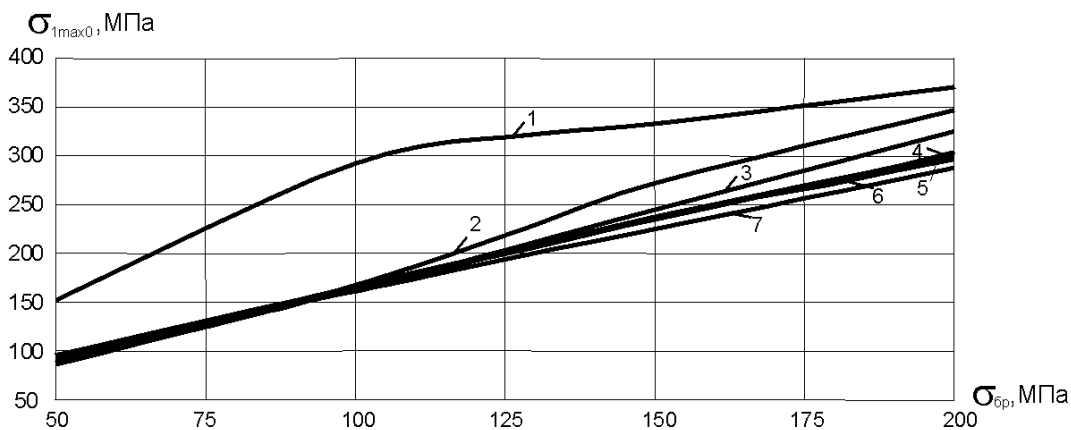


Рис. 17. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L2)

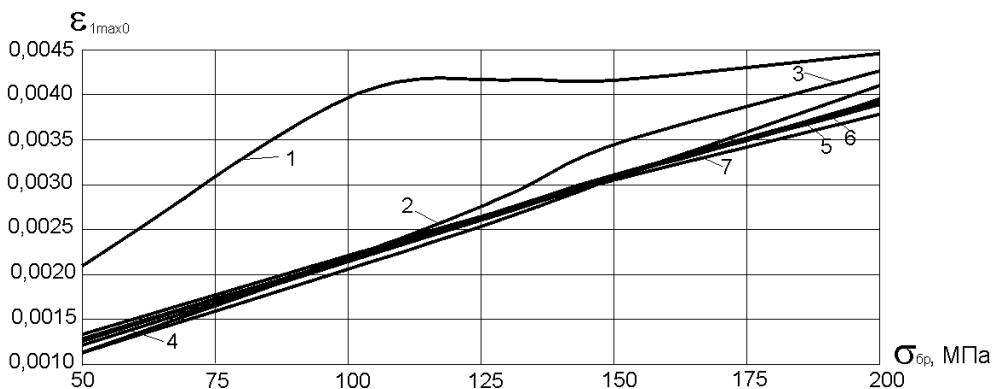


Рис. 18. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L2)

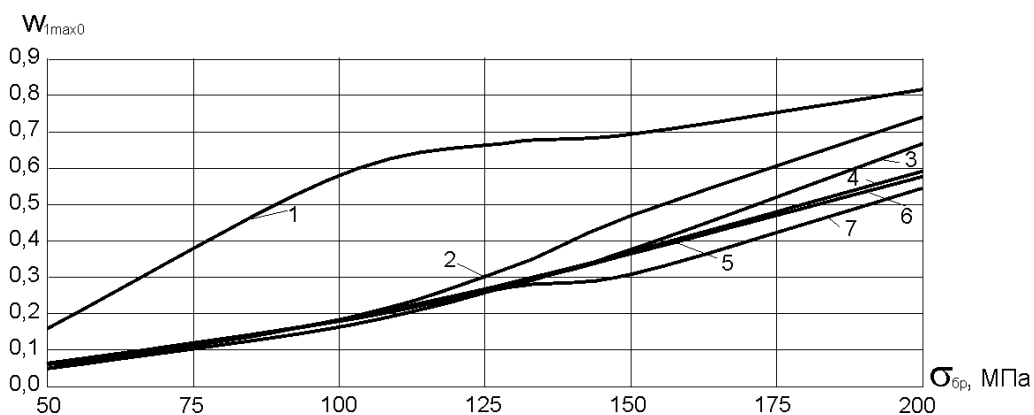


Рис. 19. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L2)

