

Расчет полей перемещений трехслойных полых конструкций для неразрушающего контроля качества методом цифровой голографической интерферометрии

Ахунова А.Х.^{1,†}, Дмитриев С.В.¹, Сафиуллин Р.В.¹, Сафиуллин А.Р.¹, Сафин Ф.Ф.²

[†]akhunova.a.a@gmail.com

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 Уфа

²Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. Фрунзе 32, 450074 Уфа

Calculation of displacement field in three-layered hollow structures for non-destructive testing by digital holographic interferometry

A.Kh. Akhunova¹, S.V. Dmitriev¹, R.V. Safullin¹, A.R. Safullin¹, F.F. Safin²

¹Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

²Ufa State Aviation Technical University, Marks St. 32, 450074 Ufa

Рассматривается метод цифровой голографической интерферометрии с целью неразрушающего контроля качества трехслойных полых конструкций, полученных по технологии сварки давлением, совмещенной со сверхпластической формовкой. Методом конечных элементов рассчитаны поля перемещений поверхности конструкций при различных способах закрепления и нагружения в упругой области. Показано, что нагружение закрепленной по контуру конструкции внутренним давлением позволяет выявлять ряд типичных дефектов, таких как непровар или разрыв ребра жесткости.

Ключевые слова: цифровая голографическая интерферометрия, дефект, трехслойная полая конструкция, компьютерное моделирование.

Digital Holographic Interferometry is considered for non-destructive testing of three-layered hollow structures produced by the pressure welding combined with the superplastic forming. Displacement fields in the structure were calculated with the use of the finite element method for different schemes of fixing and loading within the elastic range. It is demonstrated that internal pressure loading of the structure fixed along the whole contour is a suitable scheme for detection of such defects as splits or fracture of stiffening ribs.

Keywords: digital holographic interferometry, defect, three-layered hollow structure, simulation.

1. Введение

Надёжность работы узлов и деталей современных летательных аппаратов (ЛА) определяется условиями контроля их качества на стадии изготовления и в процессе их эксплуатации. В большинстве случаев используют так называемые неразрушающие способы контроля, позволяющие определить наличие или отсутствие в конструкции тех или иных дефектов, влияющих на их прочность и надежность. Одним из методов неразрушающего контроля является метод цифровой голографической интерферометрии (ЦГИ), согласно которому с помощью лазерного излучения на цифровую видеокамеру регистрируются два (или более) голографических

изображения исследуемого объекта, соответствующих различным фазам процесса деформирования поверхности под действием внешней нагрузки. Путем цифровой обработки поле разности фаз может быть преобразовано в поле перемещений поверхности объекта, которые произошли в промежутке между первой и второй экспозициями. Основными преимуществами метода является бесконтактность, высокая чувствительность к перемещениям (доли микрона), возможность проведения измерений одновременно по всей поверхности изделия, возможность проведения измерений независимо от формы и материала изделия [1].

Основной задачей неразрушающего контроля с использованием метода ЦГИ является поиск скрытых

дефектов, которые могут быть связаны с изменением сплошности материала или геометрии поверхности. Необходимую информацию о наличии либо отсутствии скрытого дефекта можно получить по форме полей перемещений поверхности объекта [2,3]. Для этого, прежде всего, необходимо выбрать оптимальный способ нагружения и закрепления, позволяющий наиболее эффективно определять типичные для рассматриваемого объекта дефекты. При исследовании различных видов нагружения целесообразно использовать компьютерное моделирование, которое позволяет рассчитать и сопоставить поля перемещений эталонного и дефектного объекта.

