

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 691.7

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-132-139



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГИБА СТАЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА С ВОЛНООБРАЗНОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА

Пивоварова К.Г.¹, Матвеев С.В.², Песина С.А.¹,
Могильных А.Е.¹, Пустовойтова О.В.¹, Федосеев С.А.³

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В настоящее время усиливается тенденция замены традиционных конструкционных материалов на композиционные. Высокие удельные механические свойства композитов позволяют проектировать легкие и надежные конструкции. Перспективным научным направлением является разработка композиционных материалов, повышающих механические характеристики за счет совершенствования внешней структуры и технологии изготовления. Технология изготовления композитов Al-Steel с волнообразными контактными поверхностями между алюминием и сталью позволяет обеспечить повышенную прочность соединения слоев. Для проектирования конструкций из композиционных материалов широкое распространение получили интегрированные пакеты конечно-элементных расчетов, позволяющие моделировать влияние различных нагрузок, геометрических размеров и материалов элементов в каждом слое на жесткость композитов. **Цель работы.** Целью работы является исследование влияния волнового профиля на деформирование слоистого композиционного образца. **Используемые методы.** С использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus получены кривые прогиба, а также распределения деформации и напряжений вдоль оси Z деформированной сетки по длине образца композита при различных схемах деформирования. **Новизна.** Впервые проведено моделирование процесса изгиба слоистого композита АМг3-08сп с плоской и волнообразной границами раздела. **Результат.** Установлено, что создание волнообразной границы раздела сталеалюминиевого композита позволяет обеспечить повышение жесткости изделия. На основании расчетных данных о распределении деформации и напряжений Мизеса в различных слоях композита показано, что причиной снижения величины деформации в композите с волнообразной границей раздела является перераспределение напряжений. **Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют проектировать композиционные материалы с повышенной жесткостью.

Ключевые слова: слоистые композиты, изгиб, деформация, моделирование, метод конечных элементов, жесткость, прочность, сталь, алюминий, напряжения Мизеса, волновой профиль

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/>, и финансовой поддержки Челябинской области.

© Пивоварова К.Г., Матвеев С.В., Песина С.А., Могильных А.Е., Пустовойтова О.В., Федосеев С.А., 2023

Для цитирования

Моделирование процесса изгиба сталеалюминиевого композита с волнообразной границей раздела / Пивоварова К.Г., Матвеев С.В., Песина С.А., Могильных А.Е., Пустовойтова О.В., Федосеев С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 132-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-132-139>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATION OF THE BENDING PROCESS OF A STEEL-ALUMINUM COMPOSITE WITH A WAVE-SHAPED INTERFACE

Pivovarova K.G.¹, Matveev S.V.², Pesina S.A.¹, Mogilnykh A.E.¹, Pustovoitova O.V.¹, Fedoseev S.A.³

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

³ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Currently, there is a growing trend to replace traditional structural materials with composite ones. High specific mechanical properties of composites contribute to designing lightweight and reliable structures. A promising scientific area is the development of composite materials that increase mechanical characteristics by improving the external structure and manufacturing technology. The manufacturing technology of Al-steel composites with wavy contact surfaces between aluminum and steel provides increased strength of the connection between the layers. To design structures from composite materials, integrated packages of finite element calculations are widely used to simulate the effect of various loads, geometric dimensions and materials of elements in each layer on stiffness of composites. **Objectives.** The research is aimed at studying the influence of the wave profile on the deformation of a layered composite sample. **Methods Applied.** Using the SIMULIA/Abaqus software suite, the authors obtained deflection curves, as well as strain and stress distributions along the Z-axis of the deformed mesh along the length of the composite sample for various deformation schemes. **Originality.** The authors carried out a novel simulation of the process of bending of layered composite AMg3-08sp with flat and wavy interfaces. **Result.** It has been established that a wavy interface of the steel-aluminum composite increased stiffness of the product. Based on the calculated data on the distribution of deformation and von Mises stresses in different layers of the composite, it has been shown that the reason for the decreased deformation in the composite with a wavy interface is the redistribution of stresses. **Practical Relevance.** The results of the study contribute to designing composite materials with increased stiffness.

Keywords: layered composites, bending, deformation, simulation, finite element method, stiffness, strength, steel, aluminum, von Mises stresses, wave profile

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No.22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-1920073/>, and the Chelyabinsk Region.