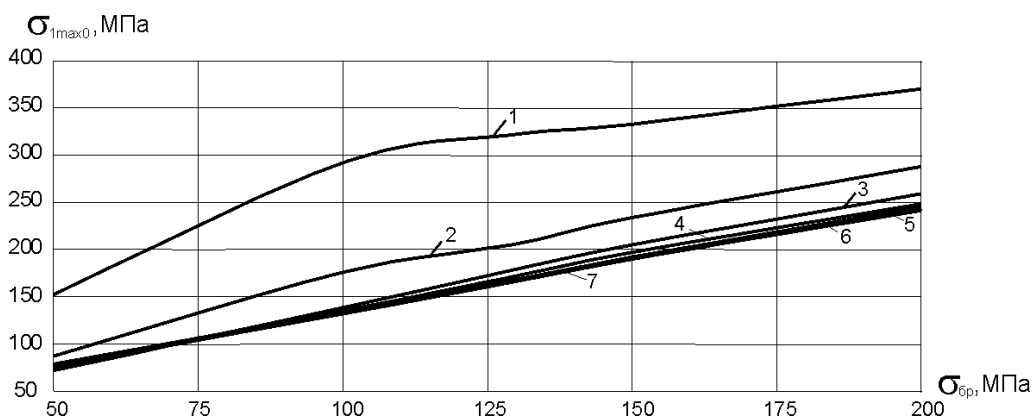


Рис. 20. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L3)

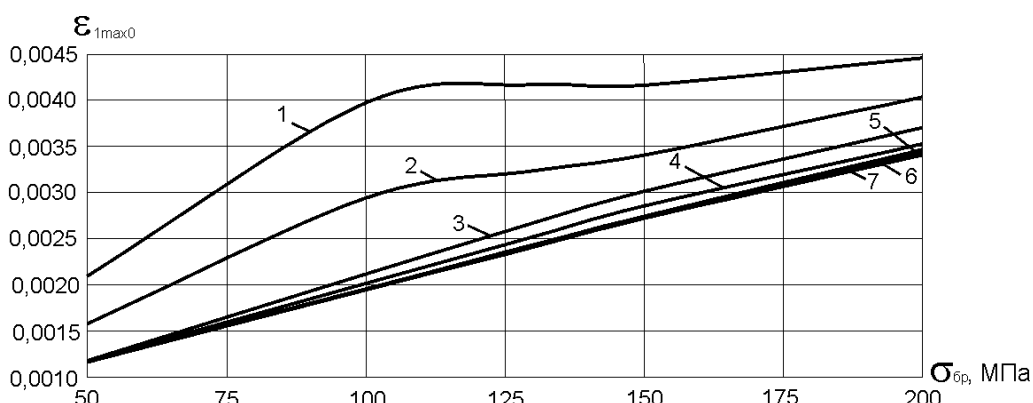


Рис. 21. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L3)

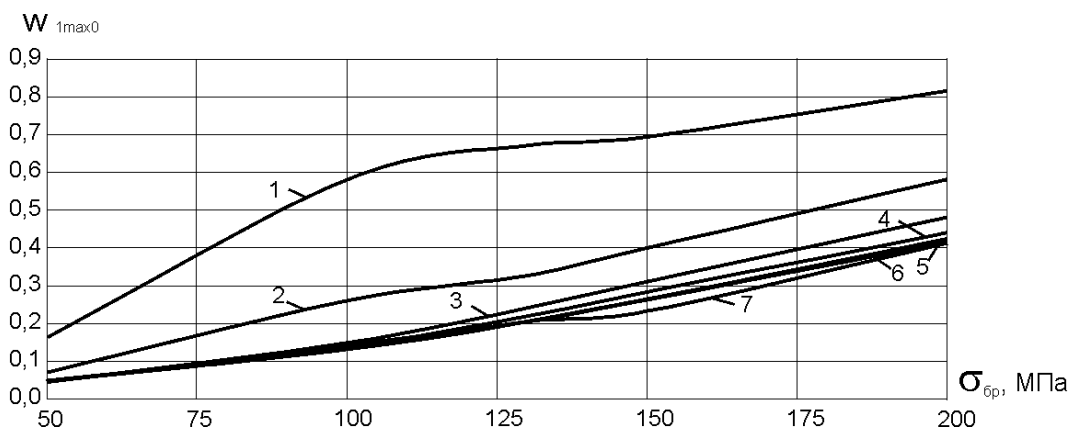


Рис. 22. Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L3)

На рис. 23 – 25 показаны результаты исследования влияния радиального натяга на изменения максимальных характеристик локального НДС в полосе с отверстием в сечении его оси отверстия и их изменении по толщине полосы. При этом приняты следующие обозначения: 1 – путь L1, 2 – путь L2, 3 – путь L3.