Особый интерес для авиации и космонавтики представляют трехслойные полые конструкции, позволяющие снизить вес ЛА [4-7]. Такие конструкции состоят из обшивок и образующего ребра жесткости гофрированного заполнителя, изготавливаемые, как правило, из листовых двухфазных титановых сплавов с использованием сверхпластической формовки (СПФ) [8-10] после сварки давлением (СД) листов по части поверхности [11-13]. Наличие дефектов в таких конструкциях может привести к разрушению всей детали или узла ЛА. Поэтому, актуальным является развитие методов неразрушающего контроля готовых полых конструкций. Ряд дефектов, например, разрыв ребра жесткости могут быть обнаружены и другими методами неразрушающего контроля, например, компьютерной томографией. Однако такой опасный дефект как непровар в месте соединения внутреннего листа к одной из обшивок не выявляется с помощью компьютерной томографии, но может быть обнаружен при помощи ЦГИ.

В работе средствами компьютерного моделирования с использованием программного продукта DEFORM-3D исследовалась трехслойная полая конструкция из титанового сплава ВТ6, представленная на рис. 1. Конструкция нагружалась в упругой области четырьмя способами: кручение, изгиб и внутреннее давление с защемлением одного торца конструкции, а также внутреннее давление с закреплением конструкции по всему контуру. Исследовалась эталонная конструкция (без дефектов) и конструкции с непроваром в зоне сварки нижней обшивки и заполнителя и с разрывом ребра жесткости. Полученные результаты позволили выбрать схему нагружения и закрепления конструкции для обнаружения указанных дефектов и оценить минимальный размер дефекта, выявляемого с помощью ЦГИ.

2. Математическое моделирование

Рассматриваемая трехслойная конструкция имели вид пакета, состоящего из трех листов: два наружных листа являлись обшивками, а внутренний лист – заполнителем, формирующим ребра жесткости (рис. 1).

Конструкция нагружалась и закреплялась следующим образом:

- внутреннее давление газа 1 МПа с защемлением замкового торца конструкции;
- внутреннее давление газа 1 МПа с закреплением конструкции по всему контуру;

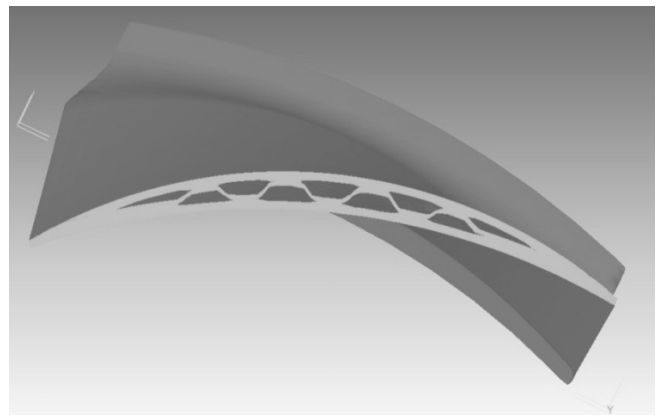


Рис. 1. МКЭ - модель трехслойной конструкции в разрезе.

- изгиб с защемлением замкового торца конструкции и с приложением двух изгибающих сил в 1Н каждая на другом торце;

- кручение с защемлением замкового торца конструкции и с приложением двух закручивающих разнонаправленных сил в 1Н на другом торце.

Анализировались поля перемещений вдоль координаты Y (см. рис. 2).

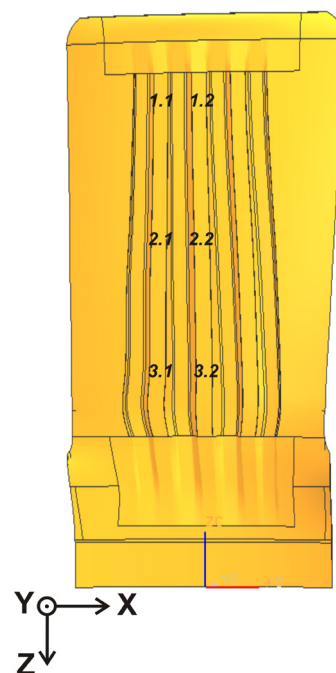


Рис. 2. Области расположения дефектов на листе заполнителя. Нижняя часть конструкции является замковой частью.

