

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 22-30.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 22-30.

Научная статья
УДК 621.7/620.3
doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

Использование новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей методом волновых технологий

Евгений Степанович Киселёв¹, д.т.н.

Кирилл Сергеевич Жирухин², аспирант

^{1,2} Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

² ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ», Ульяновск, Россия

¹ kec.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

² Kirill.Zhirukhin@haltec.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4759-0710>

Аннотация. Предложено использование волновых технологий при изготовлении нежестких плоскостных деталей с введением в зону формообразования колебаний ультразвукового диапазона в совокупности с технологической оснасткой – системой нулевого базирования. Традиционная технология, используемая на отечественных предприятиях, сопряжена с большой вероятностью возникновения короблений и деформаций ввиду влияния технологических остаточных напряжений (ТОН) в процессе съема припусков и силовых напряжений в процессе пластической деформации детали при закреплении заготовки. Используя современные универсальные программные комплексы типа SimulaAbaqus, ANSYS и т. п., удалось определить величину деформаций, поводок, вызываемых остаточными напряжениями. Полученные данные были использованы для расчета рациональных схем закрепления некоторых типовых нежестких плоскостных алюминиевых заготовок на технологической оснастке – системе нулевого базирования немецкого производства SCHUNKVERO-SAaviation (VSA). Исследования проводились с целью определения технологичности применения данной оснастки на той или иной типовой нежесткой заготовке из алюминиевых сплавов и определения наиболее оптимальной схемы ее закрепления. Предполагаемые величины ТОН определялись механическим и рентгеновским методами. Расчёты выполнялись на примерах реальных деталей авиационной техники типа «балка» и заготовок из алюминиевого проката. Предложенная методика определения максимальной величины деформации заготовки при механической обработке применима к наиболее оптимальному размещению опорных и зажимных модулей системы нулевого базирования (VSA). В совокупности с определенной стратегией волновой механической обработки она позволяет практически полностью компенсировать деформации и получить годное изделие с первого предъявления без выполнения дополнительной операции правки.

Ключевые слова: система нулевого базирования, остаточные напряжения, базирование, метод конечных элементов, плоскостная заготовка, волновая технология

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №Н190120-VSA, экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования учебно-технологического центра компании ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ».

Для цитирования: Киселёв Е.С., Жирухин К.С. Использование новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей методом волновых технологий // Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 22–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

The use of new types of technological equipment in non-rigid plane aluminum parts production using wave techniques

Evgeny S. Kiselyov¹, D.Eng.

Kirill S. Zhirukhin², PhD student

^{1, 2} Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

² HALTEK-DoALL LLC, Ulyanovsk, Russia

¹ kec.ulstu@mail.ru

² Kirill.Zhirukhin@halteck.ru

Abstract. It has been suggested that wave technologies in non-rigid plane parts production should be used with the introduction of ultrasonic range vibrations into the shaping zone in combination with technological equipment, i.e. it is a zero-based system. The traditional technique used in domestic enterprises implies a high probability of out-of-flat conditions and deformations due to the influence of technological residual stresses (TRS) in the process of stock removal or force stresses under plastic deformation of the part when fixing blanks. Using modern universal software systems such as Simulia Abaqus, ANSYS, etc., it was possible to determine the magnitude of deformations, alignment errors caused by residual stresses. The data obtained were used to calculate rational ways for fixing some typical non-rigid plane aluminum blanks on a technological equipment - a zero-based system of German production SCHUNKVERO-Aviation (VSA). The research was aimed at determining the manufacturability for the use of such equipment when making a particular non-rigid blank made of aluminum alloys and finding the most optimal way of its fixing. The estimated values of the TRS were determined by mechanical and X-ray methods. The calculations were performed using real parts of aircraft equipment of the "beam" type and blanks made of aluminum rolled products. The proposed method for determining the maximum amount of deformation of the workpiece under machining is applicable to the most optimal placement of the support and clamping modules of the zero-based system (VSA). In combination with a certain strategy of wave mechanical processing, it makes a practically complete compensation for deformations possible and allows obtaining a suitable product from the first presentation without performing an additional correction operation.

Keywords: zero-based system, residual stresses, basing, finite element method, plane blank, wave technique

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under project No. H190120-VSA, experimental studies were carried out using the equipment of the educational and technological center of the company HALTEK-DoALL LLC.