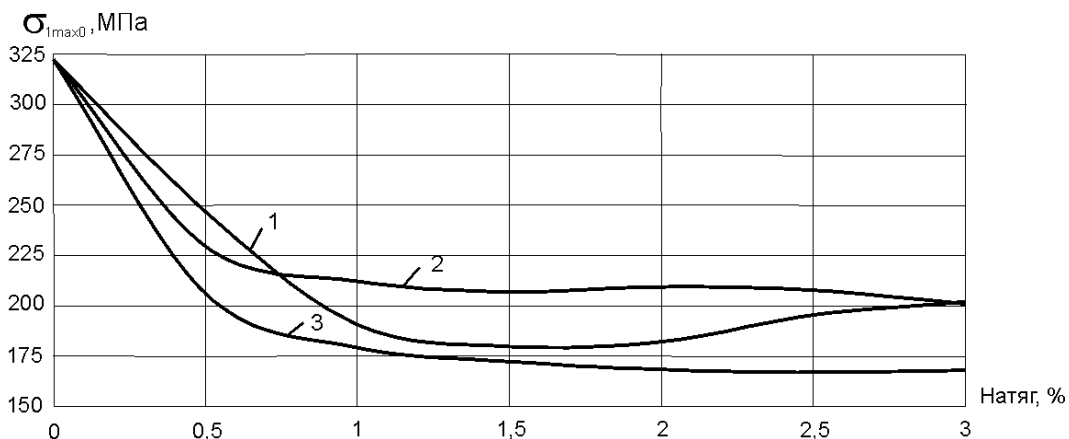


Рис. 23. Влияние радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

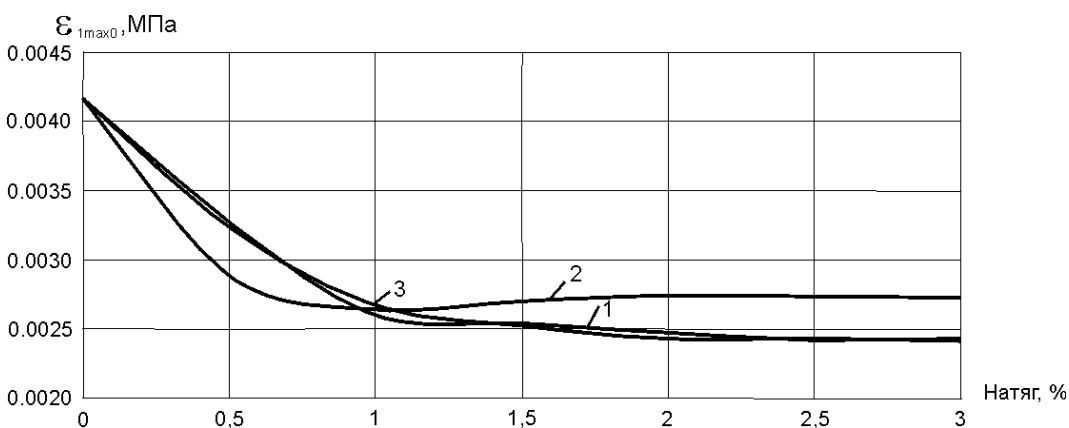


Рис. 24. Влияние радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

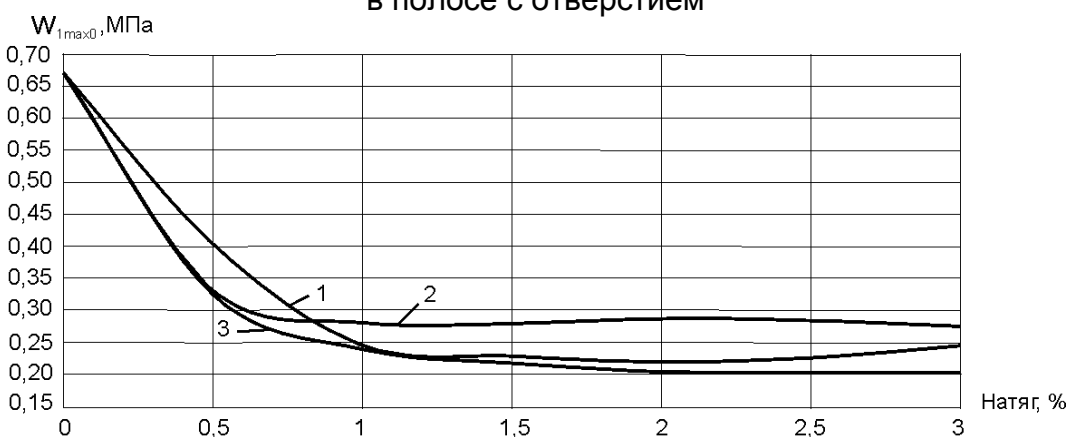


Рис. 25. Влияние радиального натяга на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием
 Анализ полученных результатов показывает, что в диапазоне радиальных натягов от 1 до 2 % технологические отклонения величины радиального натяга не

оказывают существенного влияния на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла. Применение натягов свыше 2,5% нецелесообразно, так как это связано с существенным увеличением усилия дорнования.

