

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.976.4

## Моделирование процесса автоматической клепки авиационных конструкций

С.Б. Марьин, А.Е. Загородний

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

## Simulation of the automatic riveting process with the aircraft structures

S.B. Maryin, A.E. Zagorodniy

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University

Рассмотрен процесс выполнения высокоресурсных заклепочных соединений для конструкций самолетов в режиме автоматической клепки. Приведены основные типовые операции и принципы обеспечения высокого качества этого процесса в соответствии с техническими требованиями к современному самолету, отмечены его достоинства и недостатки. Разработаны основные этапы технологического процесса сборки панелей фюзеляжа самолета. Выполнено компьютерное моделирование заклепочного соединения в программном комплексе MSC.Marc.

EDN: BSQMIW, <https://elibrary/bsqmiw>

**Ключевые слова:** моделирование процесса, заклепочное соединение, клепальный автомат, напряжения

The paper considers the process of forming high-resource rivet joints in the aircraft structures using the automatic riveting mode. It provides the main typical operations and principles of ensuring high quality of this process in accordance with technical requirements for a modern aircraft, and notes the advantages and disadvantages. Main stages of the technological process in assembling the aircraft fuselage panels are developed. Computer simulation of the rivet joint is performed in the MSC.Marc software.

EDN: BSQMIW, <https://elibrary/bsqmiw>

**Keywords:** process simulation, rivet joint, riveting machine, stresses

Продолжительный опыт эксплуатации авиационной техники показал, что основной причиной разрушения клепаных конструкций в деталях являются усталостные трещины, развитие которых начинается от поверхности отверстий. Повышенная нагруженность заклепочных швов и отсутствие местного упрочнения материала в пакете со стороны закладной головки при ис-

пользовании обычных заклепок способствует значительному росту концентрации напряжений в зоне зенкованного отверстия, что приводит к многочисленным разрушениям вследствие усталости планера самолета.

Заклепка с компенсатором устраняет указанный недостаток, так как расклепывание компенсатора способствует заполнению зазора

и обеспечивает некоторый натяг в заклепочном соединении (ЗС) со стороны закладной головки. Такое увеличение диаметра характеризуется радиальным натягом отверстия — степенью пластической деформации, положительно влияющей на ресурс ЗС. Радиальный натяг зависит от конструкции заклепки и технологии выполнения ЗС. Следует отметить, что остаточные деформации пакета соединяемых деталей после клепки могут влиять на качество аэродинамических обводов планера самолета.

В случае выполнения заклепочных швов стандартными заклепками усилие при клепке прессом изменяется по возрастающей, достигая наибольшего значения в зоне образования замыкающей головки заклепки. Поэтому такой вид ЗС характеризуется сравнительно малым натягом, локализованным в небольшой зоне пакета со стороны замыкающей головки заклепки.

Изучение влияния радиального натяга ЗС на выносливость показало, что его увеличение способствует интенсивному росту ресурса ЗС [1].

Для повышения усталостной прочности ЗС разработаны высокоресурсные заклепки, при клепке которых повышается радиальный натяг [2]. Применение высокоресурсного крепежа позволило улучшить не только усталостные характеристики, но и герметичность ЗС.

Цель работы — рассмотреть процесс выполнения высокоресурсных ЗС для конструкций самолетов в режиме автоматической клепки.

При выполнении высокоресурсных герметичных потайных ЗС в панелях современных самолетов применяют заклепки для автоматической клепки с компенсатором согласно ОСТ 1 34046 и ОСТ 1 34057, имеющие угол конуса 90 и 120°, а при создании непотайных ЗС — заклепки по ОСТ 1 34044 и ОСТ 1 34045. Заклепки диаметром 3,5...5,0 мм изготавливают из сплава алюминия В65.

Использование высокоресурсного крепежа потребовало изменения технологии выполнения ЗС, разработки нового и совершенствования ранее применявшегося технологического оборудования [3–6].

Рассмотрим процесс сборки клепаных панелей отсеков фюзеляжа гражданского самолета семейства SJ-NEW. В панелях ЗС выполняют на сверлильно-клепальных автоматах Integrated Panel Assembly Cell (IPAC) производства фирмы Brotje Automation [7].