For citation: Kiselyov E.S., Zhirukhin K.S. The use of new types of technological equipment in non-rigid plane aluminum parts production using wave techniques / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 22–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

Изготовление нежестких плоскостных деталей сопряжено с большой вероятностью короблений и деформаций, из-за возникновения в процессе съёма припусков технологических остаточных напряжений (ТОН) и силовых напряжений в процессе пластической деформации детали при закреплении заготовки. Особенно сложно обеспечить требуемую точность взаимного расположения обрабатываемых поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, что объясняется их низкой температурой плавления и недостаточной прочностью. Волновая технология изготовления деталей или

технология механической обработки с наложением колебаний (например – ультразвуковых (УЗК)) на элементы технологической системы и смазочно-охлаждающую жидкость, как известно, способствует снижению сил резания, увеличению производительности механической обработки и уменьшению вероятности возникновения нежелательных ТОН и других дефектов поверхностного слоя (ПС) в материале заготовки. В связи с этим волновые технологии ультразвукового диапазона находят широкое применение в современной обрабатывающей промышленности при изготовлении

нежестких деталей, особенно после того как компания DMG MORI начала использовать их в линейке станков ULTRASONIC [1].

Необходимо отметить, что ещё в пятидесятые годы прошлого столетия немецкий физик Л. Бергман в своей работе [2] установил, что при облучении твердых металлов отмечается заметное воздействие ультразвуковых волн на процессы перемагничивания металлов (расшатывание молекулярных магнитов), азотирования сталей, фазовых превращений металла при определённых температурах и условиях, очистки поверхности металла путём удаления оксидной плёнки и др. Отмечается, что путём расшатывания кристаллической структуры металлов ультразвуком, можно уменьшить остаточные напряжения в ПС заготовки. В работах [3, 4] рассмотрен комплекс вопросов, связанных с использованием ультразвуковых колебаний малой мощности как для интенсификации процессов абразивной и лезвийной обработки заготовок, так и релаксации ТОН. Получены новые результаты исследований и промышленной апробации использования энергии маломощного, в том числе модулированного, ультразвукового поля для повышения производительности механической обработки и качества деталей без применения специального или модернизированного металлорежущего оборудования. Установлено, что введение в зону формообразования новых поверхностей энергии маломощного модулированного (по амплитуде частоте, фазе и форме сигнала) ультразвукового поля позволяет существенно снизить теплосиловую напряженность процесса резания (не менее чем на 30 %). В связи с этим, уменьшается вероятность возникновения ТОН, а следовательно – короблений и деформаций.

В продолжение данных изысканий в работе [5] оценивалась эффективность ультразвуковой релаксации технологических остаточных напряжений, возникающих при лезвийной обработке нежестких заготовок. Доказано, что использование метода ультразвуковой релаксации является полноценной заменой

традиционных способов релаксации, таких как, естественное (временное) и искусственное старение (отжиг). Использование энергии ультразвукового поля позволяет многократно (до 100 и более раз) сократить время производственного цикла изготовления детали [6]. По сравнению с термическим снятием остаточных напряжений технология ультразвуковой релаксации отличается меньшей энергоёмкостью. Для ее реализации не требуется наличие печей или камер, что особенно важно при изготовлении крупногабаритных деталей. Кроме того, нередко, на поверхности деталей, прошедших термическую обработку, возникает оксидная плёнка, которая при дальнейшей эксплуатации детали может негативно повлиять на технические и эстетические характеристики изделия. Таким образом, экспериментально подтверждено положительное влияние колебаний ультразвуковой частоты на существенное снижение технологических остаточных напряжений, являющихся одним из основных факторов надежности изделий как в авиастроительной отрасли, так и во многих других отраслях промышленности.

Материалы и методы исследования

Определённо, введение энергии ультразвукового поля в зону резания при наложении ультразвуковых колебаний на процесс релаксации технологических остаточных напряжений готовой детали или заготовки вне станка, а также в зону сварных соединений помогает снимать технологические остаточные напряжения. Однако величины компенсации отклонений размеров при данном способе не велики: от 0,1 до 1 мм. На практике величины поводок и деформаций деталей из алюминиевых и труднообрабатываемых сплавов составляют от одного до нескольких десятков мм. Только применение комбинации различных способов релаксации технологических остаточных напряжений позволят добиться практического применения в современном производстве бездефектного изготовления ответственных деталей.