For citation

Pivovarova K.G., Matveev S.V., Pesina S.A., Mogilnykh A.E., Pustovoitova O.V., Fedoseev S.A. Simulation of the Bending Process of a Steel-Aluminum Composite with a Wave-Shaped Interface. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 132-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-132-139>

Введение

Элементы конструкций в виде пластин и оболочек широко используются в автомобилестроении, судостроении, авиационной и космической промышленности, химическом машиностроении [1]. В последние годы усиливается тенденция замены традиционных конструкционных материалов, которые ранее применялись для изготовления этих элементов, на композиционные. Этому способствуют высокие удельные механические свойства композитов, что позволяет проектировать легкие и надежные конструкции.

Перспективным научным направлением является разработка композиционных материалов, повышающих механические характеристики за счет совершенствования внешней структуры и технологии изготовления [2-5]. В работах [6-8] предложена технология холодной прокатки для изготовления слоистых композитов Al-Steel с улучшенной прочностью сцепле-

ния между слоями за счет механического заклинивания и повышенной пластической деформации на границе раздела. Повышенная прочность соединения слоистых композитов обеспечивается за счет создания волнообразных контактных поверхностей между алюминием и сталью с взаимным проникновением твердого материала в мягкий. Проанализировано влияние синусоидального профиля рабочего вала на поведение композиционных слоев. Показано, что создание волнообразной границы раздела между Al и Fe в сочетании с активизацией сдвиговых и ротационных мод пластического течения металлов, инициирующих интенсивную пластическую деформацию, может обеспечить повышенную прочность соединения сталеалюминиевых слоистых композитов при холодной пластической сварке. Однако при моделировании не было исследовано влияние волнового профиля на деформирование слоистого композиционного образца.

В последнее время широкое распространение получили интегрированные пакеты конечно-элементных расчетов, которые позволяют проводить все виды проектных расчетов, в том числе конструкций из композиционных материалов [9-12]. В этих программах заложена возможность моделирования влияния различных нагрузок, геометрических размеров и материалов элементов в каждом слое на жесткость и прочность композитов. В работе [13] приведены результаты моделирования методом конечных элементов деформирования при растяжении титано-алюминиевого композита Д20-АД1-ВТ6С с постоянной относительной толщиной мягкой прослойки АД1 и с варьированием параметров волнового профиля сварного соединения. Показано, что рост отношения амплитуды к шагу волны до 0,5 приводит к росту на 4-5% усилия, необходимого для сопоставимого растяжения, по сравнению с образцом с плоской границей, и преимущественной локализации пластической деформации вблизи свободных поверхностей.

Целью настоящей работы являлось моделирование методом конечных элементов влияния формы профиля границы раздела двухслойных композитов Al-Steel на деформирование изделия в процессе изгиба. Эксплуатация под нагрузкой деталей и узлов из сталелюминиевых материалов сопровождается возникновением упругих и пластических деформаций. Требования жесткости и прочности необходимо учитывать при расчете и проектировании конструктивных деталей и узлов [14].

Материалы и методы исследования

Для моделирования поведения двухслойного композита АМг3-08сп при изгибе использовали программный комплекс SIMULIA/Abaqus, позволяющий

получать распределение эквивалентных напряжений Мизеса и составляющих пластической деформации в зависимости от условий нагружения.

Моделирование проводилось для двух типов слоистых композитов: с плоской и волнообразной границей раздела (рис. 1). Амплитуда симметричной синусоидальной волны составляла $A = 0,125$ мм, период $T = 2$ мм. Размер стороны тетраэдральной ячейки конечно-элементной сетки выбирался равным 0,1 мм. Выбор размеров элементов определялся сходимостью результатов с погрешностью не более 3%. Прочность связей между слоями биметалла соответствовала условию «Тie», при котором прочность связи соответствует характеристикам наименее прочного элемента пары. В качестве материалов для композита были выбраны алюминиевый сплав АМг3 и сталь 08сп. Толщины верхнего (АМг3) и нижнего (08сп) слоев принимались одинаковыми и равными 0,5 мм. Размеры исследуемых образцов составляли 200×300 мм.