Для образования продольно-поперечных ЗС в элементах авиаконструкций применяют основные элементы клепального автомата — многофункциональную верхнюю головку и нижний инструмент.

Верхняя головка клепального автомата, являющаяся сложным многофункциональным механизмом, предназначена для выполнения таких операций, как:

- сверление отверстий и образование гнезд под головку заклепки посредством зенкования;
- подача герметика, если необходимо по технологическому процессу;
- подача и установка заклепки в подготовленное отверстие в пакете конструкции;
- осажение стержня заклепки и формообразование замыкающей и закладной головок;
- фрезерование головок заклепок (при необходимости).

Перечисленные операции выполняет соответствующий инструмент верхней многофункциональной головки клепального автомата. Замена инструмента происходит в автоматическом режиме в зависимости от заданных параметров заклепочного шва и типа заклепок [8, 9].

Нижний инструмент клепального автомата установлен на специальной платформе, устройства и механизмы которой обеспечивают его движение в разных плоскостях и вращение, создают необходимое усилие для осажения стержня заклепки в процессе создания ЗС.

В зависимости от параметров планера самолета и возможности подхода нижнего инструмента для выполнения ЗС, применяют прямые и изогнутые (С-образные) клепальные инструменты [6].

Технологический процесс образования ЗС на клепальном автомате включает в себя операции, осуществляемые в автоматическом цикле, и операции, выполняемые оператором в ручном режиме [10, 11].

Последовательность операций образования ЗС на клепальном автомате показана на рис. 1. Для проверки качества настройки режимов клепального автомата используют образцы-свидетели [10, 12].

Технологический процесс выполнения продольно-поперечных швов исключает следующие операции:

- промежуточную разборку и снятие заусенцев между элементами пакета после выполнения операции по образованию отверстий вследствие жесткой фиксации зоны установки

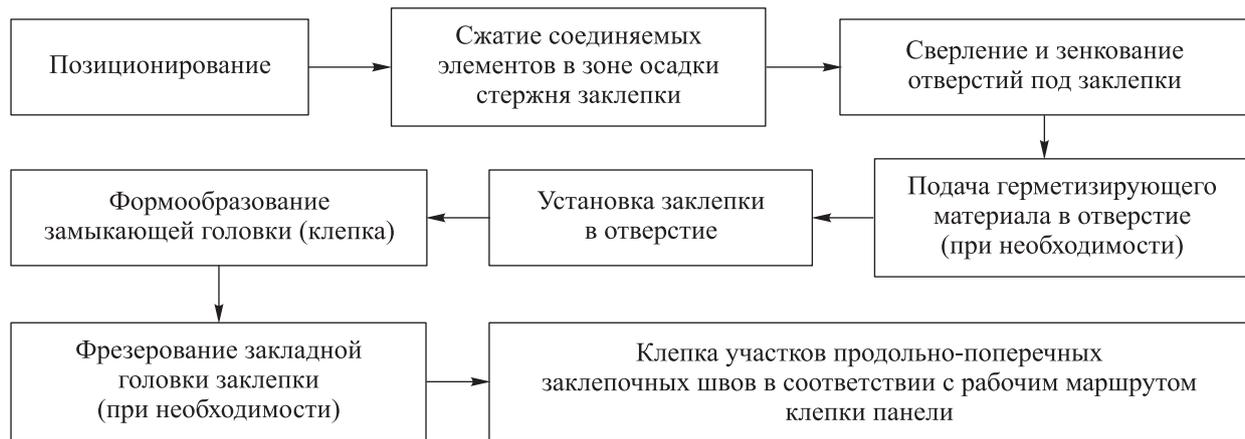


Рис. 1. Структурная схема технологического процесса образования ЗС для автоматической клепки

заклепки и постоянного сжатия пакета в течение всего автоматического цикла;

- снятие заусенцев на кромке отверстия на выходе сверла;
- контроль качества выполнения основных операций в процессе автоматического цикла изготовления ЗС.