Другим способом компенсации технологических остаточных напряжений является применение подвижной станочной зажимной оснастки или системы прямого закрепления заготовки с компенсирующими поводки точками крепления [2]. Опыт предыдущих десятилетий показывает широкое использование только традиционных систем крепления заготовок на столе станка – прихваты, ложементы, тиски. Однако применение оснастки подобного типа сопряжено с применением подкладок и подложек, устанавливаемых под заготовку в зазоры между поверхностью последней и приспособлением, образующиеся в результате искривления и деформации готовой детали. Следствием использования данного метода является не только недостаточная компенсация для релаксации технологических остаточных напряжений, но и формирование новых силовых напряжений в процессе пластической деформации детали при закреплении заготовки из-за низкой точности используемых «компенсирующих» поводки подкладок и подложек. Данный подход является трудозатратным из-за потерь подготовительно-заключительного времени (ПЗВ) и общих затрат времени на изготовление детали при использовании традиционных механических и термических методов компенсации технологических остаточных напряжений. До недавнего времени альтернатив данному подходу не фиксировалось.

В 2019 г. немецкой компанией-производителем станочной зажимной оснастки различного типа SCHUNK SE & Co. KG была разработана модернизированная из классической системы нулевого базирования – инновационная система нулевого базирования компенсационного типа – SCHUNK VERO-S Aviation, оснастка прямого закрепления заготовок с возможностью компенсировать поводки детали на величину ± 6 мм [1, 5]. Оснастка основана на принципе прямого закрепления заготовки с применением системы нулевого базирования (обеспечивается постоянство баз при снятии и установки заготовки с погрешностью $< 0,005$ мм). Точки

крепления заготовки детали к оснастке имеют способность «дышать», двигаться, когда это необходимо. Тем самым происходит подстраивание оснастки под деформируемые поверхности заготовки детали при снятии напряжений. И, если в данном случае будет использована грамотная стратегия волновой обработки заготовки, с рационально распределёнными по переходам припусками, это позволит выполнять технологические процессы изготовления при существующих поводках в пределах допусков детали, всегда оставаться в массиве металла. Иными словами, основная цель использования данной системы нулевого базирования – разбить припуск таким образом, чтобы величина поводок не превышала допуски готовой детали, а оснастка смогла подстроиться под изменение формы очень быстро и с сохранением баз.

Основными особенностями использования оснастки SCHUNK VERO-S Aviation и технологии являются следующие аспекты:

- до 95 % объема металла удаляется путем резания с минимально возможным количеством установок;

- компенсация температурного удлинения заготовок и ТОН осуществляется без использования подкладок и прихватов;

- в техпроцессе изготовления наблюдается повторяемость позиционирования между черновой и чистовой (предварительной и окончательной) обработкой и контрольными переходами;

- при реализации нового техпроцесса обеспечивается существенное сокращение затрат времени на установку и снятие заготовок.

Технология изготовления нежестких деталей с использованием системы нулевого базирования предполагает непосредственное закрепление заготовки на модулях системы. Для этого в заготовку вворачиваются специальные пальцы, которые и обеспечивают её соединение с приспособлением. Способы крепления пальцев могут быть различными [5] (рис. 1).



Рис. 1. Способы крепления базирующих пальцев системы

Fig. 1. Bonding techniques for basing fingers of the system

Закрепление заготовки детали с использованием данной оснастки осуществляется по принципу базирования по плоскости

(установочная база), цилиндрическому и срезанному пальцу (рис. 2).