Рассматривали два типа образцов с волнообразной границей раздела: вырезанные вдоль и перпендикулярно направлению прокатки (рис. 2). Для расчета упрочнения материалов в результате пластического деформирования использовали для АМг3 и 08сп известные кривые упрочнения [15], согласно которым предел текучести можно определить по формулам:

$$- \text{АМг3: } \sigma_{0,2} = 74 + 63\varepsilon^{0,3}; \quad (1)$$

$$- \text{08сп: } \sigma_{0,2} = 297 + 76\varepsilon^{0,48}. \quad (2)$$

Согласно граничным условиям, узкие боковые грани образцов жестко фиксировались в пространстве (рис. 3). К центру образца прикладывалась сосредоточенная сила, равная 200 Н, направленная перпендикулярно его плоскости.

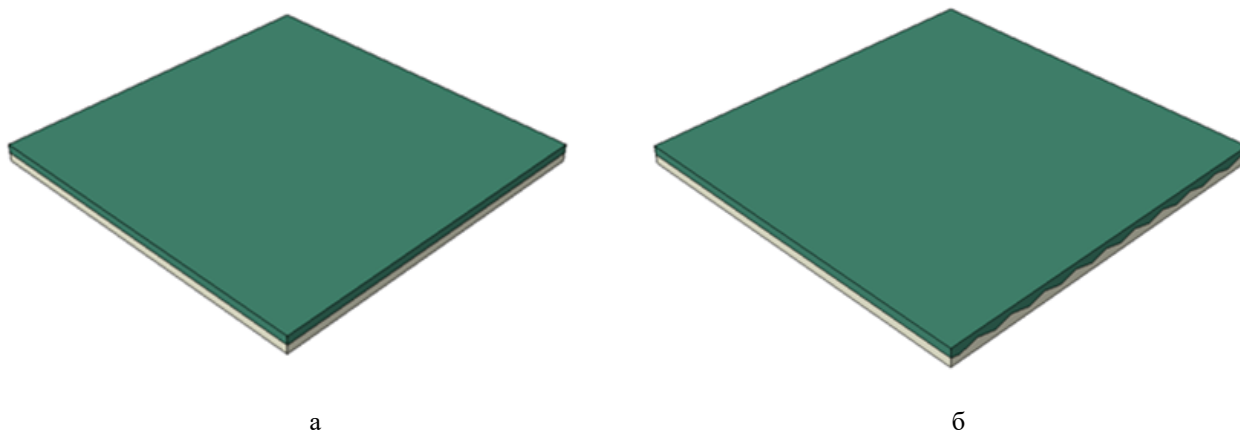


Рис. 1. Слоистые композиты с плоской (а) и волнообразной (б) границами раздела
Fig. 1. Layered composites with flat (a) and wavy (б) interfaces

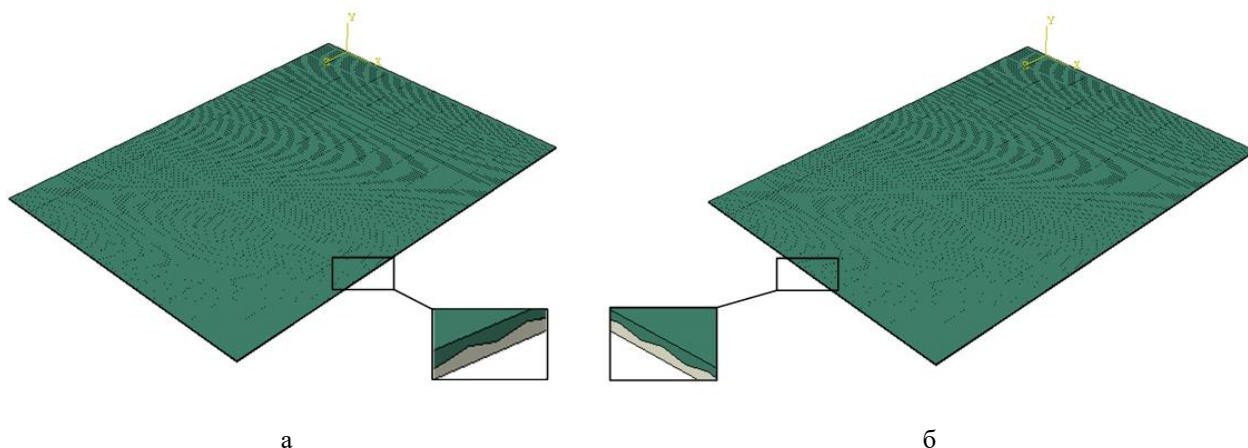


Рис. 2. Образцы слоистых композитов с волнообразной границей раздела, вырезанные вдоль (а) и перпендикулярно (б) направлению прокатки