Чтобы оценить влияние на качество ЗС технологии выполнения заклепочных швов на клепальном автомате, осуществляли моделирование ЗС в программном комплексе MSC.Marc [13, 14]. Конечно-элементная модель ЗС состояла из двух пластин, имитирующих полку элемента каркаса и обшивку, и заклепки (рис. 2). Толщина полки элемента каркаса составляла 1,5 мм, обшивки — 2 мм. Заклепка длиной 9,75 мм и диаметром 5 мм имела закладную головку с компенсатором (выступом). Диаметр отверстий в пластинах — 5,1 мм. Пластина, имитирующая обшивку, имела гнездо под закладную головку. Между пластинами и инструментом моделировали контакт без трения.

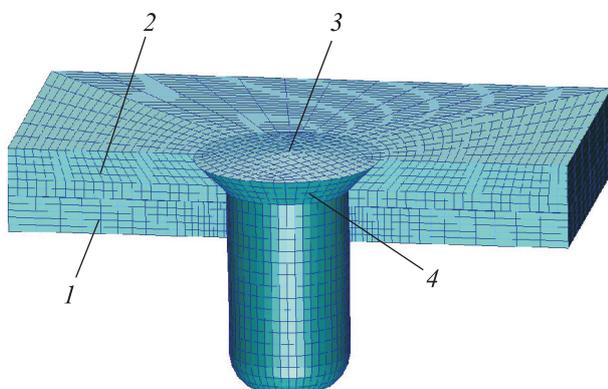


Рис. 2. Конечно-элементная модель ЗС:

- 1 — полка элемента каркаса; 2 — обшивка;  
3 — компенсатор; 4 — закладная головка заклепки

Для клепки принято усилие, равное 34 670 Н. Усилие сжатия пакета (толщиной 3,5 мм) составляло 3500 Н.

В зависимости от параметра нагрузки  $t$  процесс клепки пакета разбивали на следующие этапы:

- $0 \leq t \leq 0,1$  — сжатие пакета прижимными поверхностями;
- $0,1 \leq t \leq 0,2$  — обжим клепки;
- $0,2 \leq t \leq 0,9$  — воздействие инструмента на клепку с усилием, изменяющимся от 0 до 34 670 Н;
- $0,9 \leq t \leq 1,0$  — разгрузка — воздействие инструмента на клепку с усилием, изменяющимся от 34 670 Н до 0.

Для заклепки выбран материал В65, для обшивки — 1163Т, для полки элемента каркаса — В95очТЗ.

Согласно требованиям, предъявленным к заклепке диаметром 5 мм, диаметр замыкающей головки должен быть равным  $8 \pm 0,5$  мм, а ее минимальная высота — 2 мм [15].

По моделированию в программном комплексе MSC.Marc получены следующие данные: максимальный диаметр замыкающей головки заклепки — 8,5 мм, ее высота — 2 мм, что соответствовало заданным требованиям.

Компьютерное моделирование ЗС в среде MSC.Marc также включало в себя конечно-элементный анализ напряженного-деформированного состояния (НДС) в зоне заклепки и соединяемых деталей при заданных усилиях клепки и сжатия пакета с учетом геометрических параметров заклепки, соединяемых элементов конструкции и механических характеристиках материалов. Распределение напряжений в обшивке, силовом наборе и заклепке

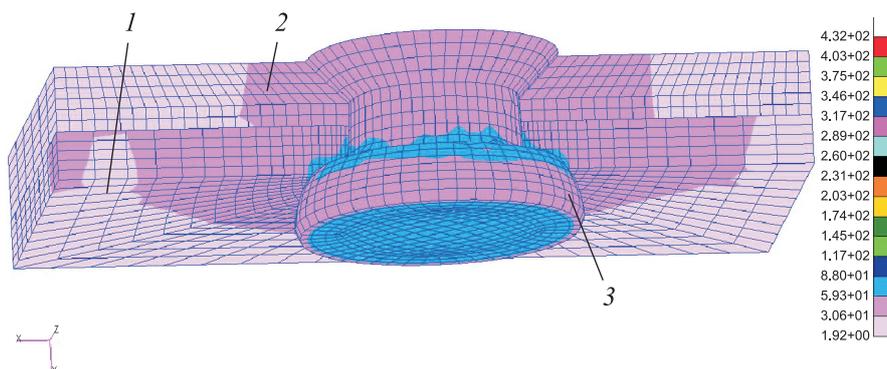


Рис. 3. Распределение напряжений, МПа, в ЗС после клепки при параметре нагрузки  $t = 9$  МПа: 1 — полка элемента каркаса; 2 — обшивка; 3 — замыкающая головка заклепки

после клепки при параметре нагрузки  $t = 9$  МПа показано на рис. 3.