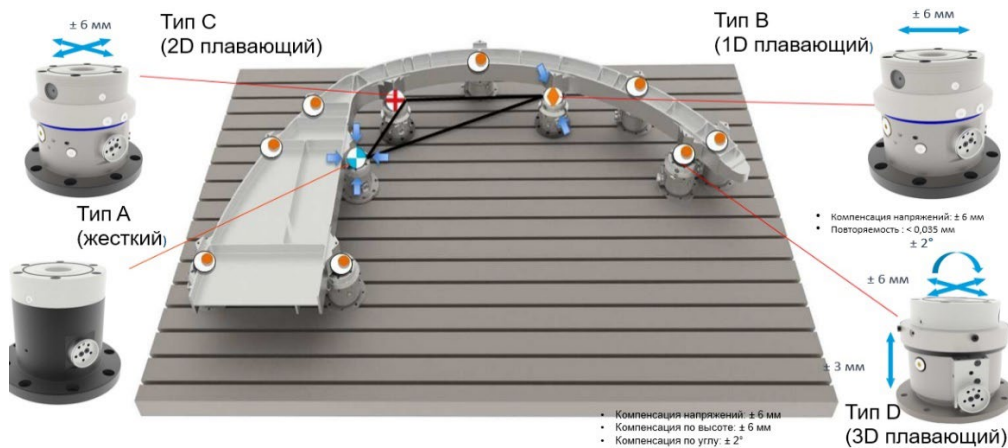


Рис. 2. Способы крепления базирующих пальцев системы

Fig. 2. Bonding techniques for basing fingers of the system

Ключевым моментом применения и внедрения данной системы является определение схемы расстановки точек для закрепления заготовки и оценка величин поводки деформаций, которые будут получены при обработке на данной системе с определённой стратегией обработки. Иными словами, необходима симуляция процесса удаления материала и процесса выхода технологических остаточных и силовых напряжений, возникающих при закреплении заготовки. Данные расчёты осуществлены для типовых схем закрепления нежестких деталей-представителей сложной формы компанией-производителем оснастки SCHUNK VERO-S Aviation методом конечных элементов (FEM) с использованием программного

продукта ANSYS. При этом методика расчетов не передавалась потребителям (вторым лицам).

Аналогами программы ANSYS являются продукты ABAQUS, NASTRAN, SimcenterFEMAP и др. В свободном доступе без ограничений функционала была найдена достаточно применимая для рассматриваемой цели программа ABAQUS. Основная цель проводимого анализа методом конечных элементов – определить величину деформации, вызванную перераспределением ТОН и при определенной стратегии удаления припуска сравнить с возможностями компенсации этих поволок системой нулевого базирования. Основные этапы расчёта схемы закрепления FEM анализом:

– определить возможные варианты расстановки точек закрепления;

- задать материал и его свойства;
- выбрать схему нагружения на основании реальных или предполагаемых величин ТОН при различной толщине детали;
- используя метод «BirthandDeath» произвести симуляцию деформации после удаления различных по величине припусков материала (на основании выбранной стратегии).

Для моделирования различных стратегий удаления припуска и расстановки точек закрепления оснастки VSA использовали метод конечных элементов. Таким образом, могут быть получены различные варианты поведения и деформации заготовки.

Рассмотрим один из примеров вариантов поведения и деформации заготовки. Результаты данного моделирования предполагается сравнить с экспериментальным поведением заготовки при обработке. В программу SIMULIA ABAQUS 2021 загружали модель заготовки и готовой детали с приведёнными на рис. 3 параметрами.

Ниже приведен пример симуляции остаточных напряжений без привязки к схеме закрепления.

Деталь-балка. Заготовка и вписанная в неё деталь представлены на рис. 3.

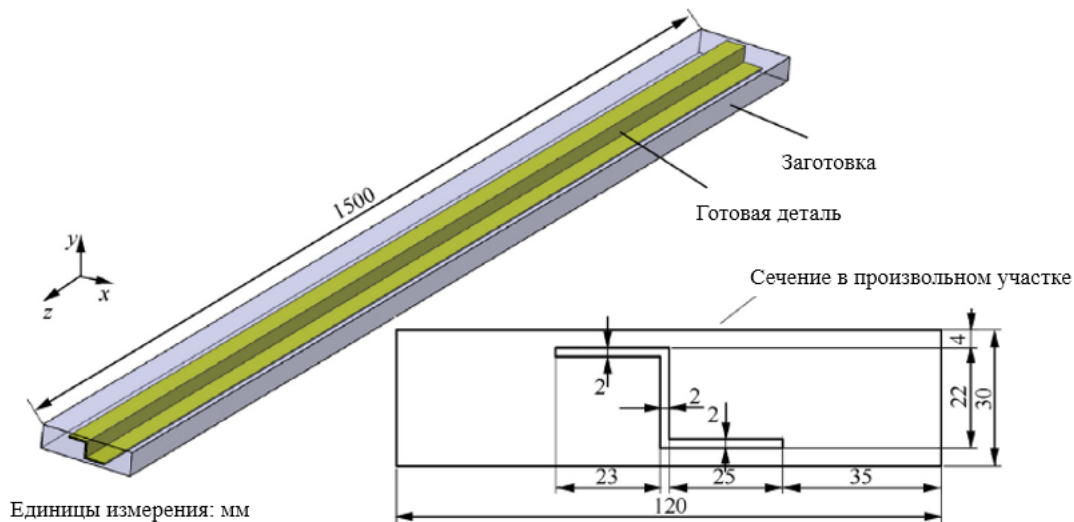


Рис. 3. Эскиз заготовки и готовой детали
Fig. 3. Sketch of the blank and the finished part