Fig. 2. Samples of layered composites with a wavy interface, cut along (a) and perpendicular (b) to the direction of rolling

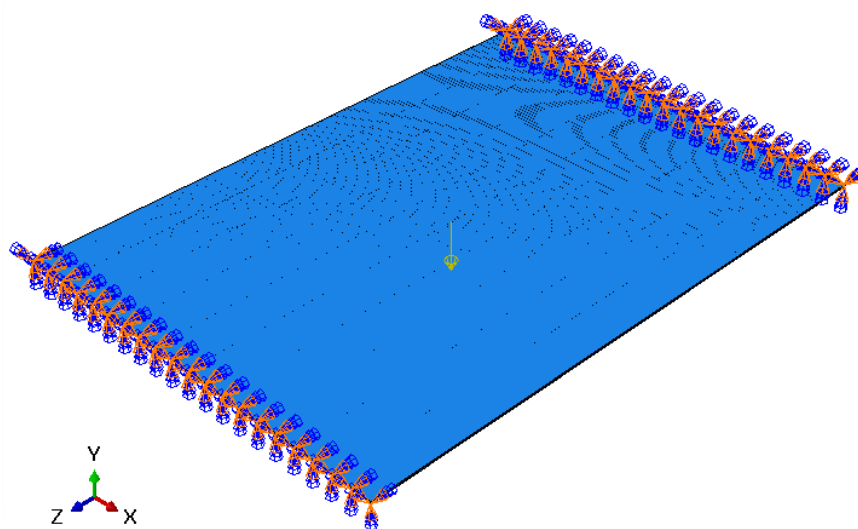


Рис. 3. Схема нагружения образца и граничные условия

Fig. 3. Sample loading scheme and boundary conditions

Полученные результаты и их обсуждение

С использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus получены кривые прогиба, а также распределения деформации и напряжений вдоль оси Z деформированной сетки по длине образца композита при трех схемах деформирования:

- 1 схема: изгиб образца композита с плоской границей раздела;
- 2 схема: изгиб образца композита с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки;
- 3 схема: изгиб образца композита с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки.

На рис. 4 приведены кривые прогиба в среднем сечении образцов. Для образца, вырезанного перпендикулярно направлению прокатки, среднее сечение соответствовало соотношению слоев биметалла 1:1. Сравнение графиков свидетельствует, что наибольшее максимальное значение прогиба имеет образец с плоской границей раздела (50 мм). Композиты с волнообразной границей раздела имеют меньшие значения прогиба: 20 мм – для образца с границей перпендикулярно линии прокатки и 13 мм – для образца с границей вдоль линии прокатки. Причиной снижения величин деформации в композите с волнообразной границей раздела может являться перераспределение напряжений в волновом профиле.

Этот вывод подтверждается сравнением полученных расчетных кривых распределения пластической деформации (рис. 5) и напряжений Мизеса (рис. 6) по длине образца при различных схемах нагружения.

Этот вывод подтверждается сравнением полученных расчетных кривых распределения пластической деформации (рис. 5) и напряжений Мизеса (рис. 6) по длине образца при различных схемах нагружения.