Следует отметить существенную неравномерность распределения напряжений в заклепке и пакете, максимальные сжимающие напряжения находятся в области замыкающей головки.

Радиальный натяг определяли по формуле

$$\Delta_n = \frac{d - d_0}{d_0} \cdot 100 \%,$$

где  $d$  — диаметр заклепки после расклепывания, мм;  $d_0$  — диаметр отверстия в элементе конструкции до клепки, мм.

Распределение перемещений вдоль оси  $X$  в пластинах после клепки показано на рис. 4.

Анализ результатов моделирования и расчета НДС показал, что в месте контакта полки элемента каркаса с обшивкой радиальный натяг равен 4,9 %, а в зоне перехода на замыкающую головку — 7,9 %. В обшивке среднее значение натяга составило 4,02 %.

Таким образом, моделирование технологического процесса выполнения ЗС элементов

авиационных конструкций для автоматической клепки позволяет оценить параметры клепки (диаметр и высоту заклепки, НДС, радиальный натяг, утяжку и т. д.) до постановки этапа производства, а также выбрать рациональные условия процесса для получения требуемых параметров.

Среднее значение радиального натяга после клепки панели, полученное на образцах-свидетелях, составило 4 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к высокоресурсным ЗС.

При сборке конструкций с большим количеством заклепок могут возникнуть значительные остаточные деформации и напряжения. Чтобы минимизировать отклонения от заданных геометрических параметров конструкции, можно задать необходимые упреждения для отдельных элементов конструкции или выбрать оптимальный маршрут клепки. Эти задачи решаемы в указанном программном комплексе путем внедрения новых методов анализа с помощью построения дополнительных программ.

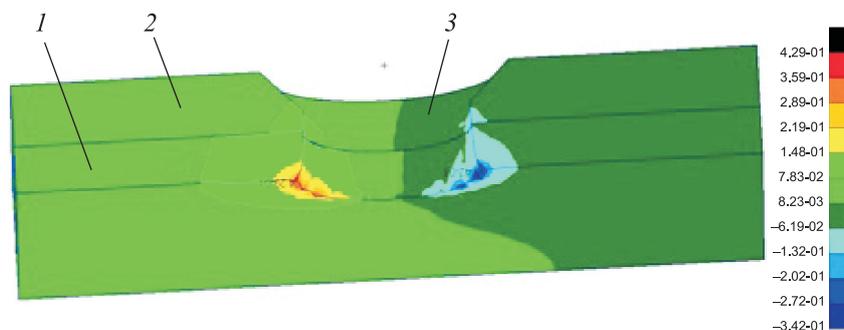


Рис. 4. Распределение перемещений вдоль оси  $X$ , мм, в пластинах после клепки: 1 — полка элемента каркаса; 2 — обшивка; 3 — гнездо под закладную головку заклепки

## Выводы

1. Рассмотрен процесс выполнения высоко-ресурсных ЗС для конструкций самолетов в режиме автоматической клепки.

2. Приведены основные типовые операции и принципы обеспечения высокого качества этого процесса в соответствии с техническими требованиями к современному самолету. Отмечены его достоинства и недостатки.

3. Разработаны основные этапы технологического процесса сборки панелей фюзеляжа самолета.

4. Выполнено компьютерное моделирование ЗС в программном комплексе MSC.Marc.