Материал – алюминиевый сплав 7050-T7451, его механические свойства: модуль упругости 71,7 ГПа; предел текучести при растяжении 469 МПа; коэффициент Пуассона 0,33; плотность 2,83 кг/м³.

С помощью механического (методом академика Давиденкова) и рентгеновского методами (в условиях действующего авиастроительного предприятия) были определены величины ТОН по толщине заготовки в продольном и поперечном направлениях (рис. 4).

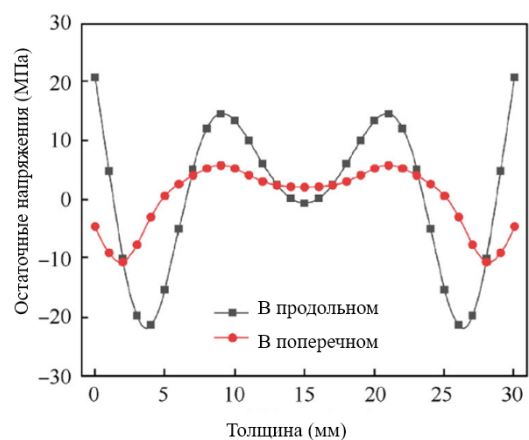


Рис. 4. Распределение ТОН в заготовке
Fig. 4. TRS distribution in the blank

Определена стратегия удаления припуска: 26 проходов по 2 мм по оси Z станка (рис. 5).

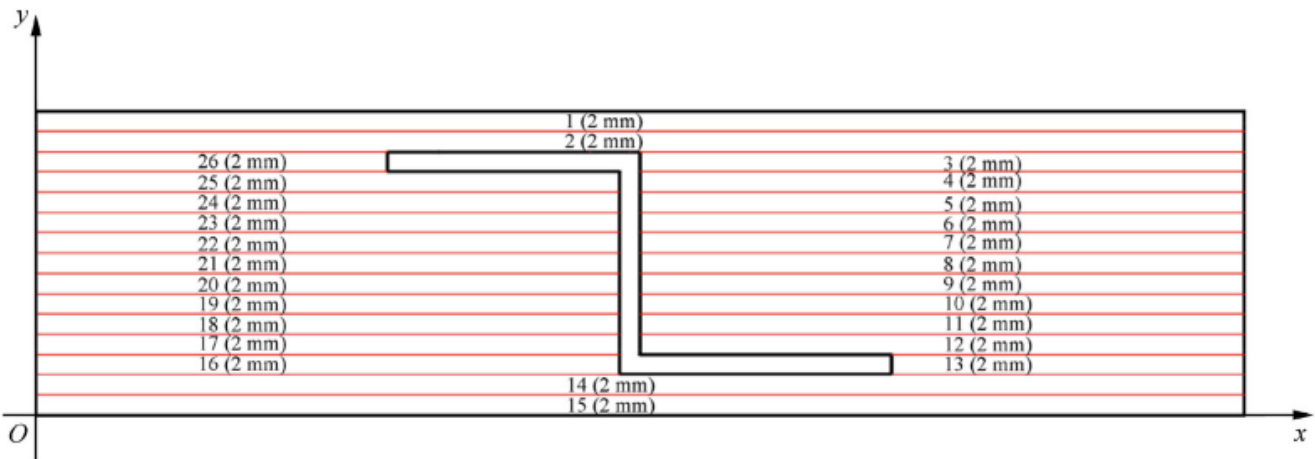


Рис. 5. Последовательность удаления припуска в заготовке

Fig. 5. Sequence of allowance removal in the blank

Величины вычисленных остаточных напряжений (МПа) использованы в качестве задания нагрузки при симуляции методом BIRTHANDDEATH в программе ABAQUS. Произведена симуляция перераспределения внутренних остаточных напряжений и деформации детали после десятого шага обработки.