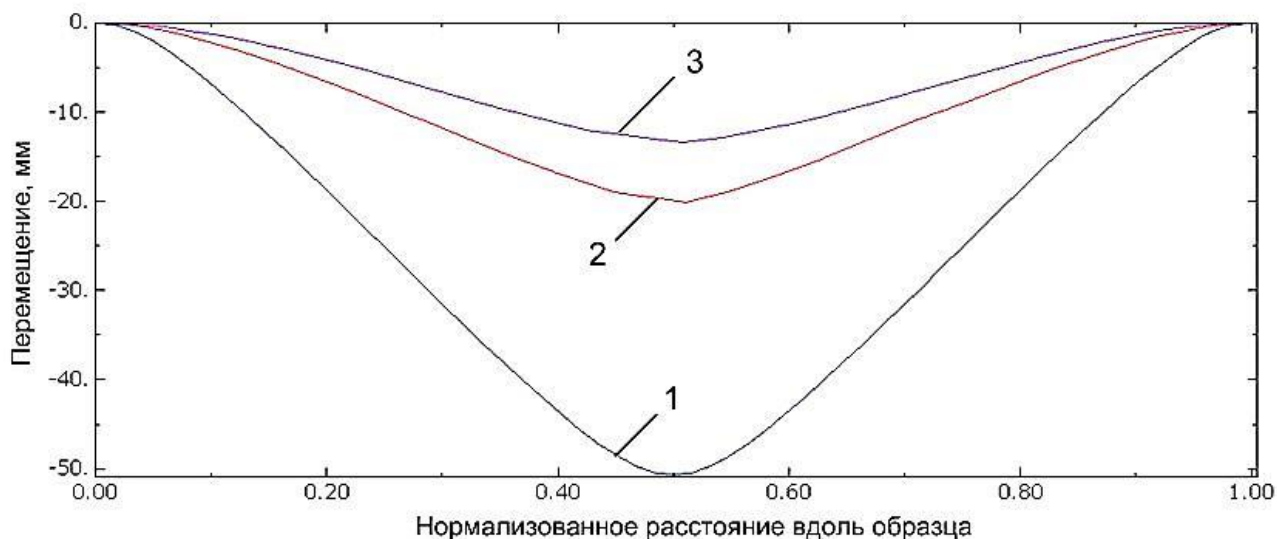


Рис. 4. Кривые прогиба по длине образцов: 1 – композит с плоской границей раздела; 2 – композит с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки; 3 – композит с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки

Fig. 4. Deflection curves along the length of the samples: 1 is a composite with a flat interface, 2 is a composite with a wavy interface perpendicular to the rolling line, 3 is a composite with a wavy interface along the rolling line

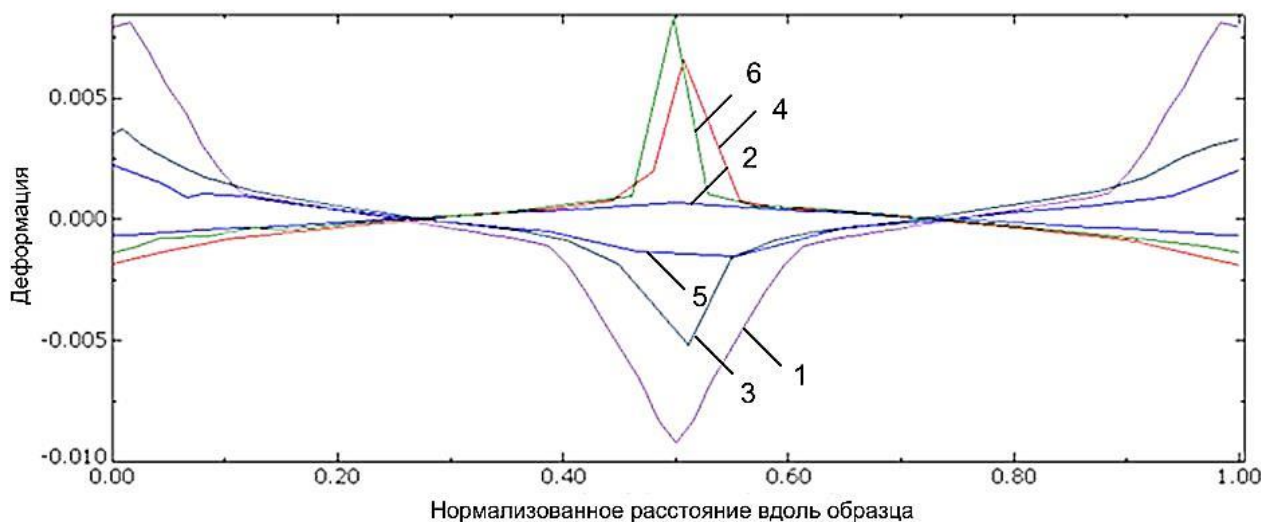


Рис. 5. Распределение деформаций по длине образца композита: 1 – с плоской границей раздела, верхний слой образца (AMg3); 2 – с плоской границей раздела, нижний слой образца (O8sp); 3 – с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки, верхний слой образца (AMg3); 4 – с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки, нижний слой образца (O8sp); 5 – с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки, верхний слой образца (AMg3); 6 – с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки, нижний слой образца (O8sp)

Fig. 5. Strain distribution along the length of the composite sample: 1 is with a flat interface, a top layer of the sample (AMg3), 2 is with a flat interface, a bottom layer of the sample (O8sp), 3 is with a wavy interface perpendicular to the rolling line, a top layer of the sample (AMg3), 4 is with a wavy interface perpendicular to the rolling line, a bottom layer of the sample (O8sp), 5 is with a wavy interface along the rolling line, a top layer of the sample (AMg3), 6 is with a wavy interface along the rolling line, a bottom layer of the sample (O8sp)