5. Программный комплекс MSC.Marc позволяет задать необходимые упреждения для отдельных элементов конструкции или выбрать оптимальный маршрут клепки для минимизации остаточных деформаций и напряжений

## Литература

- [1] Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., ред. *Современные технологии авиастроения*. Москва, Машиностроение, 1999. 832 с.
- [2] Братухин А.Г., ред. *Приоритеты авиационных технологий*. Москва, Изд-во МАИ, 2004. 1335 с.
- [3] Марьин Б.Н., ред. *Технологическое обеспечение аэродинамических обводов современного самолета*. Москва, Машиностроение, 2001. 427 с.
- [4] Ярковец А.И., Сироткин О.С., Фирсов В.А. и др. *Технология выполнения высоко-ресурсных заклепочных и болтовых соединений в конструкциях самолетов*. Москва, Машиностроение, 1987. 191 с.
- [5] Гусева Р.И., Марьин С.Б. *Проектирование и монтаж сборочных приспособлений*. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 2022. 99 с.
- [6] Cheng L., Wang Q., Li J. et al. Variation modeling for fuselage structures in large aircraft digital assembly. *Assem. Autom.*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 172–182, doi: <https://doi.org/10.1108/AA-07-2014-069>
- [7] Людоговский П.Л., Назарычев А.П. *Механизация и автоматизация внестопельной сборки авиационных конструкций*. Казань, Казанск. гос. техн. ун-т, 2008. 179 с.
- [8] Ковалев А.А., Рогов Н.В. Оценка рассеяния значений показателя качества в зависимости от параметров технологического процесса. *Вестник МАИ*, 2021, т. 28, № 1, с. 175–186, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-1-175-186>
- [9] Mei Z., Maropoulos P.G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing. *Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.*, 2014, vol. 228, no. 10, pp. 1185–1197, doi: <https://doi.org/10.1177/0954405413517387>
- [10] Феоктистов С.И., Марьин С.Б., Макарова Е.А. *Современные методы и средства автоматизации контроля оснастки и изделий в самолетостроении*. Комсомольск-на-Амуре, Изд-во Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та, 2003. 79 с.
- [11] Кривцов В.С., Павленко В.Н., Воронько В.В. и др. Комплексный подход к роботизации сборочных процессов в самолетостроении на основе нечеткой логики. *Вестник МАИ*, 2013, т. 20, № 3, с. 32–39.
- [12] Зайцев Г.Н. *Управление качеством в процессе производства*. Москва, Риор, Инфра-М, 2021. 164 с.
- [13] Drouot A., Zhao R., Irving L. et al. Measurement assisted assembly for high accuracy aerospace manufacturing. *IFAC PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 393–398, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.326>
- [14] Qu L., Dong Z., Zhou H. Study on the measurement aided assembly technology of aircraft flexible assembly tool. *2014 IEEE Int. Conf. on Control Science and Systems Engineering*, 2015, pp. 66–69, doi: <https://doi.org/10.1109/CCSSE.2014.7224510>
- [15] Гусева Р.И. К вопросу расчета точности сборки узлов и агрегатов планера самолета. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2011, т. 5, № 1, с. 16–22.