Заготовка перед обработкой с заданными из графика по рис. 4 остаточными напряжениями, при которых заготовка находится в статическом состоянии и сохраняет свои геометрические параметры, представлена на рис. 6, а. Для имитации деформации при удалении материала в программе SIMULIA ABAQUS 2021 задействован вышеобозначенный метод «BIRTHANDDEATH», в сути которого лежит установка матрицы жёсткости элемента заготовки в «0» для деактивации жёсткости выбранного элемента. В программе материал заготовки задан как изотропный, однородный, в соответствии с физическими свойствами материала. Выбран тип полигональной сетки модели C3D8R, всего 307,498 элементов и 336,672 узлов. Задано ограничение 3-2-1 для исключения свободного перемещения центра тяжести заготовки. Результаты имитации деформации методом FEM после удаления части припуска представлены на рис. 6, б.

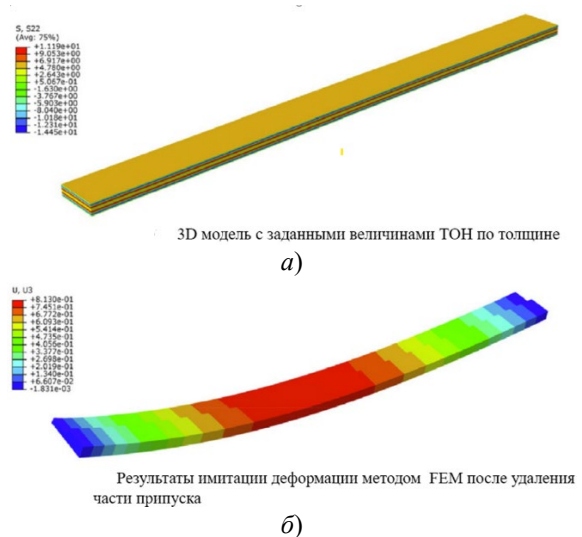


Рис. 6. Состояние заготовки до (а) и после удаления припуска (б)

Fig. 6. Condition of the blank before (a) and after allowance removal (b)

На основании перераспределения напряжений делается вывод о величинах поводков конечной детали.

Подобные методики использовались в работе [6] для проверки, разработанной авторами теории изменения последовательности удаления припуска при механической обработке, оказывающей влияние на величину деформаций детали. Как показали полученные результаты, верификация предложенного метода

весьма близка к действительности. Вопрос симуляции перераспределения внутренних напряжений и деформации заготовок при фрезеровании рассматривался и других научных работах [7–10], однако предлагаемый авторами метод отличается большей надежностью и простотой.

Результаты

После имитации обработки уступа за несколько проходов можно наблюдать деформацию заготовки и новое перераспределение остаточных напряжений. В результате данного эксперимента максимальная деформация заготовки составила 4,6 мм. Это лежит в допуске ± 6 мм и соотносится с возможностями применения системы VSA. Таким образом, данный метод позволяет экспериментировать со стратегией, последовательностью обработки, выбирая наиболее оптимальный вариант, позволяющий сохранять величины поводов в диапазоне ± 6 мм, тем самым давая возможность применять технологическую оснастку VSA и выбирать наиболее оптимальную схему закрепления.

Заключение

Предложенная методика является универсальной при оценке вероятных деформаций заготовки и расчёте технологичности схем закрепления деталей на модулях системы VSA, а также выбора наиболее экономически целесообразного варианта. Программа SIMULIA ABAQUS методом конечных элементов, позволяет выбрать наиболее приемлемый вариант компенсации остаточных напряжений и оценить возможность использования той или иной стратегии удаления припуска. Несмотря на то, что система VSA ориентирована, в основном, на технологию изготовления деталей из алюминиевых сплавов, данные расчёты будут актуальны и при оценке возможности обработки и заготовок деталей из титановых и жаропрочных сплавов. Предлагаемая методика расчетов

актуальна при оценке жёсткости закрепления и отсутствия сдвига модулей, т. к. режимы и силы резания при механической обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов намного выше, чем при обработке заготовок из алюминия. Применение расчёта методом конечных элементов при изготовлении детали на технологической оснастке SCHUNK VERO-S Aviation, в совокупности с определенной стратегией волновой механической обработки, позволяет практически полностью компенсировать деформации и получить годную деталь с первого предъявления, исключая необходимость выполнения операции правки.