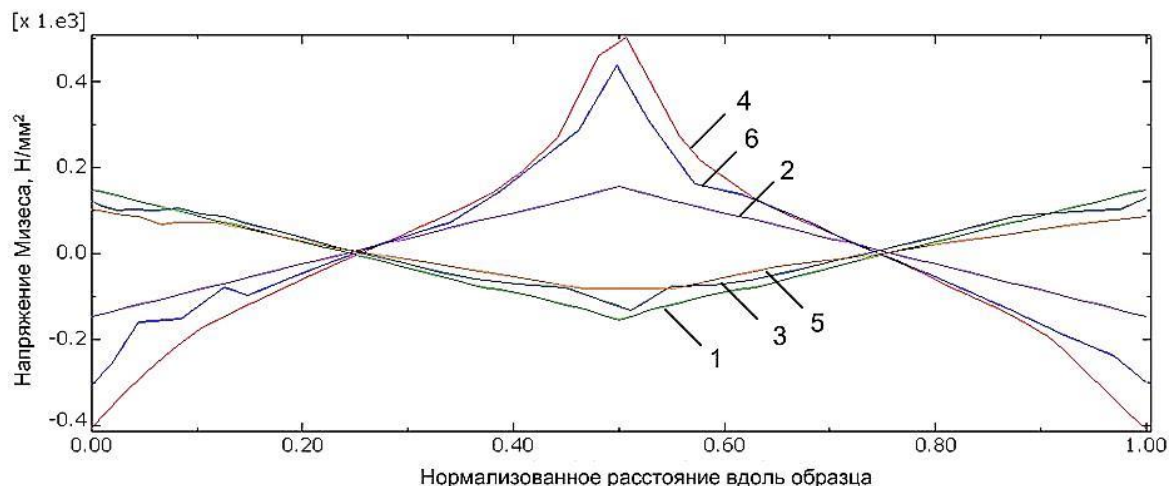


Рис. 6. Распределение напряжений Мизеса по длине образца композита: 1 – с плоской границей раздела, верхний слой образца (АМг3); 2 – с плоской границей раздела, нижний слой образца (08сп); 3 – с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки, верхний слой образца (АМг3); 4 – с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки, нижний слой образца (08сп); 5 – с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки, верхний слой образца (АМг3); 6 – с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки, нижний слой образца (08сп)

Fig. 6. Von Mises stress distribution along the length of the composite sample: 1 is with a flat interface, a top layer of the sample (AMg3), 2 is with a flat interface, a bottom layer of the sample (08sp), 3 is with a wavy interface perpendicular to the rolling line, a top layer of the sample (AMg3), 4 is with a wavy interface perpendicular to the rolling line, a bottom layer of the sample (08sp), 5 is with a wavy interface along the rolling line, a top layer of the sample (AMg3), 6 is with a wavy interface along the rolling line, a bottom layer of the sample (08sp)

Установлено, что при изгибе образца с плоской границей раздела (см. рис. 5, кривые 1, 2) пластическая деформация локализуется в верхнем слое образца (АМг3) в центральной зоне в пределах 0,4-0,6 относительного расстояния от конца образца, а также по краям образца. Ее максимальное значение составляет 0,01. В нижнем слое образца (08сп) присутствует только незначительная упругая деформация.

При изгибе образца с волнообразной границей раздела перпендикулярно линии прокатки (см. рис. 5, кривые 3, 4) максимальная деформация в стальном слое превышает деформацию в слое алюминия и достигает значения 0,006. При этом наблюдается снижение на 50% максимального значения деформации в верхнем слое образца (АМг3), которое составляет 0,005. Зоны локальной пластической деформации присутствуют на обоих графиках.

При изгибе образца с волнообразной границей раздела вдоль линии прокатки (см. рис. 5, кривые 5, 6) значения максимальной деформации в стальном слое достигают 0,008. Значение деформации в слое алюминия в центре образца составляет 0,0015, что на 85% меньше аналогичного значения для образца с плоской границей раздела. Зона локальной пластической деформации наблюдается только на графике для 08сп.