Выводы

1. При дорновании стенок отверстия в материале пластины в зоне отверстия возникают остаточные сжимающие напряжения, величина которых превышает предел текучести материала. Наличие остаточных сжимающих напряжений приводит к изменению цикла локальных напряжений в зоне отверстия. В зависимости от величины радиального натяга при дорновании происходит смещение зоны максимальной амплитуды главных растягивающих напряжений и деформаций от стенки отверстия. Величина данного смещения составляет от 2 до 4,5 мм.

2. При дорновании образуются наплывы материала на свободной поверхности пластины. Максимальная величина наплыва составляет 0,15 мм при натяге 3%. Характер распределения радиальных перемещений стенок отверстий по высоте является неравномерным, причем степень неравномерности увеличивается с увеличением радиального натяга. Максимальная величина неровности стенки отверстия составляет 0,04 мм при натяге 3%.

3. Показано, что для пластины с отверстием в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение дорнования стенок отверстия с радиальным натягом от 1 до 3% способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,1 – 2,2 раза по сравнению с напряжением в полосе с отверстием. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,2 – 2 раза и 1,2 – 4,5 раза соответственно.

4. Установлено, что при фиксированном значении напряжений в сечении брутто, применение радиального натяга свыше 1% не приводит к существенному изменению максимальных главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла.

Список литературы

1. Семенцов, В.Ф. Анализ конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности силовых элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий [Текст] / В.Ф. Семенцов // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 82 – 93.
2. Технология выполнения высокоресурсных соединений [Текст] / В. Ф. Пширков, Я. Н. Робаковский, А. С. Тарасов и др. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с.
3. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
4. Экспериментальные исследования влияния конструктивных и технологических факторов на выносливость типовых элементов авиационных конструкций / Б. И. Олькин, Н. И. Гильванова, Т. С. Родченко и др. // Труды ЦАГИ. – 1980. – 86 с.
5. ANSYS Element Guide. Chapter 3. Element References. Section 3.1. Element Library.001087. 4th Edition. SAS IP[©].
6. ANSYS Contact Technology Guide. Chapter 3. Surface-to-Surface Contact. 001087. 4th Edition. SAS IP[©].

7. Эксплуатация, обслуживание, ремонт, надежность [Текст] / Авиационный технический справочник; под общ. Ред. В.Г. Александрова. – М.: Транспорт, 1969. – 412 с.

8. ANSYS Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear Structural Analysis. Section 8.4.1.1.1 Plastic Material Models. 001087. 4th Edition. SAS IP[©].

Поступила в редакцию 18.02.2015

Вплив величини радіального натягу при дорнуванні і рівня навантаження при розтягуванні на характеристики локального напружено-деформованого стану смуги з отвором

Показано, що для пластини з отвором у діапазоні значень напружень у перерізі бруто від 100 до 200 МПа застосування дорнування стінок отвору з радіальним натягом від 1 до 3% сприяє зменшенню максимальних головних розтягувальних напружень еквівалентного віднульового циклу в 1,1 – 2,2 раза порівняно з напругою в смугі з отвором. При цьому величини максимальних головних розтягувальних деформацій і максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднульового циклу зменшуються в 1,2 – 2 раза і 1,2 – 4,5 раза відповідно.

Ключові слова: дорнування, метод скінченних елементів, локальний напружено-деформований стан, радіальний натяг, головні розтягувальні напруження еквівалентного віднульового циклу, питома енергія деформування.

Effect of Radial Interference in the Process of Mandrelling and Level of Loading on Characteristics of Local Mode of Deformatoin of Plate with Hole

It is shown that for a plate with a hole within the range of stresses in the gross section of 100 to 200 MPa application of mandrelling of hole walls with radial interference between 1 and 3% reduces the maximum principal tensile stresses of equivalent zero-to-tension stress cycle by 1.1 ... 2.2 times compared with stress in a plate with a hole. Herewith the values of maximum principal strain and maximum specific energy of deformation of equivalent zero-to-tension stress cycle decrease by 1.2 to 2 and 1.2 to 4.5 times respectively.

Keywords: mandrelling, finite element method, local mode of deformatoin, radial interference, principal stretching stresses of equivalent zero-to-tension stress cycle, specific energy of deformation.