Рассматривались эталонная конструкция и конструкции с дефектами. Дефекты имели различные площадь/протяженность и расположение на листе заполнителя. Области расположения дефектов показаны на рис. 2. Здесь i, j обозначают: i – расположение дефекта по высоте, а j – по ширине конструкции.

Геометрические характеристики дефектов были следующими:

- дефект «непровар» площадью 2×5 , 3×8 , 4×11 и 5×13 мм²;
- дефект «разрыв ребра» протяженностью 1,5; 3; 6 и 12 мм;

Надежность выявления дефектов с использованием четырех видов нагружения определялась путем сравнения картин перемещения поверхности эталонной конструкции с картинками перемещений, полученными при нагружении конструкций, в которые были внесены дефекты. Если разница полей перемещений значительна, то можно говорить о хорошей выявляемости данного дефекта.

3. Результаты исследования

Результаты моделирования показали, что из рассмотренных четырех видов нагружения наиболее информативным является нагружение внутренним давлением, причем закрепление должно проводиться по всему контуру конструкции. При нагружении изгибом, кручением и внутренним давлением с закреплением одного торца конструкции рассматриваемые дефекты заметно себя не проявляют. Это объясняется тем, что кривизна конструкции вносит значительную асимметрию в поля перемещений, что затрудняет установление отличия в картинах перемещений эталонной и дефектной конструкции. По этой причине в данной работе представлены поля перемещений поверхности только для случая нагружения внутренним давлением конструкций закрепленных по всему контуру.

Выявлено, что нагружение внутренним давлением конструкций с дефектом изменяет максимальное значение перемещений и вносит заметную асимметрию в поле перемещений вдоль координаты Y по сравнению с эталонной конструкцией. При этом, наибольшие изменения полей перемещений вызывает дефект «непровар». На рис. 3 приводятся характерные поля Y -перемещений поверхности нижней обшивки, полученные при нагружении эталонной (а) и дефектных конструкций для дефектов «непровар» (б) и «разрыв ребра» (в) соответственно.

На рис. 4 а,б приведены результаты моделирования конструкций с дефектом «непровар» в виде зависимости ΔY от площади дефекта, где $\Delta Y = Y - Y_0$, причем, Y_0 и Y – это перемещения поверхности нижней обшивки в центре дефекта для эталонной и дефектной конструкций, соответственно. На рис. 5 а,б представлены результаты моделирования конструкции с дефектом «разрыв ребра» в виде зависимости ΔY от протяженности дефекта.

Для всех зависимостей на рис. 4-5 наблюдается монотонный рост разницы перемещений ΔY с увеличением размера дефекта. При этом для дефекта «непровар» величина ΔY больше, чем для дефекта «разрыв ребра», особенно на краю конструкции в положении 2.1.

Представляется важным установить минимальный размер дефектов рассматриваемого типа, выявляемых методом ЦГИ. Данная оценка зависит от чувствительности установки ЦГИ и от максимального внутреннего давления, при котором материал конструкции не выходит за пределы упругости. Кроме того, необходимо учитывать максимальное перемещение которое может быть зафиксировано методом ЦГИ. Разрешающая способность установки ЦГИ составляет порядка 0,01 мкм, а максимальное измеряемое перемещение имеет порядок 0,1 мм. Установим предел надежного измерения перемещений методом ЦГИ равным 1 мкм. Исследуемая трехслойная конструкция выходит в область пластической деформации при значении внутреннего давления 10 МПа. Поскольку в упругой области ΔY пропорционально величине приложенной нагрузки, значения перемещений, полученные для давления 1 МПа, увеличим в 10 раз. Как видно из рис. 4, для дефекта «непровар» площадью 65 мм² при внутреннем давлении 10 МПа величина ΔY составляет около 40 мкм для дефектов 1.2, 2.2, 3.2 и около 60 мкм для дефектов 1.1, 2.1, 3.1. Следовательно, минимальный размер дефекта, выявляемого методом ЦГИ, составит около 1,5 мм² для дефектов 1.2, 2.2, 3.2