Установлено, что при изгибе образца с плоской границей раздела (см. рис. 6, кривые 1, 2) напряжения Мизеса в верхнем и нижнем слоях симметричны друг относительно друга и равны по амплитуде. Распреде-

ление напряжений имеет V-образный характер с максимальными значениями, равными 150 Н/мм².

При изгибе образцов с волнообразной границей раздела (см. рис. 6, кривые 3-6) максимальные напряжения Мизеса в центре образца в стальном слое имеют большие значения (400-500 Н/мм²) по сравнению с напряжениями в слое алюминия (80-100 Н/мм²).

Таким образом, создание волнообразной границы раздела сталеалюминиевого композита позволяет обеспечить повышение жесткости изделия, поскольку при одинаковом значении прилагаемого усилия величина деформации у образцов с волнообразной границей соединения меньше, чем у образца с плоской границей соединения.

Закключение

1. С помощью программного комплекса SIMULIA/Abaqus изучены процессы деформации изгиба сталеалюминиевого композита АМг3-08сп с волнообразной и плоской границей раздела при различных условиях нагружения.

2. Получено распределение прогиба по длине образца композита. Установлено, что создание волнообразной границы раздела сталеалюминиевого композита позволяет обеспечить снижение величины прогиба образца на 60-74%.

3. Рассчитано изменение деформации и напряжений Мизеса в различных слоях композита при варьировании условий изгиба. Показано, что причиной снижения величины деформации в композите с вол-

нообразной границей раздела является перераспределение напряжений в волновом профиле.

Список источников

1. Нестеров В.А., Суханов А.С. Моделирование композитного ферменного стержня базового модуля разгонного блока // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXI Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова*. М.: ООО «ТРП», 2015. С. 148-149.
2. Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н. Моделирование гиперупругих композитов с малыми добавками дисперсных наполнителей. Масштабные эффекты в нанокompозитах. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_es15_7.pdf
3. Задачи моделирования и оптимизации панелей переменной жесткости и конструкций из слоистых композитов / А.И. Боровков, Д.В. Мамчиц, А.С. Немов, А.Д. Новокшенов // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2018. №1. С. 113-122.
4. Development of an ABAQUS™ plug-in for predicting composite plates stiffness with in-plane periodicity / Wu D.J., Mei Z., Zhu Y., Hu H. // *SoftwareX*. 2023, vol. 21, no. 6, 101281. DOI: 10.1016/j.softx.2022.101281
5. Применение самозаклинивающихся структур: демонстрация концепции на основе КЭ-моделирования / Д.В. Константинов, С.В. Матвеев, А.М. Песин, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. №1. С. 93-99. DOI: 10.18503/19952732-2023-21-1-93-99
6. FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect / Pesin A., Pustovoitov D., Biryukova O., Ilyina N. // *Procedia Manufacturing*. 2020, vol. 50, no. 1, pp. 579-583. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.08.104
7. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: *Металлургия*. 2020. Т. 20. №3. С. 81-96.
8. Особенности процесса аккумулирующей прокатки многослойных металлических материалов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, К.Г. Пивоварова, П. Тандон, А.Е. Кожемякина // *Теория и технология металлургического производства*. 2020. №3(34). С. 31-36.
9. Assessment of layerwise user-elements in Abaqus for static and free vibration analysis of variable stiffness composite laminates / Moreira J.A., Moleiro F., Araújo A.L., Paganí A. // *Composite Structures*. 2023, vol. 303, 116291. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116291
10. Cho H., Kim D.N. Controlling the stiffness of bistable kirigami surfaces via spatially varying hinges // *Materials & Design*. 2023, vol. 231, 112053. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112053
11. Ojo S.O., Zucco G., Weaver P.M. Efficient three-dimensional geometrically nonlinear analysis of variable stiffness composite beams using strong Unified

- Formulation // *Thin-Walled Structures*. 2021, vol. 163, 107672. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107672
12. Моделирование процессов деформирования слоистых титано-алюминиевых композитов в процессе изгиба / Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, В.М. Волчков, О.С. Кисилев, В.Ф. Даненко, С.П. Писарев // *Известия ВолгГТУ*. 2012. №9. С. 11-15.
13. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Писарев С.П. Влияние параметров волнового профиля границы соединения слоев титано-алюминиевого композита на поведение при растяжении // *Известия ВолгГТУ*. 2021. №4. С. 48-54. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-48-54
14. Комаров В.А. Повышение жесткости конструкций топологическими средствами // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2003. №1. С. 24-37.
15. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: *Металлургия*, 1973. 224 с.