По данному принципу выполнен расчёт схем закрепления 3-х реальных типовых длиномерных деталей сложной формы пассажирских ЛА, которые были изготовлены в рамках опытно-промышленной партии. На сегодняшний день ведётся работа по внедрению системы VSA в серийный процесс производства деталей самолётов на одном из авиационных предприятий РФ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **DMG Mori**, оборудование серии ULTRASONIC [Электронный ресурс] // URL: <https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic>.
2. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Издательство иностранной литературы, 1957. 728 с.
3. **Киселев Е.С., Назаров М.В.** Особенности технологии изготовления нежестких корпусных деталей: монография. М.: РУСАЙНС, 2022. 218 с.
4. **Киселев Е.С., Благоский О.В.** Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. С. Петербург: Лань, 2020. 160 с.
5. **Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E.** Application of the Modern Stationary Work holding Systems for Increase Capacity and Quality of Non-Rigid Aircraft Parts // Matec web of Conferences 346, 03076 (2021) ICMTMTE 2021, <https://doi.org/10.1051/mateccof/2021/34/603076>
6. **Yinfei YANG, Longxin FAN, Liang LI, Guolong ZHAO, Ning HAN, Xiaoyue LI, Hui TIAN, Ning HE.** Energy principle and material removal sequence optimization method in machining of aircraft monolithic parts// Chinese Journal of Aeronautics. 2020, №33(10). P. 2770–2781.
7. **Robinson JS, Tanner DA, Truman CE, et al.** Measurement and prediction of machining induced redistribution of residual stress in the aluminium alloy 7449// Exp Mech. 2011; № 51(6). P. 93–981.

8. Masoudi S, Amini S, Saeidi E, et al. Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts // Int J Adv Manuf Technol. 2015; № 76 (1–4). P. 597–608.

9. Arrazola PJ, Ozel T, Umbrello D, et al. Recent advances in modelling of metal machining processes// CIRP Ann - Manuf Technol 2013; № 62 (2). P. 695–718.

10. Dong HY, Ke YL. Study on machining deformation of aircraft monolithic component by FEM and experiment // Chinese J Aeronaut 2006; №19 (3). P. 54–247.

REFERENCES

1. DMG Mori, ULTRASONIC series equipment [Electronic resource] // URL: <https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic> .

2. Bergman L. Ultrasound and its application in science and technology. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literaturi, 1957, 728 p.

3. Kiselev E.S., Nazarov M.V. Features of the manufacturing technology of non-rigid body parts: monograph. Moscow: RUSAINS, 2022, 218 p.

4. Kiselev E.S., Blagovsky O.V. Control of the formation of residual stresses in the manufacture of critical parts. St. Petersburg: Lan, 2020, 160 p.

5. Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E. Application of the Modern Stationary Work holding Systems for Increase Capacity and Quality of Non-Rigid Aircraft Parts// Matec web of Conferences 346, 03076 (2021)ICMTMTE 2021, <https://doi.org/10/1051/mateccof/2021/34/603076>

6. Yinfei YANG, Longxin FAN, Liang LI, Guolong ZHAO, Ning HAN, Xiaoyue LI, Hui TIAN, Ning HE. Energy principle and material removal sequence optimization method in machining of aircraft monolithic parts// Chinese Journal of Aeronautics. 2020, no.33(10). P. 2770–2781.

7. Robinson JS, Tanner DA, Truman CE, et al. Measurement and prediction of machining induced redistribution of residual stress in the aluminium alloy 7449// Exp Mech. 2011; no. 51(6). P. 93–981.

8. Masoudi S, Amini S, Saeidi E, et al. Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts // Int J Adv Manuf Technol. 2015; no. 76 (1–4). P. 597–608.

9. Arrazola PJ, Ozel T, Umbrello D, et al. Recent advances in modelling of metal machining processes// CIRP Ann - Manuf Technol 2013; no. 62 (2). P. 695–718.

10. Dong HY, Ke YL. Study on machining deformation of aircraft monolithic component by FEM and experiment // Chinese J Aeronaut 2006; no.19 (3). P. 54–247.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 25.04.2024.

The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 19.04.2024; assepted for publication 25.04.2024.