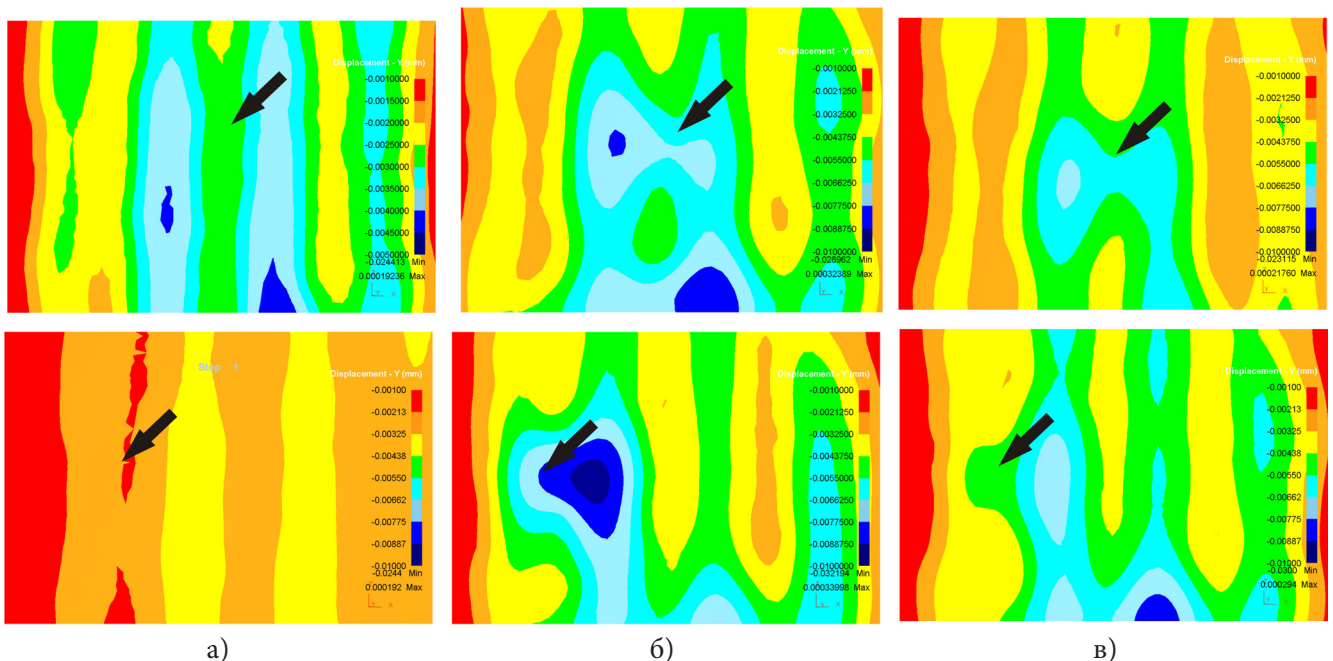


Рис. 3. Сравнение полей Y -компоненты перемещения нижних обшивок эталонной конструкции (а), конструкций с дефектом «непровар» (б) и с дефектом «разрыв ребра» (в): дефект в областях 2.1 (верхний ряд) и 2.2 (нижний ряд). Расположение дефекта отмечено стрелкой.