References

1. Nesterov V.A., Sukhanov A.S. Modeling of a composite truss core of the base module of the upper stage. *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksii i sploshnykh sred: materialy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova [Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Structures and Continuous Media: Proceedings of the 21st Gorshkov International Symposium]*. Moscow: LLC TRP, 2015, pp. 148-149. (In Russ.)
2. Volkov-Bogorodsky D.B., Vlasov A.N. Modeling of hyperelastic composites with small additives of dispersed fillers. Large-scale effects in nanocomposites. Available at: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_es15_7.pdf
3. Bоровков A.I., Mamchits D.V., Nemov A.S., Novokshenov A.D. Tasks of modeling and optimization of variable stiffness panels and structures made of layered composites. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid State Mechanics]*. 2018;(1):113-122. (In Russ.)
4. Wu D.J., Mei Z., Zhu Y., Hu H. Development of an ABAQUS™ plug-in for predicting composite plates stiffness with in-plane periodicity. *SoftwareX*. 2023;21(6):Article ID 101281. DOI:10.1016/j.softx.2022.101281
5. Konstantinov D.V., Matveev S.V., Pesin A.M., Korchunov A.G., Pivovarova K.G. Application of interlocking structures: FEM-based concept demonstration. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2023;21(1):93-99. (In Russ.) DOI:10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99
6. Pesin A., Pustovoitov D., Biryukova O., Ilyina N. FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites

- with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect. *Procedia Manufacturing*. 2020;50(1):579-583. DOI:10.1016/j.promfg.2020.08.104
- Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Asymmetric rolling of sheets and narrow strips: history and prospects of development. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2020;20(3):81-96. (In Russ.)
 - Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Pivovarova K.G., Tandon P., Kozhemyakina A.E. Features of the process of accumulative roll bonding of multilayer metal materials. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production]. 2020;(3(34)):31-36. (In Russ.)
 - Moreira J.A., Moleiro F., Araújo A.L., Pagani A. Assessment of layerwise user-elements in Abaqus for static and free vibration analysis of variable stiffness composite laminates. *Composite Structures*. 2023;303:Article ID 116291. DOI:10.1016/j.compstruct.2022.116291
 - Cho H., Kim D.N. Controlling the stiffness of bistable kirigami surfaces via spatially varying hinges. *Materials & Design*. 2023;231:Article ID 112053. DOI:10.1016/j.matdes.2023.112053
 - Ojo S.O., Zucco G., Weaver P.M. Efficient three-dimensional geometrically nonlinear analysis of variable stiffness composite beams using strong Unified Formulation. *Thin-Walled Structures*. 2021;163:Article ID 107672. DOI:10.1016/j.tws.2021.107672
 - Gurevich L.M., Trykov Yu.P., Volchkov V.M., Kiselev O.S., Danchenko V.F., Pisarev S.P. Modeling of deformation processes of layered titanium-aluminum composites during bending. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia of Volgograd State Technical University]. 2012;(9):11-15. (In Russ.)
 - Gurevich L.M., Danenko V.F., Pisarev S.P. Influence of the parameters of the wave profile of the joint boundary of titanium-aluminum composite layers on stress behavior. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia of Volgograd State Technical University]. 2021;(4):48-54. (In Russ.) DOI:10.35211/1990-5297-2021-4-251-48-54
 - Komarov V.A. Increasing stiffness of structures by topological means. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of Korolev Samara State Aerospace University (National Research University)]. 2003;(1):24-37. (In Russ.)
 - Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* [Mechanical properties of metals and alloys during metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russ.)

Поступила 29.08.2023; принята к публикации 10.10.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 29/08/2023; revised 10/10/2023; published 25/12/2023

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: k.pivovarova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9961-4074

Матвеев Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор,
Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.

Песина Светлана Андреевна – доктор филологических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Могильных Анна Евгеньевна – кандидат технических наук, инженер,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Пустовойтова Ольга Васильевна – кандидат филологических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Федосеев Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.

Kseniya G. Pivovarova – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: k.pivovarova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9961-4074

Sergei V. Matveev – DrSc (Physics and Mathematics), Professor,
Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia.

Svetlana A. Pesina – DrSc (Philology), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Anna E. Mogilnykh – PhD (Eng.), Engineer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Olga V. Pustovoitova – PhD (Philology), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sergei A. Fedoseev – DrSc (Eng.), Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.