## References

- [1] Bratukhin A.G., Ivanov Yu.L., eds. *Sovremennyye tekhnologii aviastroeniya* [Modern technologies of aircraft manufacturing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 832 p. (In Russ.).
- [2] Bratukhin A.G., ed. *Priority aviatsionnykh tekhnologiy* [Priority of aviation technologies]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2004. 1335 p. (In Russ.).
- [3] Marin B.N., ed. *Tekhnologicheskoe obespechenie aerodinamicheskikh obvodov sovremennogo samoleta* [Technological support of aerodynamic contours of modern aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 427 p. (In Russ.).
- [4] Yarkovets A.I., Sirotkin O.S., Firsov V.A. et al. *Tekhnologiya vypolneniya vysokoresursnykh zaklepochnykh i boltovykh soedineniy v konstruksiyakh samoletov* [Technology of performance of high-resource riveted and bolted joints in aircraft structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 191 p. (In Russ.).
- [5] Guseva R.I., Marin S.B. *Proektirovanie i montazh sborochnykh prispobleniy* [Designing and assembly of assembly fixtures]. Komsomolsk-na-Amure, KnAGU Publ., 2022. 99 p. (In Russ.).
- [6] Cheng L., Wang Q., Li J. et al. Variation modeling for fuselage structures in large aircraft digital assembly. *Assem. Autom.*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 172–182, doi: <https://doi.org/10.1108/AA-07-2014-069>
- [7] Lyudogovskiy P.L., Nazarychev A.P. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya vnestapelnoy sborki aviatsionnykh konstruksiy* [Mechanisation and automation of off-stage assembly of aircraft structures]. Kazan, Kazansk. gos. tekhn. un-t Publ., 2008. 179 p. (In Russ.).
- [8] Kovalev A.A., Rogov N.V. Evaluation of quality indicator dispersion depending on technological process parameters. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2021, vol. 28, no. 1, pp. 175–186, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-1-175-186> (in Russ.).
- [9] Mei Z., Maropoulos P.G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing. *Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.*, 2014, vol. 228, no. 10, pp. 1185–1197, doi: <https://doi.org/10.1177/0954405413517387>
- [10] Feoktistov S.I., Marin S.B., Makarova E.A. *Sovremennyye metody i sredstva avtomatizatsii kontrolya osnastki i izdeliy v samoletostroenii* [Modern methods and means of automation of tooling and product control in aircraft construction]. Komsomolsk-na-Amure, Izd-vo Komsomolskogo-na-Amure gos. tekhn. un-ta Publ., 2003. 79 p. (In Russ.).
- [11] Krivtsov V.S., Pavlenko V.N., Voronko V.V. et al. Complex approach to robotic automation of assembly processes in aircraft manufacturing based on fuzzy logic. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2013, vol. 20, no. 3, pp. 32–39. (In Russ.).
- [12] Zaytsev G.N. *Upravlenie kachestvom v protsesse proizvodstva* [Quality management in the production process]. Moscow, Rior Publ., Infra-M Publ., 2021. 164 p. (In Russ.).
- [13] Drouot A., Zhao R., Irving L. et al. Measurement assisted assembly for high accuracy aerospace manufacturing. *IFAC PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 393–398, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.326>
- [14] Qu L., Dong Z., Zhou H. Study on the measurement aided assembly technology of aircraft flexible assembly tool. *2014 IEEE Int. Conf. on Control Science and Systems Engineering*, 2015, pp. 66–69, doi: <https://doi.org/10.1109/CCSSE.2014.7224510>
- [15] Guseva R.I. On the issue of the calculation of assembling accuracy for units and components of the frame of an aircraft. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Komsomolsk-On-Amour State Technical University], 2011, vol. 5, no. 1, pp. 16–22. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.08.2024

## Информация об авторах

**МАРЬИН Сергей Борисович** — доктор технических наук, заведующий кафедрой «Авиационное». ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: maryinsb@mail.ru).

**ЗАГОРОДНИЙ Алексей Евгеньевич** — аспирант кафедры «Авиационное». ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: aleksey\_yz@mail.ru).

## Information about the authors

**MARYIN Sergey Borisovich** — Doctor of Science (Eng.), Head of the Department of Aircraft Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 27, e-mail: maryinsb@mail.ru).

**ZAGORODNIY Aleksey Evgenievich** — Postgraduate, Department of Aircraft Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 27, e-mail: aleksey\_yz@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марьин С.Б., Загородний А.Е. Моделирование процесса автоматической клепки авиационных конструкций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 5, с. 114–120.

### Please cite this article in English as:

Maryin S.B., Zagorodniy A.E. Simulation of the automatic riveting process with the aircraft structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 5, pp. 114–120.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Расчет и проектирование сетчатых композитных конструкций»

**Авторы: А.В. Азаров, А.Ф. Разин**

Рассмотрены вопросы, связанные с расчетом и проектированием сетчатых композитных конструкций, применяемых в ракетно-космической технике в качестве отсеков ракет-носителей, адаптеров полезной нагрузки, корпусов космических аппаратов и элементов развертываемых космических антенн.

Для студентов магистратуры, обучающихся по специальностям «Ракетные комплексы и космонавтика» (24.04.01) и «Материаловедение и технологии материалов» (22.04.01) на факультете «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Пособие может быть полезно аспирантам, научным работниками инженерам в области разработки и изготовления композитных конструкций.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>