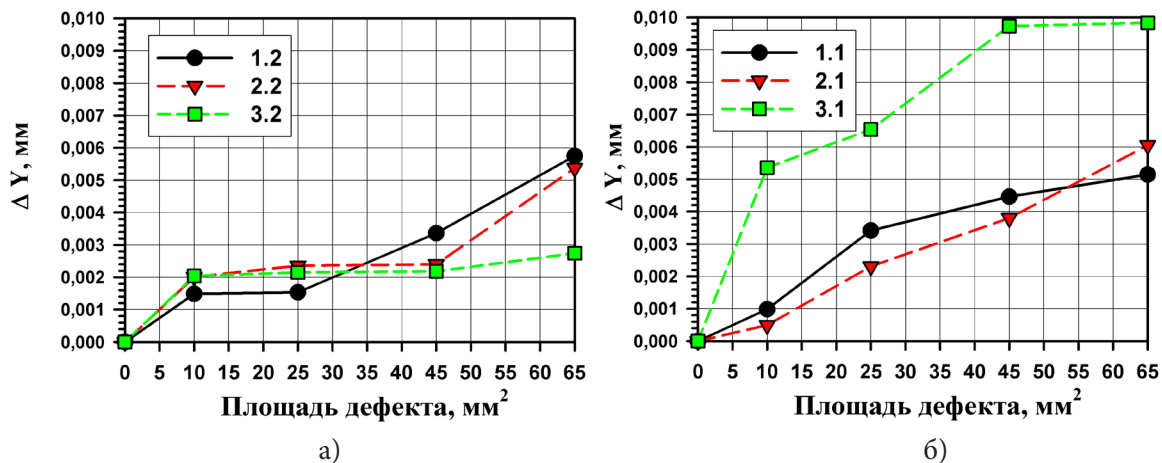


Рис. 4. Зависимости ΔY от площади дефектов «непровар», имеющих положение а – 1.2, 2.2, 3.2 и б – 1.1, 2.1, 3.1 (см. рис. 2).

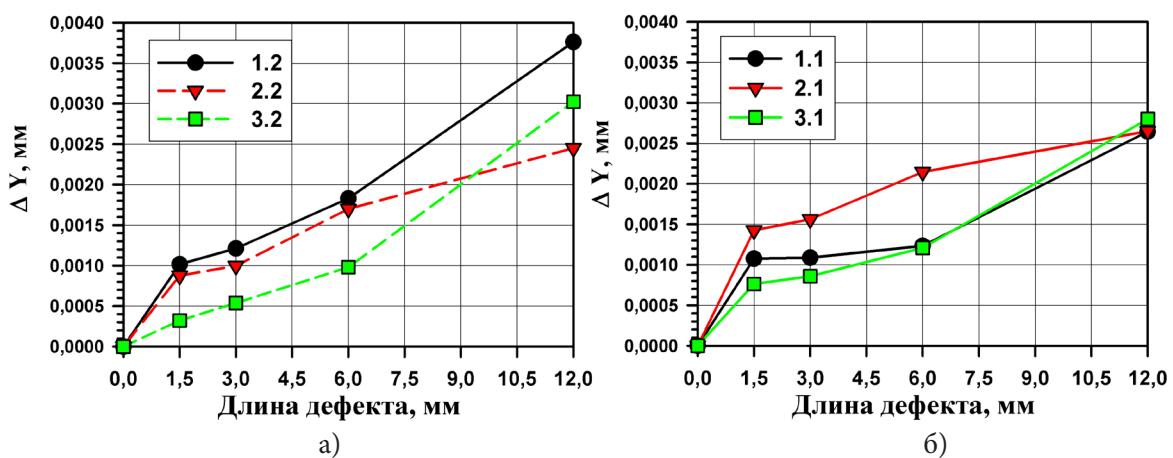


Рис. 5. Зависимости ΔY от длины дефектов «разрыв», имеющих положение а – 1.2, 2.2, 3.2 и б – 1.1, 2.1, 3.1 (см. рис. 2).

и 1 мм² для дефектов 1.1, 2.1, 3.1. Аналогичные расчеты показывают, что для дефекта «разрыв ребра» минимальный выявляемый размер составляет около 0,5 мм для всех изученных расположений дефектов.

4. Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Проведен расчет полей компонент Y -перемещений поверхности трехслойной полый конструкции. Исследованы дефекты «непровар» и «разрыв ребра жесткости», расположенные в различных частях конструкции. Рассмотрены четыре вида нагружения: кручение, изгиб и внутреннее давление с защемлением замкового торца конструкции, а также внутреннее давление с закреплением по всему контуру конструкции. Сравнивались поля перемещений эталонной и дефектных конструкций.

2. Установлено, что для получения информации о наличии дефектов в элементах конструкций методом ЦГИ целесообразно использовать нагружение внутренним давлением с закреплением по всему контуру конструкции, поскольку при нагружении изгибом и кручением закрепленной на торце конструкции рассматриваемые дефекты заметно себя не проявляют.

3. Показано, что ЦГИ позволяет определять такие трудновывявляемые дефекты, как непровары, что является основным преимуществом по сравнению с другими методами неразрушающего контроля.

4. Получены оценки минимального размера дефектов рассматриваемого типа, выявляемых методом ЦГИ. В случае дефекта «непровар» она составляет около 1,5 мм² для дефектов 1.2, 2.2, 3.2 и 1 мм² для дефектов 1.1, 2.1, 3.1. В случае дефекта «разрыв ребра» минимальный выявляемый размер составляет около 0,5 мм для всех изученных расположений дефектов. Однако данный вывод можно распространить только на конкретную конструкцию и применяемую методику проведения эксперимента.

Литература

1. V.S. Gurevich, A.M. Isaev, M.E. Gusev, I.V. Alekseenko. Proceedings of the conference "Holography: Fundamental Studies, Innovative Projects, and Nanotechnologies", Irkutsk (2008). pp. 136 - 147 (in Russian) [Гуревич В.С., Исаев А.М., Гусев М.Е., Алексеенко И.В. Материалы конференции «Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии», Иркутск, Россия (2008) с. 136].
2. R.N. Sergeev. Journal of Samara Science Center of RAS,

- 13(4), 628 (2011), (in Russian) [Сергеев Р.Н. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том.13, №4(2) 628 (2011)].
3. S.L. Aleskovsky. Proceedings of the conference "Holography: Fundamental Studies, Innovative Projects, and Nanotechnologies", Irkutsk, (2008) p. 127 (in Russian) [Алесковский С.Л. Материалы конференции «Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии», Иркутск, Россия (2008) с. 127].
4. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin. Journal of Advanced Materials **12**, 42 (2011), (in Russian) [Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. Перспективные материалы **12**, 42 (2011)].
5. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin. Deformation and Fracture of Materials **9**, 38 (2010), (in Russian) [Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. Деформация и разрушение материалов **9**, 38 (2010)].
6. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin. Die Forging. Metal Forming **6**, 15 (2009), (in Russian) [Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением **6**, 15 (2009)].
7. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev. Deformation and Fracture of Materials **11**, 40 (2009), (in Russian) [Ахунова А.Х., Дмитриев С.В. Деформация и разрушение материалов **11**, 40 (2009)].
8. A.A. Kruglov, F.U. Enikeev, R.Ya. Lutfullin. Mater. Sci. Eng. A **323**(1-2), 416 (2002).
9. R.A. Vasin, F.U. Enikeev, R.V. Safiullin, M. Tokuda. Int. J. NonLinear Mech. **38**(5), 799 (2003).
10. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials **1**(1), 59 (2011). (in Russian) [Лутфуллин Р.Я. Письма о материалах **1**(1), 59 (2011)].
11. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials **1**(2), 88 (2011). (in Russian) [Лутфуллин Р.Я. Письма о материалах **1**(2), 88 (2011)].
12. R.V. Safiullin. Letters on Materials **2**(1), 32 (2012). (in Russian) [Сафиуллин Р.В. Письма о материалах **2**(1), 32 (2012)].
13. R.V. Safiullin. Letters on Materials **2**(1), 36 (2012). (in Russian) [Сафиуллин Р.В. Письма о материалах **2**(1), 36 (2012)].